

Національний авіаційний університет
Міністерство освіти і науки України
Національний авіаційний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СМОЛИЧ ДЕНИС ВІКТОРОВИЧ

УДК 625.717-047.44 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ
ОЦІНКА УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНИХ
ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д.В. Смолич

Науковий керівник: Краснов Володимир Миколайович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2021

Ідентичний за змістом з іншими примірниками дисертації.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Дубик О.М.

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.

Метою дисертаційної 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).

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, за показниками поштовхоміра та причіпних установок. Ухили, в свою чергу, вимірюють шляхом застосування трудомістких геодезичних методів з використанням теодоліта, тахеометра, далекоміра, нівеліра, вимірювальної лінійки.

У результаті аналізу наведених літературних джерел, нормативних документів та проведених теоретичних досліджень, було встановлено, що одним із основних показників оцінки рівності як аеродромних, так і дорожніх покриттів в Україні є показник, який визначають за допомогою поштовхомірів.

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

І як показує інформаційний та патентний пошук в цьому напрямку, ведеться інтенсивна робота над розробкою пристроїв, які б дозволили механізувати і частково

автоматизувати процес вимірювання ухилів та нерівностей, 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.

Особливістю розглянутої одноосної вимірювальної платформи є використання для побудови безплатформної навігаційної системи сучасних мікроелектромеханічних датчиків (MEMS), що дозволяє зробити буквально революційні зміни в конструюванні приладів для контролю параметрів покриття аеродромних конструкцій.

У другому розділі розглянуто удосконалений спектральний метод оцінки ухилів і рівності та розроблений індикаторний метод контролю ухилів.

Суть створеного спектрального методу оцінки рівності і ухилів поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів полягає в тому, щоб профіль поверхні, представлений як сукупність гармонічних коливань, розкласти в спектр за допомогою дискретного перетворення Фур'є над значеннями висоти профілю поверхні та, розділивши його на відповідні частотні смуги, дослідити їх характеристики не тільки за довжиною хвиль, а й за амплітудою нерівностей.

Для дослідження характеристик точності спектрального методу розроблена математична модель поздовжнього профілю поверхні, що досліджується, представлена як сукупність нерівностей, змодельованих відповідно до вимог державних будівельних норм та рекомендацій ІКАО.

Розроблено ітеративний метод відновлення профілю поверхні, що досліджується, шляхом ітеративного розрахунку точок профілю з множини вимірних кутів між горизонтом та поверхнею. Враховуючи те, що в реальному житті профіль поверхні покриття, що досліджується, буде вимірний з певним значенням похибки вимірювання, проведено оцінку точності його відтворення за допомогою імітаційної моделі.

Для підвищення точності відтворення профілю, запропоновано алгоритм фільтрації виміряного масиву даних (вимірних точок профілю), в якому спочатку виконується фільтрація вздовж масиву вимірних значень зліва направо (forward) і

справа наліво (backward), а потім об'єднання результатів, що дозволяє отримати інтерполяційні оцінки в кожній точці, враховуючи всі наявні вимірювання.

Суть розробленого індикаторного методу контролю ухилів полягає у вимірюванні ухилу, зокрема поперечного профілю, як діагностичного параметра, 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 роду α та другого роду β (хибний результат «не норма» і невиявлений результат «не норма» відповідно), а також достовірності контролю, D .

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 МЕМС-датчиками, як складовими інерціального вимірювального блоку (*IMU*).

Відзначено переваги і недоліки датчиків, зокрема акселерометра і гіроскопа, відповідно до задачі оцінки кута відхилення від горизонталі. Гіроскоп (датчик кутової швидкості) вимірює кутову швидкість, яку при відомих початкових умовах можна інтегрувати протягом часу для розрахунку кутового положення датчика. Інтегрування помилок вимірювання гіроскопа приведе до накопичення помилки в обчисленій орієнтації. Таким чином, гіроскоп не може самостійно забезпечити абсолютне вимірювання орієнтації. Акселерометр вимірює гравітаційне поле Землі, що забезпечує абсолютне визначення орієнтації, проте він піддається впливу високого рівня шуму.

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.

Для порівняння точності визначення кутового положення вимірювальної платформи було використано 3 типи *IMU*: *pr530al*, *ADXL 335 (Analog Devices)*; *MPU-*

6050 (*InvenSense*) та *BNO055* (*BOSH*), тобто інформація від кожного з 3-ох типів, запропонованих *IMU*, комплексувалась розглянутими вище алгоритмами фільтрації.

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

Проведено експериментальне дослідження точності визначення просторової орієнтації вимірювальної платформи, та встановлено, що найточнішим алгоритмом фільтрації даних виявився фільтр Калмана.

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

Принцип роботи вимірювальної платформи оснований на використанні датчиків, виконаних за МЕМС-технологією. Інформація від датчиків комплексується алгоритмом фільтра Калмана, реалізованому на мікроконтролері. Інформація про виміряне значення поздовжнього та поперечного ухилу виводиться на рідкокристалічний екран.

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, можливістю автоматичного переміщення та використання наземної станції керування, за допомогою якої з’являється можливість дистанційної обробки даних.

Враховуючи те, що ВП, у зв'язку з конструктивними особливостями, не має можливості виміряти весь частотний діапазон хвиль нерівностей профілю покриття, що досліджується, втрачається можливість виміряти шорсткість, тому було розроблено прилад, який, на основі методу лазерної тріангуляції, дозволяє безконтактно вимірювати нерівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів в діапазоні частот шорсткості. На даний прилад отримано патент на корисну модель. Також представлено розроблений комплексний прилад для вимірювання ухилів, рівності, та шорсткості поверхонь покриттів, що досліджуються, на який також отримано патент на корисну модель.

Дисертація є завершеною науковою працею автора. На основі проведеного аналізу діючих в Україні нормативних документів щодо методів і засобів вимірювання та нормування нерівностей поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів, автор визначив мету та завдання досліджень, у результаті реалізації яких розв'язав комплексно важливу наукову задачу щодо розробки нових методів оцінки ухилів та рівності поверхонь, що досліджуються, на основі аналізу інформації отриманої від MEMS-датчиків та побудови на їх основі вимірювальних приладів.

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

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 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.

In **the first chapter**, there is an analysis of the existing methods of measuring slopes and assessing the equality of both airfield and road surfaces.

It is established that in accordance with the current regulations in Ukraine, the roads and airfields pavements slopes and roughness are normalized by the difference in altitude at longitudinal leveling, by the number of gaps under the 3-meter rail, by the indicators of the thruster and trailers. Slopes, in its turn, are measured by applying labor-intensive geodetic methods using a theodolite, total station, rangefinder, level, measuring ruler.

As a result of the analysis of the given literature references, regulation documents and the theoretical researches, it was established that one of the basic indicators for estimation of roads and airfields pavements slopes and roughness in Ukraine is the indicator, which is defined by means of push-back probes.

Given a number of shortcomings, inherent in existing methods of estimating roads and airfields pavements slopes and roughness, it remains relevant to create new methods for estimating the parameters of coverage of both aerodrome and road surfaces and to develop modern mobile measuring modules based on them, which will improve the quality of control of the studied surfaces.

And as the information and patent searches show, the intensive developments of devices, which would allow mechanizing and partially automating process of measurement of slopes and roughness, are conducted. Such devices include, for example, also considered in this section, uniaxial wheeled transport platform - a gauge of the slopes of aerodrome

surfaces. This platform is a robotic system, which is theoretically developed at the Moscow Aviation University.

A feature of this uniaxial measuring platform is the use of modern MEMS sensors to build a platformless navigation system, which allows you to make literally revolutionary changes in the design of devices to control the parameters of the coverage of aerodrome structures.

The second chapter considers the spectral method of estimating slopes and roughness, developed by the author, and the indicator method of slope control.

The essence of the created spectral method for estimating the roads and airfields pavements slopes and roughness is that the surface profile, presented as a set of harmonic oscillations, is decomposed into a spectrum by a discrete Fourier transform over the values of the surface profile height and dividing it into appropriate frequency bands, which would allow investigations of their characteristics not only by wavelength but also by the amplitude of inequalities.

To study the exact characteristics of the spectral method, a mathematical model of the longitudinal profile of the investigated surface was developed, which represents a set of irregularities modeled in accordance with the requirements of state building codes and ICAO recommendations.

An iterative method of restoring the profile of the investigated surface by iterative calculation of profile points from the set of measured angles between the horizon and the surface is developed. Given that in real life the profile of the investigated surface will be measured with a certain value of the measurement error, the accuracy of its reproduction was assessed using a simulation model.

To increase the accuracy of profile reproduction, an algorithm for filtering the measured data array (measured profile points) is offered, where filtering is first performed along the array of measured values from left to right (forward) and right to left (backward), and then combining results to obtain interpolation estimates at each point, taking into account all available measurements.

The essence of the developed indicator method of slope control is to measure the slope, in particular the cross profile as a diagnostic parameter, compare its value with the

requirements of regulations and decide "normal" or "non-normal" if the parameter is outside the tolerance.

For this method, a model for calculating errors of the first kind α and second kind β (false result "not normal" and undetected result "not normal", respectively), as well as the reliability of control, D.

The third chapter considers the proposed option of measuring the angle between two points on the profile of the investigated surface, the essence of which is to use a measuring platform with MEMS sensors, installed on it as components of the inertial measuring unit (IMU).

The advantages and disadvantages of sensors, in particular the accelerometer and gyroscope, in accordance with the problem of estimating the angle of deviation from the horizontal, were noted. The gyroscope (angular velocity sensor) measures the angular velocity, which, under known initial conditions, can be integrated over time to calculate the angular position of the sensor. Integration of the gyroscope measurement errors will result in the accumulation of an error in the calculated orientation. Thus, the gyroscope cannot independently provide absolute orientation measurement. The accelerometer measures the Earth's gravitational field, which provides an absolute determination of orientation, but it is exposed to high noise levels.

It is established that the solution of the problem of calculating a single value for estimating the angular position of the measuring platform is carried out by complexing (filtering) the data, obtained from the accelerometer and gyroscope. The paper considers 3 types of filters: complementary filter, Kalman filter and Majvik filter.

To compare the accuracy of determining the angular position of the measuring platform, 3 types of IMU were used: pr530a1, ADXL 335 (Analog Devices), MPU-6050 (InvenSense) and BNO055 (BOSH), ie information from each of the 3 types, proposed by the IMU, was complexed above filtering algorithms.

To conduct the experiment, the author developed and manufactured a laboratory installation, which was used to perform experimental measurements of the angles of spatial orientation. The basis of the laboratory installation was a rotary bracket KP-9.

An experimental study of the accuracy of determining the spatial orientation of the measuring platform was conducted, and it was found that the Kalman filter was optimal in terms of accuracy.

The fourth chapter considers the principle of construction of the current module developed at the Department of Avionics of the National Aviation University jointly by the DPT of the Ukraeroproekt Research Institute (agreement № 753-XII) for determining longitudinal and transverse slopes and roughness. The results of measuring slopes and roughness, which were carried out during the construction of a new runway at the Kharkiv International Airport (Osnova), are also presented.

The principle of operation of the measuring platform is based on the use of sensors made by MEMS technology. The information from the sensors is complexed by the Kalman filter algorithm implemented on the microcontroller. Information about the measured value of the longitudinal and transverse slope is displayed on the liquid crystal display.

Studies of runway fragments at Kharkiv International Airport show that with the help of the module it is possible to quickly and accurately measure the slopes and flatness of each plate and its individual fragments without the use of geodetic instruments and rulers, which significantly reduces the complexity of measurements.

The prospects of improving the design of the device are also considered, the project of the measuring platform with the increased accuracy of measurement, possibility of automatic movement and use of ground control station by means of which there is a possibility of remote data processing, is developed.

Due to the fact that the measuring device, because of the design features, is not able to measure the entire frequency range of the waves of the irregularities of the investigated roughness profile, it is impossible to measure the roughness. A device was developed that, based on the method of laser triangulation, allows non-contact measurement of the roughness profile of roads and airfields pavements slopes in the frequency range of roughness. A utility model patent has been obtained for this device. The developed complex device for measuring the slopes and roughness of the road and airfield investigated surfaces is also presented, for which a utility model patent has also been obtained.

The dissertation is a completed scientific work of the author. Based on the analysis of current regulations in Ukraine on methods and means of measuring and standardizing roads and airfields pavements slopes and roughness surfaces, the author identified the purpose and objectives of research, as a result of which a complex scientific problem to develop new methods for estimating slopes and roughness of the investigated surfaces was solved on the basis of the information, received from MEMS-sensors and construction of measuring devices on their basis.

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

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

4. Грібов В.М. О возможности уменьшения вероятности ложных отказов блоков типа LRU на основе алгоритмической избыточности / В.М. Грібов, 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.- практич. часоп. / Інж. 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.- практич. часоп. / Інж. 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 CNS/ATM: 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНІХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ.....	13
1.1. Методи вимірювання рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів в Україні.....	18
1.2. Оцінка рівності профілю поверхонь покриттів, що досліджуються.....	21
1.3. Вимірювання ухилів.....	23
1.4. Сучасні методи вимірювання рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів.....	27
Постановка мети та завдання дослідження.....	35
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНІХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ.....	37
2.1. Спектральний метод оцінки ухилів та рівності.....	38
2.1.1. Математична модель профілю поверхні.....	42
2.1.2. Ітеративний метод відновлення профілю поверхні на базі вимірних кутів просторової орієнтації.....	48
2.1.3. Метод підвищення точності вимірювання профілю.....	52
2.2. Індикаторний метод контролю ухилів та рівності.....	55
Висновки.....	65
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ.....	67
3.1. МЕМС-датчики.....	68
3.1.1. МЕМС-акселерометр.....	69
3.1.2. МЕМС-гіроскоп.....	74
3.2. Комплексування інформації.....	76
3.2.1. Комплементарний фільтр.....	79
3.2.2. Фільтр Маджвіка.....	81

3.2.3. Фільтр Калмана.....	90
3.3. Експериментальне дослідження точності визначення просторової орієнтації вимірювальної платформи.....	92
Висновки.....	97
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МАКЕТУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЗДОВЖНИХ ТА ПОПЕРЕЧНИХ УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНИХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЗАМІРІВ.....	99
4.1. Конструктивні особливості вимірювального модуля	100
4.2. Експериментальні дослідження фрагментів злітно-посадкової смуги в міжнародному аеропорту «Харків» (Основа).....	102
4.3. Перспектива розробки діючого модуля для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів.....	107
4.4. Прилад для вимірювання шорсткості профілю поверхонь, що досліджуються.....	110
Висновки.....	114
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118
ДОДАТКИ.....	130
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	131
ДОДАТОК Б. ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ...	133
ДОДАТОК В. ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	135
ДОДАТОК Г. ПАТЕНТИ.....	141
ДОДАТОК Ґ. СВІДОЦТВА ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР	145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

СКВ – середнє квадратичне відхилення;

ММК – метод Монте-Карло;

ВП – вимірювальна платформа;

IMU – (Inertial Measurement Unit) інерційний вимірювальний модуль;

ІВБ – інерційний вимірювальний блок;

IRI – (International Roughness Index) міжнародний коефіцієнт рівності;

ЛА – літальний апарат;

МЕМС – мікроелектромеханічні системи;

БІНС – безплатформна інерціальна навігаційна система;

ДП – діагностичний параметр;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

L – крок вимірювання;

α – помилка першого роду, хибний результат «параметр не в нормі»;

β – помилка другого роду, невиявлений результат «параметр не в нормі»;

D – Достовірність діагностування;

z – нормоване значення похибки засобу вимірювання;

δ – нормоване значення допуску на діагностичний параметр;

σ_ε – середньоквадратичне відхилення помилки вимірювання ухилу, ‰;

σ_x - середньоквадратичне відхилення значення ухилу, ‰;

$\sigma_{\text{проф.}}$ - середньоквадратичне відхилення помилки відтворення профілю поверхні, що досліджується, мм;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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, яка в цілому задовольняє основні потреби населення та економіки в перевезеннях лише за обсягом, але, на жаль, не за якістю. На сьогоднішній день стан транспортної галузі не повною мірою відповідає вимогам реалізації євроінтеграційного курсу нашої країни та об’єднання транспортної мережі України з Транс’європейською. Згідно з Національною транспортною стратегією України на період 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 шляхах 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%. Отже, якість поверхні аеродромних покриттів відіграє важливу роль при забезпеченні належного рівня безпеки.

Тому при будівництві нових та в процесі експлуатації діючих автомобільних шляхів та аеродромів необхідно забезпечувати високу якість їхнього покриття, зокрема відповідність параметрів шорсткості, повздожних та поперечних ухилів діючим європейським стандартам та державним будівельним нормам.

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, за показниками поштовхоміра та причіпних установок, ухили в свою чергу вимірюють

шляхом застосування трудомістких геодезичних методів з використанням теодоліта, тахеометра, далекоміра, нівеліра, вимірювальної лінійки.

До основних недоліків методу поздовжнього нівелювання можна віднести те, що він не враховує нерівності з довжиною хвилі менше 10 м та більше 40 м а також достатньо трудомісткий. Щодо методу оцінки рівності шляхом вимірювання просвітів під триметровою рейкою, він також має вибіркового характеру, і дає можливість оцінити довжину хвилі нерівності від 1 м до 3 м які не враховуються шляхом оцінки рівності за методом поздовжнього нівелювання та взагалі не враховуються частоти, які викликають шум. Одним із основних показників оцінки рівності як аеродромних, так і дорожніх покриттів в Україні є показник, який визначають за допомогою поштовхомірів. Але й і він не позбавлений недоліків, оскільки поштовхомір є механічним приладом, який встановлюють над задньою віссю автомобіля-лабораторії, то на результат його вимірювань впливає стан підвіски, відношення підресорених та непідресорених мас автомобіля, швидкості руху та власне сам тип поштовхоміра.

Отже, нормативний рівень показників рівності поверхонь аеродромних та дорожніх покриттів, які використовують на теперішній час в Україні є застарілий і не дозволяє об'єктивно оцінювати параметри поверхонь, які б дали можливість підвищити безпеку польотів та руху на автошляхах. Враховуючи їх недоліки, залишається актуальним питання щодо створення нових методів оцінки параметрів поверхонь покриттів як аеродромів, так і автомобільних шляхів та розробка на їх основі сучасних мобільних вимірювальних модулів, що підвищить якість контролю поверхонь, що досліджуються.

В даний момент часу у різних країнах ведуться розробки пристроїв, які дозволяють частково механізувати процедуру вимірювання ухилів за допомогою механічних пристосувань, або автоматично вимірювати напрям та величину ухилу за однією координатою шляхом використання досягнень новітніх технологій. Мобільних пристроїв для автоматичного вимірювання ухилів та рівностей 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 вимірювання поздовжніх і поперечних ухилів, а також оцінка рівності покриття конструкцій аеродрому та автомобільних шляхів, розробка на їх основі сучасних мобільних вимірювальних модулів, що підвищить якість і швидкість контролю параметрів, що досліджуються.

Аналіз останніх джерел і публікацій

Враховуючи, що безпечне функціонування автомобільного та авіаційного транспорту безпосередньо залежить від рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів, багато науковців займаються проблемою оцінки та зваженого обґрунтування їх нормативних показників. До них відносяться: Біруля А.К. [13]; Савенко В. Я. [3, 9, 16]; Кіяшко І. В. [3, 9, 14, 16]; Філіппов В. В. [4]; Павлюк Д. О. [8, 18]; Роев Ю. Д. [5]; Смолянчук Р. В. [14]; Горб А. О., Горб О. І. [17], а також і зарубіжні вчені: Бочкарев Н. Н. [25]; Канунников О. В. [26]; Щилова М. А., Черноморский А. І. [35], Грошев І. В. [27]; Still P.V., Jordan P.G.[33]; Lucas, J., Viano A. [32], зокрема група вчених Мічиганського транспортного науково-дослідницького інституту (UMTRI), до складу якої входили Sayers M. W. та Karamihas S. M. [7, 30], а також Yanfeng Ouyang, Samer Madanat [15]; Y. Zhao, J. McDaniel, M. Wang [29] та ін.

На основі проведеного огляду та аналізу наукових публікацій з даної проблеми сформульовані мета і завдання дисертаційного дослідження.

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 (MEMS).

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 [106]);

– розроблено та виготовлено макет автоматичного мобільного приладу для вимірювання нерівностей поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів (пат. № 98226 [114], пат. № 103211 [107], пат. № 106862 [115] Україна);

– за результатами проведених експериментальних досліджень, розроблених в дисертаційному дослідженні, підходів до вимірювання та оцінки ухилів та рівності профілю покриття, що досліджуються, розроблено рекомендації щодо підвищення автоматизованості процесу вимірювання (авт. свід. №49339 від 27.05.2013 [108]);

– розроблені за результатами дисертаційної роботи матеріали знайшли своє відображення у збірнику лабораторних робіт та впроваджено в навчальний процес

кафедри авіоніки Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету з дисципліни «Технічне діагностування авіоніки». Також отримані результати роботи впроваджено та застосовано: 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».

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 «Розробка діючого модуля для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності поверхні аеродромних покриттів. Проведення замірів ухилів та рівностей 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).

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 [6, 103, 113] автором особисто реалізовано алгоритм фільтра Калмана для комплексування даних від МЕМС-датчиків на мікроконтролері *ATmega 16*, та досліджено характеристики його точності.

У роботах [112, 42] автором особисто розроблено алгоритм обробки зображення, реалізованого в програмному середовищі *MATLAB*, розроблено та виготовлено дослідний зразок приладу.

У роботах [61, 62] автором особисто розроблено програми імітаційного моделювання, та проведено дослідження.

У роботі [43] автором особисто удосконалено спектральний метод оцінки рівності профілю поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів.

У роботі [45] 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 входять до міжнародних наукометричних баз, 3 статті, що додатково відображають наукові результати дисертації, 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, розроблені за результатами досліджень.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНІХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ

При теперішніх темпах підвищення ролі авіації в пасажирських і вантажних перевезеннях багато уваги приділяють безпеці польотів. Як відомо найбільш навантаженими (небезпечними) етапами польоту є зліт і посадка. Тому якість покриття аеродромних конструкцій відіграє важливу роль при забезпеченні належного рівня безпеки.

При будівництві нових аеропортів та в процесі експлуатації діючих потрібно забезпечувати високу якість покриття злітно-посадкових смуг, зокрема відповідність параметрів шорсткості, повздовжніх та поперечних ухилів діючим європейським стандартам та нормам ІКАО.

Наприклад, відповідно до норм ІКАО, задля забезпечення належного рівня безпеки, існують рекомендації щодо значень поздовжніх ухилів ЗПС (рис.1.1) відповідно до кодового позначення аеродрому, а також для забезпечення найбільш швидкого стоку води, поверхня ЗПС повинна мати, якщо це можливо, двоскатний поперечний профіль з рекомендованими значеннями поперечного ухилу зазначеними на рис.1, також до поперечного профілю поверхні висуваються вимоги щодо симетричності ухилів по обидві сторони осьової лінії ЗПС [1].

Нерівності на поверхні ЗПС можуть негативно впливати на зліт та посадку літака і викликати надмірне «козління», зміну кута тангажа, вібрацію та інші явища, що спричиняють трудність керування літаком.

Також в державних будівельних нормах встановлені технічні вимоги щодо ухилів як поздовжніх, так і поперечних при проектуванні нового будівництва та реконструкції автомобільних доріг загального користування. (Частина I. Проектування та Частина II. Будівництво відповідно) [2].

Як і до покриття поверхні ЗПС, до покриттів проїзної частини автомобільних доріг висуваються вимоги щодо двосхилого поперечного профілю. Вимоги до значення поперечного ухилу проїзної частини залежать від матеріалу дорожнього

покриття: 25‰ – для доріг з асфальтобетонним та цементобетонним покриттям; 25‰ – 30‰ – на гравійних та щебених покриттях; 30‰ – 40‰ – на ґрунтах укріплених в'язучими та місцевими матеріалами [2].

Поздовжні ухили	
Поздовжній ухил не повинен перевищувати:	
1%, коли вказаний кодівий номер 3 або 4	Поздовжній ухил будь-якої частини ЗПС не повинен перевищувати: 1,25% для ЗПС, коли вказаний кодівий номер 4, за виключенням того, що поздовжній ухил першої і останньої чверті довжини ЗПС не повинен перевищувати 0,8% 1,5%, коли вказаний кодівий номер 3, за виключенням того, що для першої і останньої чверті довжини ЗПС категорії II або III, обладнаної для точного заходу на посадку, поздовжній ухил не повинен перевищувати 0,8%
2%, коли вказаний кодівий номер 1 або 2	
Різниця між двома суміжними ухилами не повинна перевищувати:	
1,5 %, коли вказаний кодівий номер 3 або 4	Перехід від одного ухилу до іншого повинен здійснюватися по викривленій поверхні з показниками зміни не більше: 0,1% на 30 м (мінімальний радіус кривизни 30 000 м), коли вказаний кодівий номер 4 0,2% на 30 м (мінімальний радіус кривизни 15 000 м), коли вказаний кодівий номер 3 0,4% на 30 м (мінімальний радіус кривизни 7500 м), коли вказаний кодівий номер 1 або 2
2 %, коли вказаний кодівий номер 1	
Поперечні ухили	
Поперечний ухил не повинен перевищувати:	
1,5%, коли вказана кодова буква С, D, E або F	а також не повинен бути менше 1%, окрім місць перетину ЗПС або РД
2 %, коли вказана кодова буква А або В	

Рис. 1.1. Рекомендовані значення поздовжніх та поперечних ухилів ЗПС

Відповідно, проектування поздовжнього профілю автомобільної дороги необхідно виконувати виходячи з інтенсивності руху, можливості забезпечення умов безпеки та комфортності руху транспорту, врахування можливості дорожньої реконструкції. Залежність вимог до ухилів поздовжнього профілю покриття автомобільних доріг від проектних та розрахункових швидкостей наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Значення ухилу поздовжнього профілю

Параметри	Параметри залежно від розрахункових швидкостей, км/год										
	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30
Поздовжній ухил, ‰	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100

Як показує практика, існуючі методи та база приладів, які використовують для оцінки рівності дорожніх покриттів, та діючі нормативні значення показників принципово застаріли та мають цілу низку недоліків [3, 4, 5], якість покриття конструкцій аеродрому перевіряється шляхом застосування трудомістких геодезичних методів з використанням теодоліта, тахеометра, далекоміра, нівеліра, вимірювальної лінійки для визначення ухилів, а нерівності вимірюють не менш трудомістким шляхом – вимірюванням зазорів під триметровою рейкою [6].

На основі аналізу переваг і недоліків методів та принципів оцінки і нормування рівності як аеродромних, так і дорожніх покриттів, прийнятих у світовій практиці, перш за все необхідно зрозуміти, що представляє собою той чи інший показник для оцінки рівності, що таке взагалі рівність або нерівність покриття аеродромної конструкції.

Щодо визначення терміну «рівність», існує багато підходів: пасажирів її характеризують на основі власних відчуттів (коливання, вібрація, шум); проектувальники за впливом на динамічні характеристики (динаміка руху літака або автомобіля, робота двигуна); будівельники за відхиленнями від проектних профілів; експлуатаційники за коливаннями транспортного засобу. Отже, рівність комплексно характеризує якісний стан поверхні покриття аеродромної конструкції, що забезпечує високі споживчі властивості [3].

Але що характеризує саму поверхню? Насамперед якісний стан покриття аеродромних конструкцій характеризують наявність нерівностей на цих покриттях, їх вимірюють або визначають, а вже за отриманими значеннями оцінюють на скільки рівна дана поверхня. Таким чином, щоб оцінити рівність потрібно спочатку визначити та охарактеризувати нерівності поверхні, що досліджується.

Що таке профіль поверхні? Профіль являє собою двовимірну частину поверхні аеродромної конструкції (переріз), взятої вздовж уявної лінії (рис. 1.2). Саме по формі профілю поверхні і проводиться оцінка рівності [3, 7].

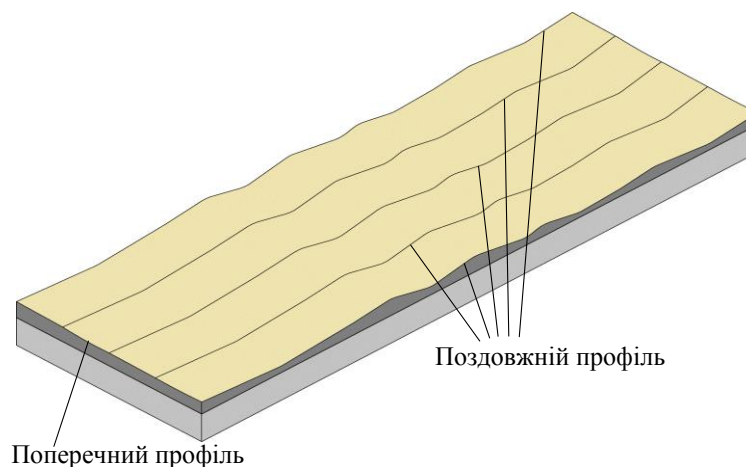


Рис. 1.2. Профілі поверхні аеродромної конструкції

У низці наукових праць [3, 8, 9], нерівності умовно поділяють на три групи:

1. Шорсткість – сукупність нерівностей з довжиною хвилі до 10 см. Дані нерівності повністю поглинаються шиною, тому не викликають низькочастотних коливань транспортного засобу, але впливають на роботу шин (зчеплення, зношування) та на рівень шуму.

2. Мікронерівності – нерівності з довжиною хвилі від 10 см до 100 м. Дані нерівності формують мікропрофіль поверхні, викликають як низькочастотні, так і високочастотні коливання.

3. Макронерівності – нерівності з довжиною хвилі більше 100 м. Дані нерівності формують макропрофіль (поздовжній профіль) поверхні, впливають на динаміку, режими руху і роботу двигунів, не викликають низькочастотні та високочастотні коливання.

Як видно з класифікації нерівностей вони всі залежать від довжини хвилі. Оскільки профіль покриття є ергодичною випадковою функцією пройденого шляху, його ідеалізують, розглядаючи як сполучення окремих нерівностей, що характеризуються довжиною, висотою, формою та їх чергуванням, зводячи поздовжній профіль до хвилеподібного гармонійного профілю (рис. 1.3).

На основі цієї теорії доцільно ввести термін «частота нерівностей», яку знаходять за формулою [3]:

$$\theta = \frac{\omega}{V} = \frac{2\pi\nu}{V} = \frac{2\pi}{S}, \quad (1.1)$$

де θ – частота нерівностей покриття, м^{-1} ;

ω – циклічна частота коливань, Гц;

V – швидкість руху транспортного засобу, м/с;

ν – частота коливань, Гц;

S – довжина хвилі нерівності, м.

Традиційно прийнято вважати, що рівність охоплює мікронерівності покриттів. Але не все однозначно з впливом шорсткості на показник загальної нерівності, тобто з однієї сторони вона має забезпечувати коефіцієнт зчеплення, бути як можна меншою, для формування найбільшої площі контакту протектора шини з поверхнею аеродромного покриття, з іншого боку – досить грубою, щоб сприяти швидкому відводу води з під площі контакту. Необхідно також враховувати, що збільшення шорсткості веде до зростання опору коченню, зношування шин.

Якщо використовувати вище наведені передумови, то всі показники оцінки рівності поверхні аеродромних конструкцій можна класифікувати за діапазоном довжин хвиль нерівностей, що впливають на коливання, вібрацію та шум.

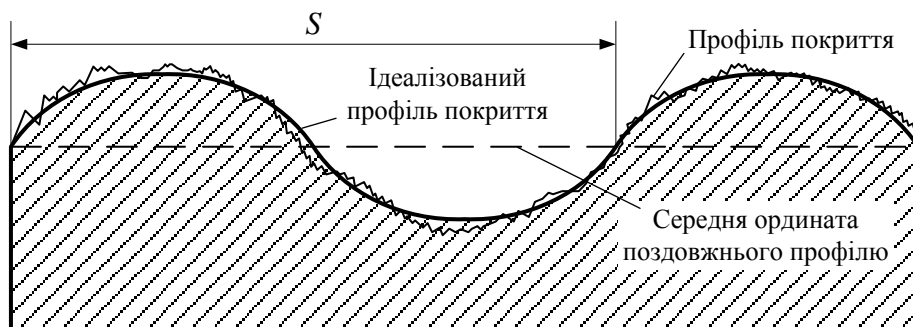


Рис. 1.3. Параметр рівності покриття

Графік довжин хвиль, які впливають на якісний стан поверхні покриття для більш наглядного розуміння та аналізу представлено на рис. 1.4. Умовно графік поділено на три поля в залежності від вище наведеної характеристики нерівностей. На полі графіка за формулою (1.1) побудовані криві залежності довжини хвилі S , швидкості руху транспортного засобу V та частоти коливань ν . По осі абсцис графіка

відкладено довжину хвилі нерівностей у логарифмічному масштабі, по осі ординат показані діапазони довжин хвиль нерівностей [3].

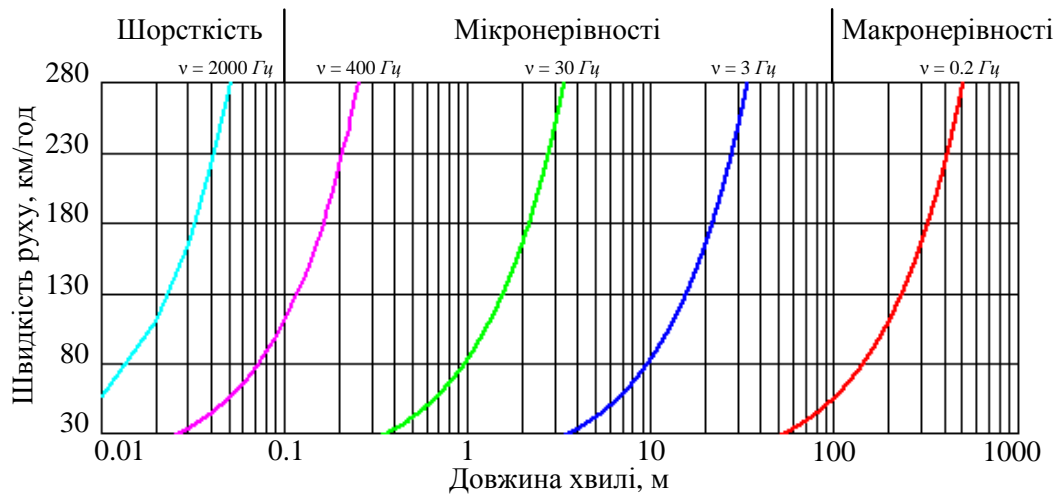


Рис. 1.4. Діаграма довжин хвиль, що впливають на якість покриття аеродромних конструкцій

1.1. Методи вимірювання рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів в Україні

Відповідно до нормативних документів, які діють в Україні [2, 10 – 12] рівність аеродромних покриттів нормують: за різницею висотних відміток при поздовжньому нівелюванні; за кількістю просвітів під 3-и метровою рейкою; за показниками поштовхоміра та причіпних установок (ПКРС, УДВО-НТУ тощо).

Показник оцінки рівності за різницею висотних відміток при поздовжньому нівелюванні, одержують за даними нівелювання відносних відміток h , точок поверхні покриття або основи дороги в місцях вимірювання через крок $(5,0 \pm 0,2)$ м. Довжину ділянки вимірів вибирають не менше ніж 400 м. Місця розташування нівелірної рейки повинні бути на одній лінії, яка знаходиться на відстані 0,5 – 1,0 м від кромки проїзної частини [12]. Вимірювання проводять, встановлюючи нівелірну рейку по черзі у кожному з позначених міток. За даними нівелювання обчислюють відносні відмітки h_i точок поверхні покриття аеродромної конструкції (рис. 1.5). За відносними відмітками точок поверхні покриття в місцях вимірювання визначають відхилення цих точок (крім першої та останньої на ділянці вимірів) від прямої лінії, що проходить через попередню $(i - 1)$ і наступну $(i + 1)$ точки, за формулою:

$$\delta h_i = \left| \frac{h_{i-1} + h_{i+1}}{2} - h_i \right|, \quad (1.2)$$

де δh_i – відхилення точок від прямої лінії;

h_{i-1} , h_i , h_{i+1} – відповідно відносні відмітки попередньої, поточної та наступної точок.

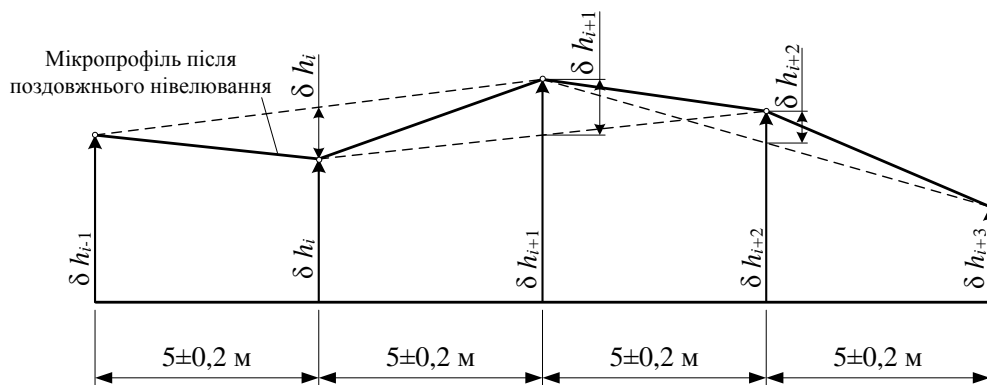


Рис. 1.5. Визначення різниці висотних відміток при поздовжньому нівелюванні

Шляхом поздовжнього нівелювання мікропрофіль ділянки покриття, що досліджується ідеалізують, тобто отримують мікропрофіль з кроком 5 м (рис. 1.5), якщо вписати у цей мікропрофіль криву, то ми отримаємо хвилеподібний профіль (рис. 1.3). Тобто метод поздовжнього нівелювання не враховує нерівності з довжиною хвилі менше 10 м та більше 40 м (максимальна довжина нерівності наведеної у додатку Б [12]), взагалі не враховуються частоти, які супроводжують шум (більше 200 Гц). По суті даний метод дозволяє контролювати якість виконання будівельних робіт (відхилення фактичної поверхні від проектної), враховуються нерівності з довжиною хвилі більшою ніж відбиток колеса [13]. Основні недоліки методу поздовжнього нівелювання та отриманого показника для оцінки рівності за даним методом наступні:

- трудомісткість оцінки рівності;
- підвищені вимоги до безпеки робіт, якщо вимірювання відбувається, наприклад, під час експлуатації ЗПС;
- оцінка рівності носить вибіркового характер.

Тому цей метод, як правило, взагалі не використовують на практиці та навіть у діючому ДБН В.2.3-4:20015 [2] відсутня методика оцінки рівності поздовжнім нівелюванням, хоча вона була присутня у попередніх ДБН за 2000 р. (п. 16.6).

Показник оцінки рівності отриманий за просвітами під триметровою рейкою, одержують шляхом прикладання рейки до поверхні основи (покриття) на відстані 0,5 – 1,0 м від кромки проїзної частини або краю смуги руху, при кожному прикладанні вимірюють величину п'яти просвітів ($h_1 - h_5$) під рейкою в місцях, які відповідають міткам на бічних гранях рейки (рис. 1.6) [12]. Довжину ділянки вимірів приймають у межах 300 – 400 м. Обробка результатів вимірів полягає у визначенні кількості просвітів під рейкою, що перевищує максимально допустиму величину та число просвітів, які менше мінімально допустимої величини, встановленої у відсотках.

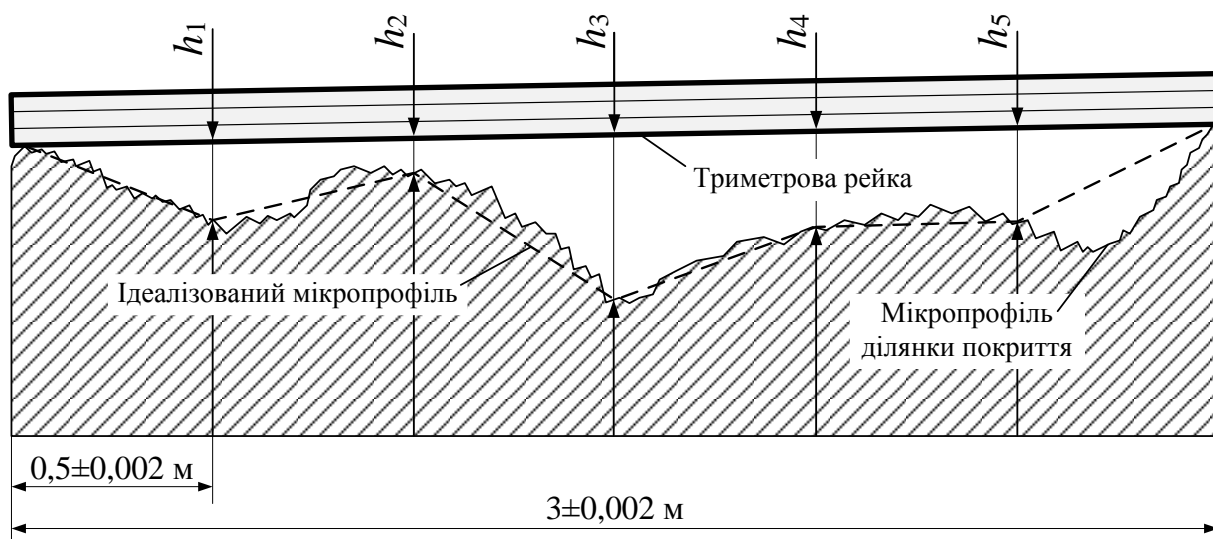


Рис. 1.6. Схема прикладання рейки до поверхні покриття та місця вимірювання просвітів за допомогою клинового промірника

Шляхом отримання показників для оцінки рівності за просвітами під триметровою рейкою враховують нерівності з довжиною хвилі від 1 м до 3 м, тобто, відповідно до формули (1.1), враховуються частоти у діапазоні від 3,7 Гц до 61,1 Гц, які не враховуються показником оцінки рівності за методом поздовжнього нівелювання та взагалі не враховуються частоти, які викликають шум.

Тому показники, оцінки рівності за різницею висотних відміток при поздовжньому нівелюванні і за кількістю просвітів під 3-и метровою рейкою необхідно використовувати у комплексі та оскільки оцінка рівності за цими показниками відбувається не по всій довжині ділянки покриття аеродромної конструкції, яка оцінюється, а носить явно вибіркового характер.

У випадках ремонтів ЗПС достовірність зазначеного методу суттєво знижується у зв'язку з необхідністю додаткових вимірів радіусів існуючих вертикальних кривих і подальшої оцінки поправок на кривизну існуючого профілю.

Діючі нормативні документи [2, 10 – 12], у першу чергу, орієнтовані на показник оцінки рівності, який визначають за допомогою поштовхомірів і на теперішній час є основним методом оцінки рівності поверхні як аеродромних, так і дорожніх покриттів в Україні.

Але численні дослідження [6, 14 – 16] все частіше свідчать, що на показник оцінки рівності, який отримують за поштовхоміром впливає велика кількість факторів, які дуже важко враховувати або контролювати. Вимірювання рівності за поштовхоміром проводять при швидкості руху (60 ± 5) км/год. Оскільки поштовхомір є механічним приладом, який встановлюють над задньою віссю автомобіля-лабораторії, то в першу чергу довжина нерівностей, яка контролюється, залежить від стану і параметрів підвіски, відношення підресорених та непідресорених мас автомобіля, швидкості руху транспортного засобу і від самого типу поштовхоміра, оскільки поштовхоміри різних марок мають різну чутливість до амплітуд дорожніх нерівностей.

Отже, нормативний рівень показників рівності поверхні аеродромних покриттів, які використовують на теперішній час в Україні не дозволяє об'єктивно обґрунтувати види й обсяги робіт з ремонту та утримання аеродромних покриттів для підвищення безпеки польотів.

1.2. Оцінка рівності профілю поверхонь покриттів, що досліджуються

Останнім часом, в усьому світі для оцінки рівності дорожніх покриттів використовують «Міжнародний Індекс Рівності (IRI)» та «спектральну щільність дисперсії». Розглянемо більш детально, що собою представляють ці показники та які довжини хвиль вони дозволяють контролювати. Згідно з публікацією [7] показник IRI найбільш чутливий до нерівностей з довжиною хвилі від 1,2 м до 30,0 м з піковими значеннями чутливості на 2,30 м і 15,78 м, тому згідно з формулою (1.1), враховуються частоти у діапазоні від 0,37 Гц до 50,93 Гц.

Показник IRI більш стабільний у часі, дає більш детальну і досконалу оцінку нерівностей покриття ЗПС та більш універсальний (може бути визначений з використанням широкого діапазону різноманітних приладів), ніж метод оцінки рівності за поштовхоміром [3]. Тому його використовують, як основний показник для оцінки рівності у багатьох країнах світу.

Оскільки, профіль поверхні дорожнього та аеродромного покриття є ергодичною випадковою функцією пройденого шляху, то його як і будь-яку випадкову функцію можна охарактеризувати статистичними характеристиками. Найбільш детальною та досконалою характеристикою є «спектральна щільність дисперсії» ординат профілю покриття аеродромної конструкції, яка характеризує як амплітуди нерівностей, так і їх розподіл за довжиною хвиль [17].

Для оцінки спектральної щільності дисперсії ординат профілю дороги найчастіше застосовують: стандартний метод, що полягає в обчисленні перетворення Фур'є автокореляційної функції профілю поверхні як дорожнього так і аеродромного покриття відповідно до теореми Вінера-Хінчіна; метод, який базується на безпосередньому перетворенні Фур'є профілю поверхні, що досліджується [16].

При використанні стандартного методу спочатку визначають кореляційну функцію профілю дороги (1.3), а потім за перетворенням Фур'є обчислюють спектральну щільність дисперсії (1.4). Кореляційну функцію визначають за наступною залежністю [3, 16]:

$$R_q(x_s) = \lim_{L_q \rightarrow \infty} \frac{1}{L_q} \int_0^{L_q} (q(x) - q_{cp})(q(x + x_s) - q_{cp}) dx, \quad (1.3)$$

де L_q – довжина ділянки дороги, м;

$q(x)$ – ординати профілю ділянки дороги, м;

q_{cp} – математичне очікування ординати профілю ділянки дороги, м;

$q(x + x_s)$ – ординати профілю ділянки дороги, пересунені на крок x_s , м.

Спектральну щільність дисперсії відповідно до першого методу визначають за наступною формулою:

$$S_q(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} R_q(x_s) e^{-j\theta x_s} dx_s, \quad (1.4)$$

де $R_q(x_s)$ – кореляційна функція профілю дороги;

j – уявна одиниця;

θ – шляхова частота дороги, м^{-1} ;

x_s – крок кореляційного зв'язку, м.

При використанні безпосереднього перетворення Фур'є профілю дороги спектральну щільність дисперсії можна знайти за формулою:

$$S_q(\theta) = \lim_{L_q \rightarrow \infty} \frac{1}{L_q} \left(\left| \int_0^{L_q} q(x) e^{-j\theta x_s} dx_s \right|^2 \right) \quad (1.5)$$

Діапазон довжин хвиль нерівностей, який охоплюють, діючі в Україні, методи нормування та критерії оцінки рівності аеродромних покриттів представлений на рис. 1.7, що підтверджує доцільність використання на сьогоднішній день показника оцінки рівності аеродромних конструкцій за допомогою поштовхоміра, як основного методу, що діє в Україні [11– 13].

Щодо спектральної щільності, то вона дозволяє оцінити нерівність всього діапазону довжин хвиль на відміну від міжнародного індексу рівності IRI [18]. Тому цей показник необхідно використовувати для забезпечення рівності як аеродромних так і дорожніх покриттів при проектуванні та оцінюванні нерівності після будівництва або після капітального чи поточного ремонтів.

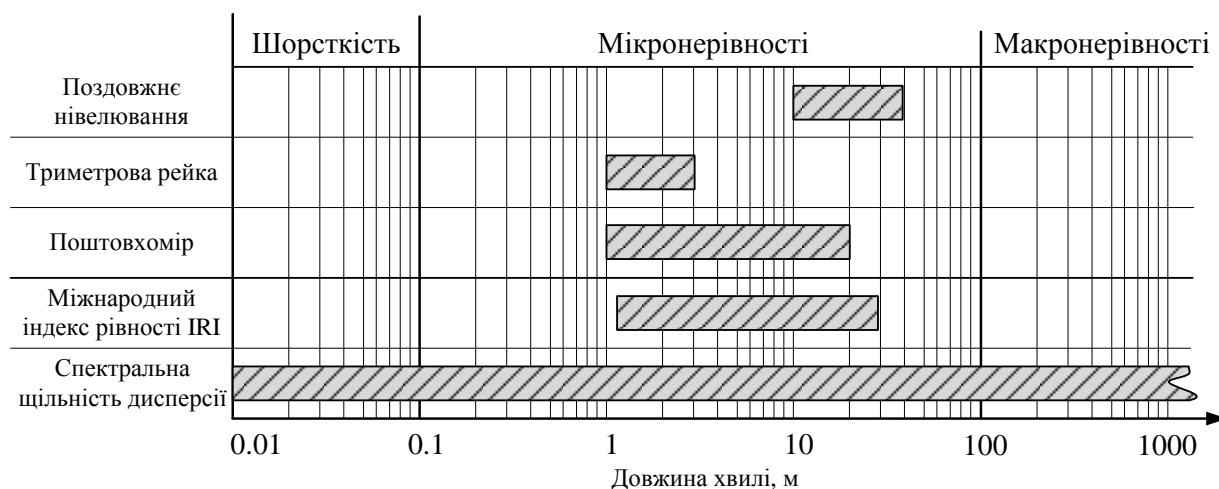


Рис. 1.7. Діапазон довжин хвиль нерівностей, який охоплюють методи вимірювання

1.3. Вимірювання ухилів

Ухили покриття аеродромних конструкцій вимірюються шляхом застосування трудомістких геодезичних методів з використанням теодоліта, тахеометра,

далекоміра, нівеліра, вимірювальної лінійки, наприклад поздовжні ухили ЗПС вимірюються геодезичним методом з кроком порядку 60 м, тобто в цьому проміжку, що дорівнює 8 плитам (розмір плити 7,5 x7,5 м²), не контролюються ні ухили, ні нерівності кожної плити [19].

Величина ухилу між двома точками розраховується наступним чином:

$$\alpha = h/D \quad (1.6)$$

де h – перевищення, яке визначається за допомогою нівеліра і рейки, яка встановлюється в точках вимірювання ухилів;

D – горизонтальне положення, яке обчислюється за виміряним перевищенням h і відстанню S між точками, виміряною рулеткою:

$$D = h^2/2S \quad (1.7)$$

Всі геодезичні прилади розбиваються на 6 груп (класів) [20]:

1. Теодоліти – прилади для вимірювання горизонтальних та вертикальних кутів (зенітних відстаней);

2. Нівеліри – прилади, що застосовуються для вимірювання перевищень (висот);

3. Віддалеміри (далекоміри) – прилади для вимірювання довжин ліній;

4. Комбіновані:

а) тахеометри – прилади для вимірювання горизонтального і вертикального кутів, довжин ліній і перевищень;

б) кіпрегелі – прилади для вимірювання вертикальних кутів, відстаней, перевищень і графічної побудови напрямків при топографічній зйомці.

5. Комплектуючі приладдя: штативи, рейки, масштабні лінійки, центрири, рівні, орієнтири – бусолі, рулетки, транспортири та інші.

6. Спеціальні геодезичні прилади: візуальні і фотоелектричні автоколіматори, гіртеодоліти (прокомпаси), лазерні прилади, прилади для вимірювання створів, для горизонтування.

Теодоліти (рис. 1.8) виготовляються трьох типів: високоточні (Т1); точні (Т2, Т5); технічні (Т15, Т30). Типовим позначенням теодоліта може бути: 3Т2КП. Це означає: 3 – третя модифікація приладу; Т – теодоліт; 2 – СКП вимірювання

горизонтального кута одним прийомом ($2''$); К – з компенсатором; П – пряме зображення зорової труби.

ГОСТ-ом на теодоліт є ГОСТ 10529-96. ГОСТ-ом допускається виготовлення більш точних теодолітів. Тому, можна застосовувати в проектах, при вимірюваннях найбільш точний теодоліт Т05, СКП якого $0,5''$. Нівеліри (рис. 1.8) відповідно до ГОСТ 10528-90 по точності поділяються на:

1. Високоточні – похибка вимірювання перевищення менше 1 мм;
2. Точні – похибка вимірювання перевищення не більше 3 мм;
3. Технічні – похибка вимірювання перевищення більше 3 мм;

Прилади для вимірювання довжин ліній можуть бути механічними та оптико-електронними. Механічні: сталеві рулетки, мірні стрічки.

Оптико-електронні: оптичні далекоміри (рис. 1.9 а), світловіддалеміри. Оптичні далекоміри виготовляються, як правило, у вигляді насадок на зорові труби або у вигляді самостійних приладів. Насадки вимірюють паралактичний кут і постійну базу. База може бути як при приладі, так і при рейці. Самостійні оптичні далекоміри характеризуються СКП в сантиметрах на кожні 100 м відстані. Наприклад, Д2 – далекомір, який дає СКП 2 см на 100 м.



Рис. 1.8. Геодезичні прилади: а) теодоліт; б) нівелір; в) лазерний нівелір

Світловідалеміри підрозділяються на 4 групи в залежності від застосування:

СГ – світловідалеміри геодезичні, що застосовуються в основних геодезичних мережах і мають діапазон вимірювання від 0,1 до 20 км.

СП – світловідалеміри, що застосовуються в прикладній геодезії. Діапазон – від 0,001 до 5 км.

СТ – світловідалеміри, що застосовується в топографічних зйомках. Діапазон – від 0,001 до 15 км. СТД – світловідалеміри топографічні по дифузному відбиттю. Діапазон – до 10 км.

Тахеометри (рис. 1.9 б) характеризуються не за точністю вимірювання, а за конструктивними ознаками, що даються в шифрі. І все таки, тахеометри Т-2, ТЕ є точні, а ТаН і ТВ – технічні. ТЕ – тахеометр електрооптичний для вимірювання відстаней до 2 км з середньоквадратичною похибкою (СКП) – 2 см, для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів відповідно 3-5". ТД – тахеометр подвійного зображення, який вимірює кути: горизонтальні – 8"; вертикальні – 12". ТаН – тахеометр номограмний, в полі зору якого ми бачимо криві, по яких визначають відстань і перевищення. ТВ – тахеометр внутрішньо базовий [21].



а)



б)

Рис. 1.9. Геодезичні прилади: а) лазерний далекомір; б) тахеометр

Кіпрегелі виготовляють згідно ГОСТ-у одного типу: КН – кіпрегель номограмний. Виготовляють один тип мензули.

В залежності від геодезичних робіт застосовують спеціальні геодезичні прилади: Автоколіматори АК-02У; АК-05; АК-1. Число означає СКП зняття відліку, У- уніфікований (дає виміри як по горизонталі так і по вертикалі). Є велика група фотоелектронних автоколіматорів, які в діапазоні декількох градусів мають точність 0,01". Фотоелектронні автоколіматори повністю автоматизовані. До спеціальних приладів також відносяться квадранти: КО-2 (квадрант оптичний; похибка дорівнює 2" визначення нахилу), КО-10, КО-60М (М – магнітний).

Великим класом спеціальних приладів є лазерні геодезичні прилади: лазерні теодоліти, лазерні візирі, лазерні нівеліри і лазерні прилади вертикального проектування. Останньою розробкою приладу для визначення місцеположення є GPS – приймачі [22, 23].

1.4. Сучасні методи вимірювання рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів

Як вже було зазначено, вимірюванню рівності та ухилів поверхонь покриття ЗПС – одному з основних показників, що визначають безпеку польотів сучасних літальних апаратів (ЛА) приділяють серйозну увагу. З цією метою в аеропортах з високою інтенсивністю польотів здійснюють моніторинг стану покриття ЗПС.

При зборі первинних даних на ряду з традиційними геодезичними методами і обладнанням використовують спеціальні автоматизовані пристрої вимірювання. До таких пристроїв відносяться: аналізатор статичного профілю TRRL, «Dipstick» (прилад для ручного вимірювання); інерційний вимірювач рівності APL (вимірювання ухилів покриття відносно бази автомобіля) [24]; інформаційний аналізатор поздовжнього профілю K.J. LAW [25].

Вимірювач профілю «Dipstick» розроблений та запатентований фірмою Face Construction Technologies, США [26], він є більш інформативним для вимірювання мікропрофілю аеродромного покриття, ніж поздовжнє нівелювання, оскільки дає можливість отримати вибірку поверхні покриття з меншим кроком.

«Dipstick» включає в себе батарейковий бортовий комп'ютер для автоматичного запису даних і виконання арифметичних дій, що необхідні для побудови профілю,

який вимірює різницю в висоті між двома точками (опорами), як правило, на відстані 305 мм один від одного [7], хоча крок висотної зйомки може змінюватись [27].

У вимірювальному блоці використовується прецизійний електронний акселерометр (вимірювач прискорень), що сприймає будь-яке прискорення, в тому числі і гравітаційне. Через це фіксація даних вимірювання перевищення виконується тільки після того, як прилад займе стаціонарне положення. Акселерометр визначає кут нахилу чутливого елемента відносно горизонту. Після цього, отримана кількісна характеристика, передається в процесор вимірювального блоку, використовуючи дані про кут нахилу і відстань між опорами, вираховується перевищення.

Виконавцю вимірювальних робіт (оператору) необхідно переміщувати «Dipstick» по заздалегідь розміченій лінії профілю, що досліджується таким чином, щоб одна з двох опор залишалась нерухомою, а інша описувала траєкторію половини круга з центром в точці де стоїть перша опора. Після завершення переміщення приладу, відбувається фіксація результатів вимірювання, вираховується перевищення і автоматична реєстрація в запам'ятовуючому пристрої портативного комп'ютера. Після звукового сигналу оператор може переміщувати прилад на наступну точку профілю.

При такому виконанні вимірювань, опорна висота є значенням, розрахованим між передньою і задньою опорними точками (рис. 1.10). Поздовжня відстань визначається шляхом множення кількості вимірювань, зроблених з відомою відстанню (кроком висотної зйомки).

За результатами порівняльного аналізу (вимірювання за допомогою оптичного нівеліра Н-05 і «Dipstick») встановлено, що похибка вимірювання різниці висот точок, що віддалені на відстані до 1 км, при вимірюванні з кроком 0,5 м складає не більше 2,0 мм, що є допустимим значенням для оцінки рівності аеродромних покриттів[28].

До переваг пристрою «Dipstick» можна віднести також можливість широкого застосування при оцінюванні рівності покриттів не тільки ЗПС, але й автомобільних доріг, а також при дослідженні та контролі будівництва або реконструкції інших штучних поверхонь, до геометрії яких висуваються високі вимоги.

До недоліків даного пристрою можна віднести високу трудомісткість; відсутність мобільності; вибірковість даних, оскільки діапазон хвиль нерівностей, що вимірюються не охоплює шорсткість; а також можливість вимірювання лише поздовжнього профілю.

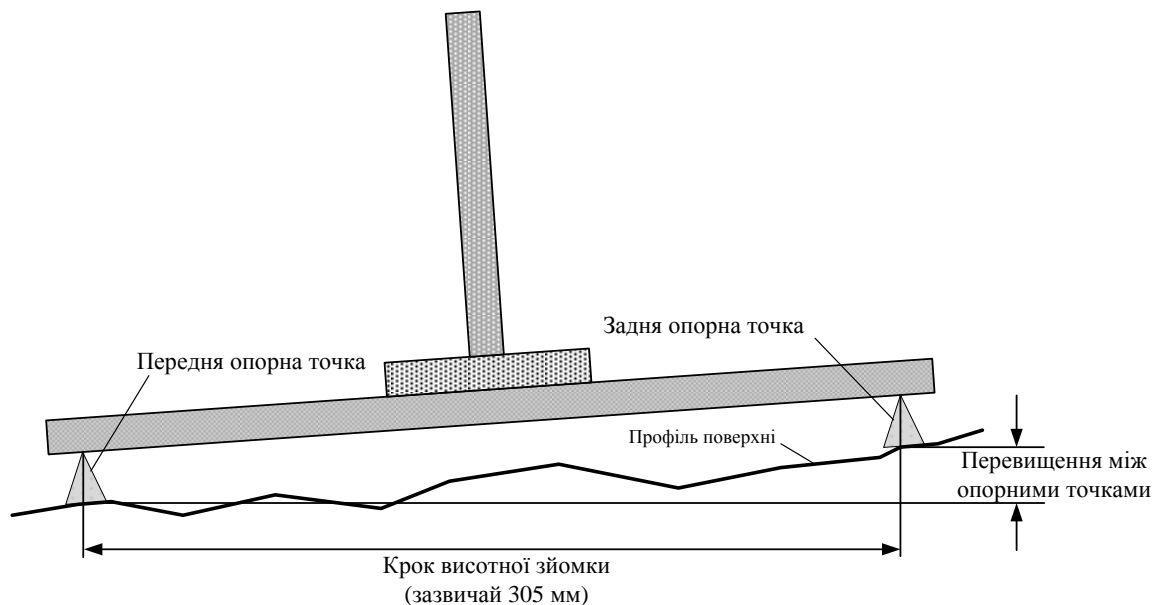


Рис. 1.10. Схема вимірювання за допомогою «Dipstick»

Перший інерційний вимірювач рівності був розроблений General Motors Research Laboratories у 1960-х роках, за допомогою якого стало можливе високошвидкісне профілювання [7]. Схема вимірювача GM-типу представлена на рис. 1.11, транспортний засіб обладнаний акселерометром, що фіксує вертикальні рухи кузова транспортного засобу та датчиком висоти, який фіксує відстань між транспортним засобом та поверхнею покриття, що досліджується.

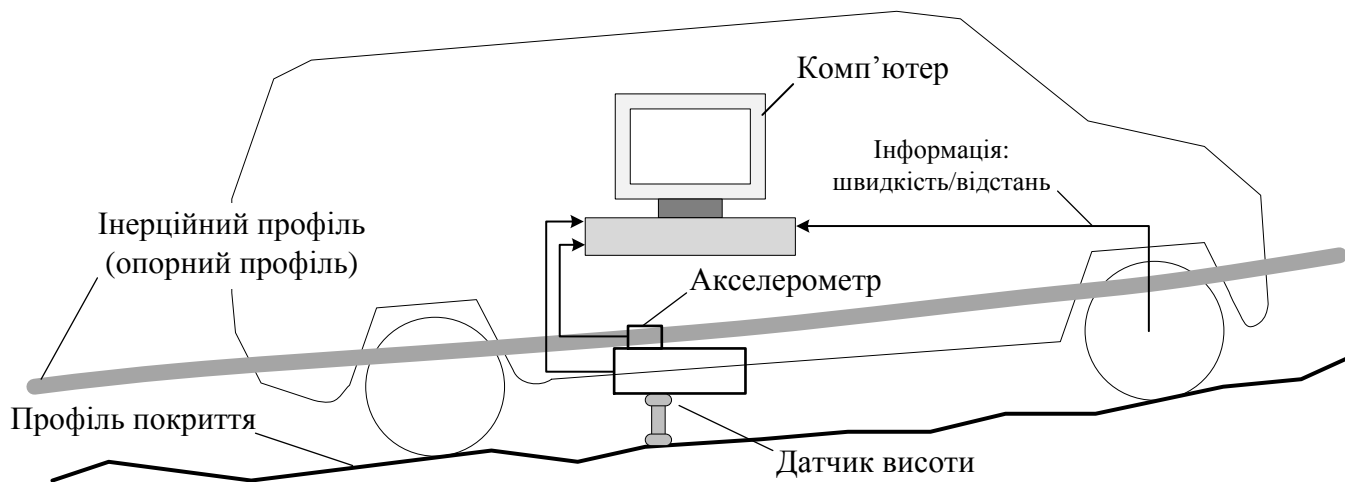


Рис. 1.11. Інерційний вимірювач рівності GM-типу

У наш час найбільш використовувана профілююча система GM-типу розроблена The South Dakota DOT у Сполучених Штатах у 1981-му [28]. Оригінальний профілометр GM-типу використовував механічне колесо, яке притискувалося до поверхні покриття, що досліджувалось. Проблема з механічним колесом в тому, що воно іноді стрибає, коли стикається з «виємкою» чи «горбиком». У результаті, отриманий профіль, описує рух колеса по повітрю, а не по поверхні [29]. Більш серйозною проблемою, з огляду користувачів, є те, що колесо може бути легко зруйнованим. У сучасних профілометрах GM-типу колеса були замінені безконтактними сенсорами, що вимірюють висоту використовуючи ультразвук, лазери або оптичні зображення.

На основі інформації, отриманої з акселерометра та датчика висоти здійснюється розрахунок виміряного профілю покриття [24]: виключаючи рухи транспортного засобу, шляхом перетворення вертикальних прискорень в миттєву висоту, отримується інерційний профіль (опорний профіль), таким чином, відстань до поверхні покриття, що досліджується, по відношенню до опорного профілю, виміряної безконтактним датчиком типу звукового сонара, або лазерного перетворювача і буде вибіркою виміряного нами профілю покриття. Поздовжня відстань (крок між вибірками профілю) визначається на основі інформації від вимірювача швидкості (спідометра) транспортного засобу [30].

Обробка даних (розрахунок профілю) для профілометрів GM-типу потребує комп'ютерів з певним типом периферії, що дозволяє проводити цифровий аналіз безконтактних датчиків висоти, та високою «потужністю», що дозволила б обробляти дані при великих швидкостях вимірювань.

Вимірювання висоти за допомогою ультразвуку вимагає, щоб був вирішений ряд проблем, які не мають нічого спільного з якістю поверхні, наприклад, вплив вітру і зміна тиску повітря. Стан поверхні також може вплинути на ультразвукову систему, якщо погано відбивається звук, тобто звук, що детектується, не повертається до датчика. Як правило, відкриті текстури і горбки з різко скошеними поверхнями – погані відбивачі, які викликають проблеми з ультразвуковими датчиками висоти.

В деяких системах для вимірювання висоти використовуються лазерні промені, використовуючи триангуляційний метод [31]. Лазерний промінь проектується прямо вниз на поверхню, що призводить до невеликої, яскравої плями світла. Пляму видно за допомогою фотодетектора, встановленого на стороні. Оптика і лінійний детектор використовуються для зв'язку світлової плями розташування з кутом, від якого визначається відстань від транспортного засобу на землю. Лазер використовує одну частоту (монохроматичне світло), і детектор може включати в себе фільтри, щоб виключити вплив навколишнього світу. Таким чином, система може бути нечутливою до змін інтенсивності світла, як до монохроматичного, так і того, що відбитий від лазера.

Одна з проблем, які можуть виникнути з лазерним датчиком – пляма, яка є проекцією лазерного променя на поверхні покриття, може перейти в тріщину або отвір, де вона не може бути помічена детектором. Ще одним недоліком використання в даній схемі лазерного датчика висоти – вплив шорсткості покриття (текстури) на вимірювання, яка додає випадкову помилку до профіля.

Більшість лазерних датчиків, які використовуються в профілюючих системах, виробляються шведською компанією під назвою Selcom. Існують конструкції безконтактних датчиків висоти, що використовують звичайні джерела світла (наприклад, не лазер) для проектування зображення на поверхні, яка досліджується, одна з таких оптичних систем розроблена K.J. Law, Inc., and Michigan DOT [30].

Поздовжній аналізатор профілю (APL) являє собою буксирований причіп, розроблений Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC) у Франції для швидкої перевірки дорожньої нерівності [32] Рама причепа виступає в якості підресореної маси, що підтримується колесом, яке рухається по покриттю, що досліджується. Інерційний профіль забезпечується горизонтальним маятником, що підтримується підшипником типу Bendix. Маятник центрується за допомогою спіральної пружини і загасає за допомогою магніту. Перетворювач зміщення розташований між інерційним маятником і заднім важелем колеса, таким чином, що його сигнал пропорційний коливанню профілю в частотному діапазоні від 0,5 до 20 Гц. Цифровий датчик відстані на колесі вимірює відстань і швидкість буксирування.

Аналізатор дозволяє визначати нерівності аеродромного та дорожнього покриття висотою ± 0.1 м і довжиною хвилі 0,2 м – 100 м, при цьому повинна забезпечуватись швидкість 72 км/год ± 10 %

Також унікальна система лазерного профілювання була розроблена TRRL у Великій Британії [33]. Суть роботи полягає в тому, що відстань до поверхні покриття, що досліджується, фіксується в трьох точках по довжині причепа.

Коли причеп рухається вперед, висотне перевищення на головному датчику уточнюється іншими датчиками, таким чином будується профіль поверхні. Така конструкція вимагає апаратні засоби, які набагато дорожчі, ніж інші конструкції. Позиції трьох лазерів повинні бути відомими з високим ступенем точності, тому в причепі повинно контролюватися теплове розширення [34].

Відома також одноосна колісна транспортна платформа – вимірювач ухилів ОКП-ВУ аеродромних покриттів, що є робототехнічною системою, яка теоретично розроблена в Московському авіаційному університеті. Подібні системи розробляються в Московському державному університеті ім. М.В. Ломоносова, в США, Японії і Канаді для завдань транспортування, охоронних і військових цілей [35].

Принципова схема ОКП-ВУ наведена на рис. 1.12. На осі колісної пари Y розміщена рама, яка може повертатися навколо цієї осі. У рамі встановлена платформа, яка має ступінь вільності навколо осі. Центр мас рами 3 знаходиться над напівосями обертання коліс, надаючи конструкції верхню маятниковість. На верхньому ярусі 5 рами розміщені: двоступеневий гіроскоп 10 з кінетичним моментом $H1$; акселерометр 9 , вісь чутливості якого розміщена паралельно осі X ; привід балансувального вантажу 7 з власним вантажем 8 , який може переміщатися уздовж поздовжньої осі X ; привідні двигуни коліс 2 ; лазерні вимірювачі висоти 12 . Двоступеневий гіроскоп 10 забезпечений датчиком кута прецесії (ДКП) і датчиком моменту (ДМ) на осі прецесії, і в невідхиленому положенні його кінетичний момент $H1$ перпендикулярний площині рами, а вісь прецесії паралельна осі X . На платформі розташовані: двоступеневий гіроскоп 11 з кінетичним моментом $H2$; мікромеханічна безплатформена інерціальна навігаційна система (БІНС); двигун стабілізації 6 ; акселерометр 16 , вісь чутливості

якого розташована паралельно осі Y . Між рамою і платформою розміщений високоточний датчик кута повороту 15 . Двоступеневий гіроскоп 11 забезпечений ДКП і ДМ на осі прецесії, і в невідхиленому положенні його кінетичний момент H_2 перпендикулярний площині платформи, а вісь прецесії паралельна напівосям обертання коліс.

Стабілізація платформи навколо поздовжньої осі X здійснюється традиційно на основі принципів гіроскопічної стабілізації, головним чином за сигналами, що надходять з ДКП гіроскопа 11 . Навколо осі колісної пари неможливо використовувати двигун стабілізації через відсутність для нього опори, тому для стабілізації рами з платформою використовується вантаж балансування, керований сигналами, що надходять з ДКП гіроскопа 10 .

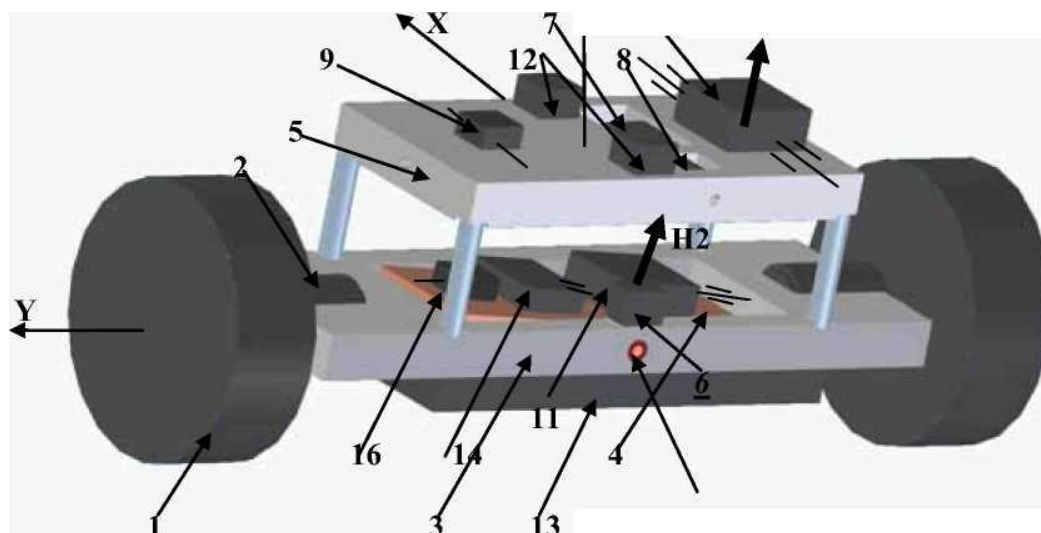


Рис. 1.12. Принципова схема ОКП-ВУ

Горизонтування рами і платформи навколо осі колісної пари і поздовжньої осі здійснюється шляхом подачі керувальних сигналів від акселерометрів на датчики моментів першого і другого гіроскопів відповідно. Місцеположення ОКП-ВУ визначається за допомогою БНС, яка коригується від високоточних акселерометрів, що виконують одночасно і функцію датчиків горизонту.

Схема вимірювань, зокрема, поздовжніх ухилів наведена на рис. 1.13. Власне вимірювання цих ухилів здійснюється за допомогою двох лазерних вимірювачів висоти 12 , рознесених уздовж поздовжньої осі рами на відстань X_d . Процесори сигналів лазерних вимірювачів розраховують їх відстань до поверхні

аеродрому X_{B1} , X_{B2} .

Для визначення подовжніх ухилів θ використовується формула:

$$\theta = \frac{X_{B1} - X_{B2}}{X_D} \quad (1.8)$$

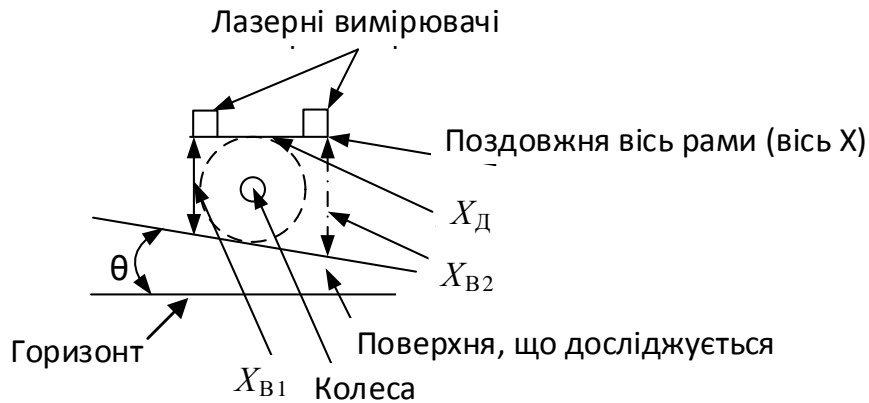


Рис. 1.13. Схема виміру подовжніх ухилів

БІНС, що визначає місцеположення ОКП-ВУ, складається з датчиків виготовлених за МЕМС-технологією (*Micro-Electro Mechanical Systems*) [36]. Мікроелектромеханічні системи, МЕМС-технології і пристрої, що поєднують в собі мікроелектронні і мікромеханічні компоненти. МЕМС-пристрої зазвичай виготовляють на кремнієвій підкладці за допомогою технології мікрообробки, аналогічно технології виготовлення однокристальних інтегральних мікросхем [37]. Типові розміри мікромеханічних елементів лежать в діапазоні від 1 мкм до 100 мкм, тоді як розміри кристала МЕМС-мікросхеми мають розміри від 20 мкм до 1 мм (рис. 1.14) [38].

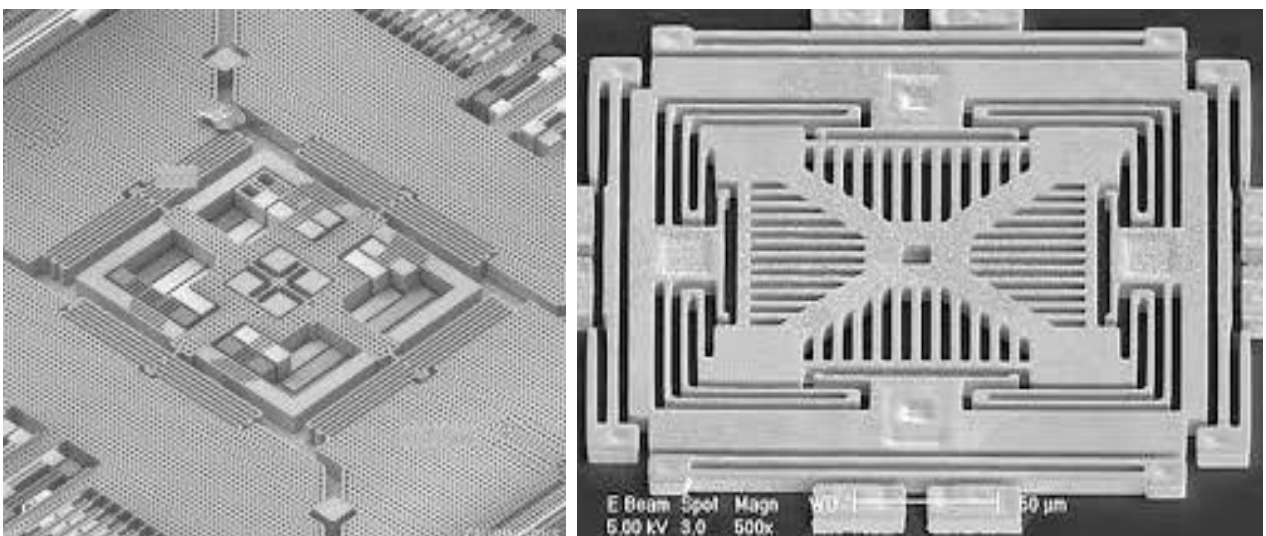


Рис. 1.14. МЕМС-структура. Фото зі збільшенням

Тобто можна сказати, що МЕМС отримуються шляхом комбінування механічних елементів, датчиків та електроніки на загальній кремнієвій основі. Всі елементи можуть бути реалізовані у вигляді єдиного виробу, при чому одразу десятками, або сотнями, як мікросхеми [39, 40].

Використання мікроелектромеханічних систем приносить буквально революційну зміну в кожному напрямку шляхом поєднання мікроелектроніки на основі кремнію з мікромеханічними технологіями, що дозволяє реалізовувати систему на одному кристалі *SoC (Systems-on-a-Chip)* [37]. Отже, МЕМС-технологія дає новий імпульс розвитку систем інерціальної навігації та інтегрованих систем, відкриваючи шлях до розробки «розумних» виробів, збільшуючи обчислювальні можливості мікродатчиків та розширюючи можливості дизайну таких систем [41, 42].

Постановка мети та 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.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНІХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ

На сьогоднішній день, задача створення нових методів оцінки параметрів покриття конструкцій аеродрому та дорожніх покриттів є актуальною, тому на наступному кроці даного дисертаційного дослідження розглянемо розроблені мною методи оцінки ухилів та рівності: спектральний метод оцінки ухилів і рівності та індикаторний метод контролю ухилів. А також оцінимо точнісні характеристик кожного методу.

Спектральний метод являє собою набутий подальшого розвитку метод спектральної щільності дисперсії, розглянутий вище. Даний метод найбільш доцільно використовувати для оцінки ухилів та рівності поздовжнього профілю поверхонь, що досліджується. За допомогою розробленого методу, на основі розробленої математичної моделі профілю поверхні, представлені як сукупність гармонічних коливань, проведено їх розподіл на відповідні частотні смуги, що дає можливість дослідити їх характеристики не тільки за довжиною хвиль, а й за амплітудою нерівностей. Також, розроблений мною спектральний метод дає можливість відновити профіль поверхні ітеративним шляхом загалом, та його частотних компонентів зокрема (окремо ухили, та окремо нерівності).

За допомогою розробленої програми імітаційного моделювання проведено оцінку точності побудови відтвореного (виміряного) профілю поверхні, що досліджується, ітеративним методом. Також запропоновано метод підвищення точності відтворення профілю поверхні, що досліджується.

Враховуючи існуючі в державних будівельних нормах вимоги, зокрема до поперечних ухилів, мною розроблено індикаторний метод контролю ухилів. Даний метод оцінки ухилів найбільш доцільно використовувати для контролю поперечних ухилів саме тоді, коли потрібно прийняти рішення «норма» чи «не норма». Для даного методу запропоновано модель розрахунку достовірності контролю – ймовірності прийняття правильного рішення за результатами контролю.

2.1. Спектральний метод оцінки ухилів та рівності

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. Відповідно до даних, представлених в [3, 4], що розглянуті в попередньому розділі, для оцінки рівності профілю покриттів, нерівності умовно поділяють на три групи: шорсткість – нерівності з довжиною хвилі до 10 см; мікронерівності (шорсткість) – від 10 см до 100 м; макронерівності – більше 100 м, макронерівності формують ухил покриття.

Отже, ідеалізувавши профіль поверхні що досліджується опишемо його наступною формулою [43]:

$$\hat{h}(x) = \sum_{k=0}^K \left(a_k \cos \frac{\pi k x}{K} + b_k \sin \frac{\pi k x}{K} \right). \quad (2.1)$$

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:

$$H_k = \sum_{k=0}^{K-1} h(k\Delta x) \left(\cos \frac{2\pi k x}{K} - j \sin \frac{2\pi k x}{K} \right). \quad (2.2)$$

Значення отримані в (1.2), 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 (2.1), використовуючи доданки з коефіцієнтами утвореними з множини перших значень H_k , індекси яких задовольняють нерівність $\frac{100 \text{ м}}{\Delta x} < k$:

$$h_{\text{макро.}}(x) = \sum_{z \in \left\{ \frac{K \cdot \Delta x}{k} > 100, k \in [0, \dots, K] \right\}} \left(a_z \cos \frac{\pi z x}{K} + b_z \sin \frac{\pi z x}{K} \right). \quad (2.3)$$

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.

Як було зазначено в попередньому розділі, спектральний метод оцінки рівності профілю покриття поверхні що досліджується дає можливість в комплексі оцінити не тільки частотну складову нерівності, а й амплітудну. 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 $\frac{K \cdot \Delta x}{k} < 100$):

$$h_{\text{мікро.}}(x) = \sum_{z \in \left\{ \frac{K \cdot \Delta x}{k} < 100, k \in [0, \dots, K] \right\}} \left(a_z \cos \frac{\pi z x}{K} + b_z \sin \frac{\pi z x}{K} \right). \quad (2.4)$$

Загальну оцінку нерівностей поверхні можемо оцінити за допомогою показника IRI, отриманого шляхом моделювання руху лінійної моделі чверті автомобіля, що рухається з швидкістю 80 км/год по поверхні, що досліджується. Рівність визначається відношенням сумарного переміщення підвіски транспортного засобу до пройденої відстані за час вимірювання. У кожному положенні колеса модель чверті автомобіля веде себе як підресорена маса (маса кузова та рами з укріпленими на ній двигуном, механізмами трансмісії і керування), котра знаходиться на підвісці приєднаної пружними зв'язками та демпферами до непідресореної маси (гальма, колеса з мостами). Колесо взаємодіє з поверхнею дорожнього покриття за допомогою шини, яка діє як пружина. Нерівності поверхні дорожніх покриттів впливають на автомобіль та приводять до деформації шини, виникнення удару в підвісці автомобіля та вібрації у вертикальному напрямку, як підресореної, так і непідресореної мас [16].

Для моделі чверті автомобіля (рис. 2.1), запишемо систему диференціальних рівнянь, що описують основні динамічні характеристики:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{Z}_1 = k_1 (Z_2 - Z_1) + c_1 (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1), \\ m_2 \ddot{Z}_2 = k_2 (h_{\text{нерівн.}} - Z_2) - k_2 (Z_2 - Z_1) - c_1 (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1), \end{cases} \quad (2.5)$$

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;

$h_{\text{нерівн.}}$ – зміна висоти профілю поверхні, що досліджується, м.

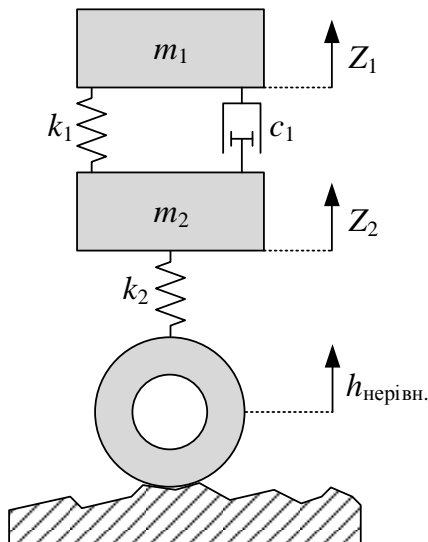


Рис. 2.1. Модель чверті автомобіля

Враховуючи, що всі початкові умови рівні нулю, застосувавши перетворення Лапласа, отримуємо:

$$Z_1(s)(m_1s^2 + c_1s + k_1) = Z_2(s)(c_1s + k_1); \quad (2.6)$$

$$Z_2(s) = (m_2s^2 + k_1 + k_2 + c_1s) = h_{\text{нерівн.}}(s)k_2 + Z_1(s)(c_1s + k_1). \quad (2.7)$$

З системи рівнянь (2.5) можемо визначити дві передавальні функції, в залежності від того, яке саме переміщення (Z_1 або Z_2) ми розглядамо як вихід системи. З рівняння (2.6) отримуємо:

$$Z_2(s) = Z_1(s) \frac{m_1s^2 + c_1s + k_1}{c_1s + k_1}. \quad (2.8)$$

Замінивши (2.8) в (2.7) та провівши ряд скорочень, отримуємо першу передавальну функцію:

$$H_1(s) = \frac{Z_1(s)}{h_{\text{нерівн.}}(s)} = \frac{k_2c_1s + k_1k_2}{m_1m_2s^4 + (m_1c_1 + m_2c_1)s^3 + (m_1k_1 + m_1k_2 + k_1m_2)s^2 + c_1k_2s + k_1k_2}. \quad (2.9)$$

Розглянемо переміщення маси колеса Z_2 як вихідну силу системи. З рівняння (2.6) отримуємо $Z_1(s)$:

$$Z_1(s) = Z_2(s) \frac{c_1s + k_1}{m_1s^2 + c_1s + k_1}. \quad (2.10)$$

Замінивши (2.10) в (2.7) та провівши необхідні скорочення, отримуємо наступну передавальну функцію:

$$H_2(s) = \frac{Z_2(s)}{h_{\text{нерівн.}}(s)} = \frac{m_1 k_2 s^2 + c_1 k_2 s + k_1 k_2}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 c_1 + m_2 c_1) s^3 + (m_1 k_1 + m_1 k_2 + k_1 m_2) s^2 + c_1 k_2 s + k_1 k_2}, \quad (2.11)$$

де переміщення чверті кузова автомобіля $Z_2(t)$ є вихідним сигналом, а дорожні нерівності $h_{\text{нерівн.}}(t)$ – вхідним.

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 2.1.

Таблиця 2.1

Дані «золотого автомобіля»	
$c = \frac{c_1}{m_1} = 6,0$	$k_1 = \frac{k_1}{m_1} = 653$
$\mu = \frac{m_2}{m_1} = 0,15$	$k_2 = \frac{k_2}{m_1} = 63,3$

Використовуючи передавальні функції (2.9) та (2.11), проведемо моделювання переміщення кузова чверті автомобіля та переміщення колеса, за умови, що воно рухається поверхнею, нерівність профілю якої представлений синусоїдою з амплітудою 10 см та періодом 35 м. Моделювання даної динамічної системи було проведено за допомогою програмного забезпечення Simulink, результати якого представлені на рис. 2.2.

Коефіцієнт IRI визначається як накопичення імітованого руху між підресорною та непідресорною масами в моделі чверті автомобіля, нормалізовані за довжиною профілю, L :

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2| dt, \quad (2.12)$$

де x – це довжина профілю, що досліджується;

V – змодельована швидкість, що становить 80 км/год для IRI (швидкість для розрахунків має бути представлена в одиницях довжини/секунду, тобто 80 км/год \approx 22,2 м/с).

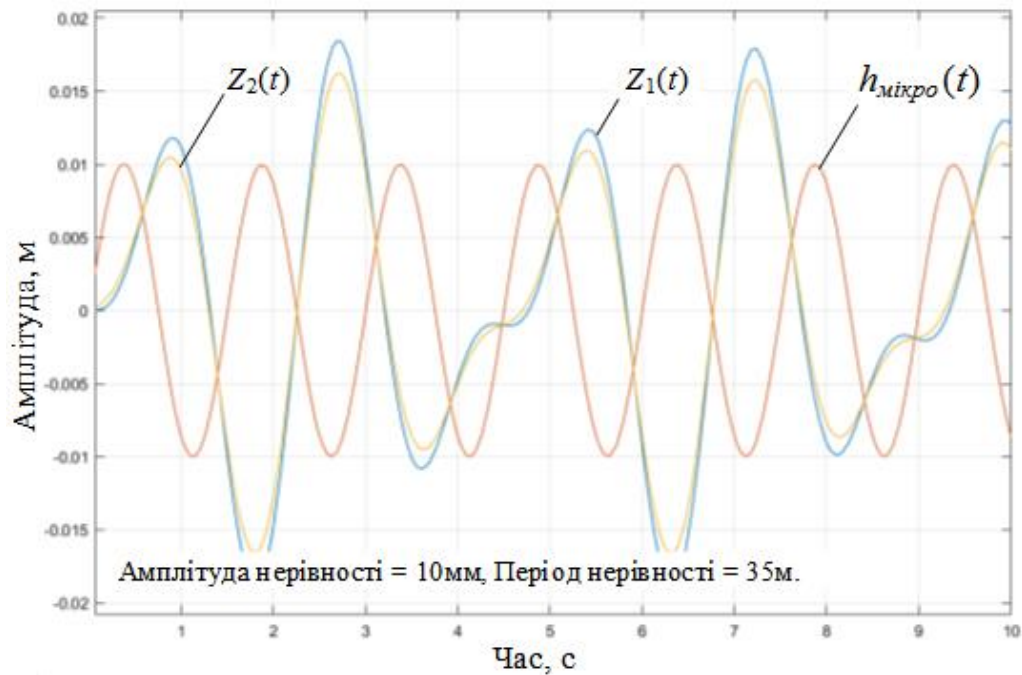


Рис. 2.2. Результат моделювання переміщення кузова чверті автомобіля та переміщення колеса

Для можливості подальшої оцінки параметрів покриття, що досліджується, необхідно мати профіль її поверхні. Ці дані можуть бути отримані шляхом проведення експериментальних вимірів або за допомогою математичного моделювання. Враховуючи те, що вимірювання реального профілю поверхні дорожніх та аеродромних покриттів є достатньо трудомістким способом отримання даних і не дає можливості оцінити точнісні характеристики через відсутність абсолютних значень (оскільки параметри профілю виміряні з деяким значенням помилки), тому актуальною є задача створення математичної моделі, яка б дозволяла отримувати профіль покриття, що досліджується максимально наближеного до реального.

2.1.1. Математична модель профілю поверхні

Розроблена математична модель поздовжнього профілю поверхні, що досліджується, являє собою сукупність нерівностей, змодельованих відповідно до класифікації за довжинами хвиль, з урахуванням норм ІКАО щодо максимальних значень ухилів поверхонь конструкцій аеродрому в залежності від кодового позначення аеродрому та вимог державних будівельних норм. Отже, профіль

поверхні як аеродромної конструкції, так і дорожнього покриття може бути ідеалізований і описаний наступним рівнянням [45]:

$$P(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x), \quad (2.13)$$

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:

$$f_1(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}x + \varphi_1\right), \quad (2.14)$$

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.

На рис. 2.3 представлено результат моделювання складової ухилу досліджуваної поверхні на відрізку довжиною 2000 м. Як видно з рисунка, нерівності мають величину періоду більше 100 м і, враховуючи амплітуду коливань, на досліджуваному відрізку величина ухилу не перевищує 2%.

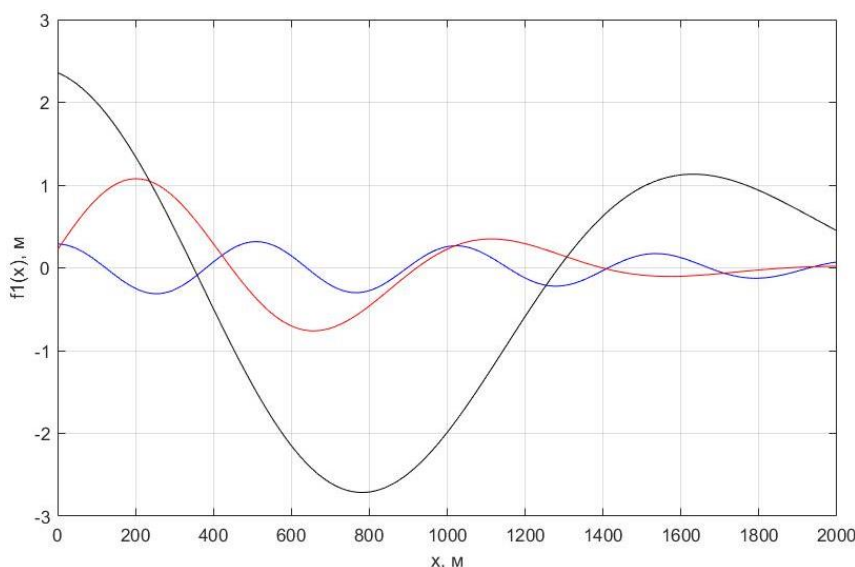


Рис. 2.3. Складова ухилу поверхні

Дані нерівності формують макропрофіль (поздовжній профіль) поверхні, впливають на динаміку, режими руху і роботу двигунів, не викликають низькочастотні та високочастотні коливання.

Складову нерівностей поверхні $f_2(x)$ представимо наступним виразом:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{(x-m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_i}x + \varphi_i\right), \quad (2.15)$$

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

σ_i^2 – випадкова величина;

φ_i – випадкова початкова фаза ($0..2\pi$);

T_i – випадкова величина періоду;

N – кількість гармонік.

Враховуючи те, що довжини хвиль нерівностей лежать в діапазоні від 10 см до 100 м, результат моделювання представлено на відрізку довжиною 200 м (рис. 2.4). Дані нерівності формують мікропрофіль поверхні і викликають як низькочастотні, так і високочастотні коливання, що безпосередньо впливає на рівень комфорту пасажирів (шум, вібрації).

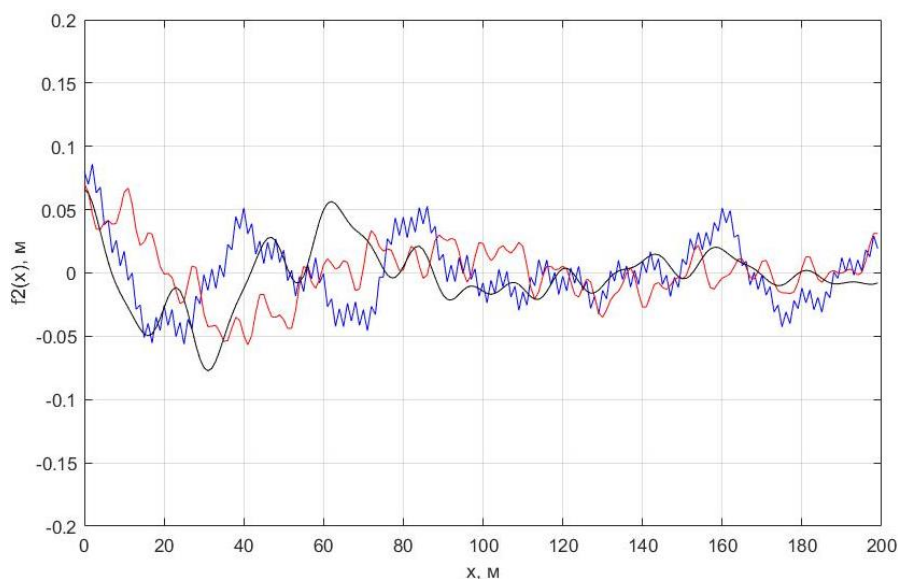


Рис. 2.4. Складові нерівностей поверхні

Аналогічним чином представимо складову шорсткості поверхні $f_3(x)$:

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{(x-m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_i}x + \varphi_i\right), \quad (2.16)$$

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

σ_i^2 – випадкова величина;

φ_i – випадкова початкова фаза ($0..2\pi$);

T_i – випадкова величина періоду;

N – кількість гармонік.

Оскільки шорсткість – це сукупність нерівностей з довжиною хвилі до 10 см, результат моделювання представимо на відрізку профілю досліджуваної поверхні довжиною 1 м (рис. 2.5).

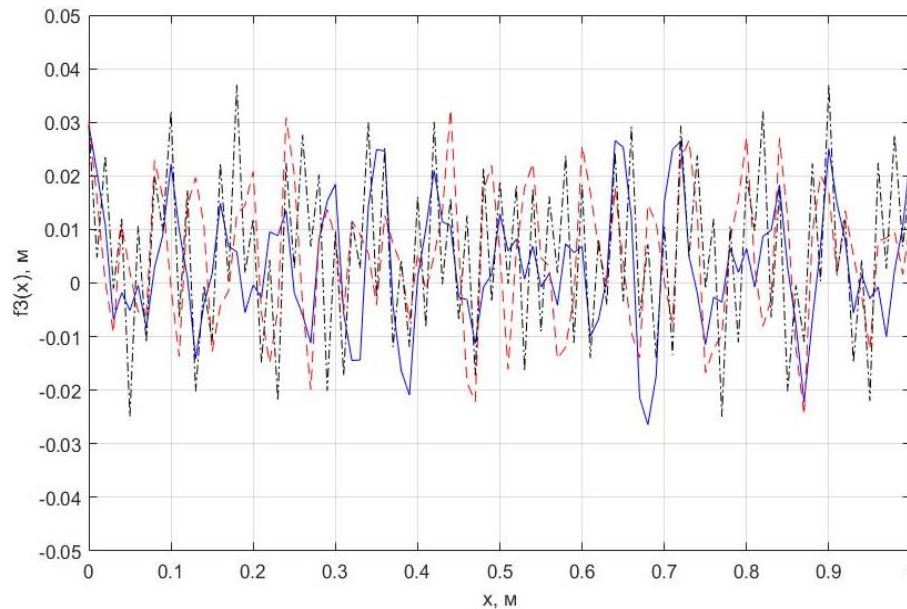


Рис. 2.5. Складова шорсткості поверхні

Традиційно прийнято вважати, що рівність охоплює мікронерівності покриттів. Але не все однозначно з впливом шорсткості на показник загальної нерівності, тобто з однієї сторони вона має забезпечувати коефіцієнт зчеплення, бути як можна меншою, для формування найбільшої площі контакту протектора шини з поверхнею аеродромного покриття, з іншого боку – досить грубою, щоб сприяти швидкому відводу води з під площі контакту. Необхідно також враховувати, що збільшення шорсткості веде до зростання опору кочення, зношування шин.

Враховуючи вплив різних довжин хвиль нерівностей досліджуваних поверхонь на рівень комфорту пасажирів (безпосередніх користувачів транспортних послуг), а також, в першу чергу, рівня їхньої безпеки, оцінку якості поверхонь як конструкцій аеродрому, так і автомобільних доріг потрібно проводити, враховуючи весь діапазон хвиль нерівностей.

Виходячи з формули (2.13), отримуємо загальну модель профілю досліджуваної поверхні, представлену на рис.2.6.

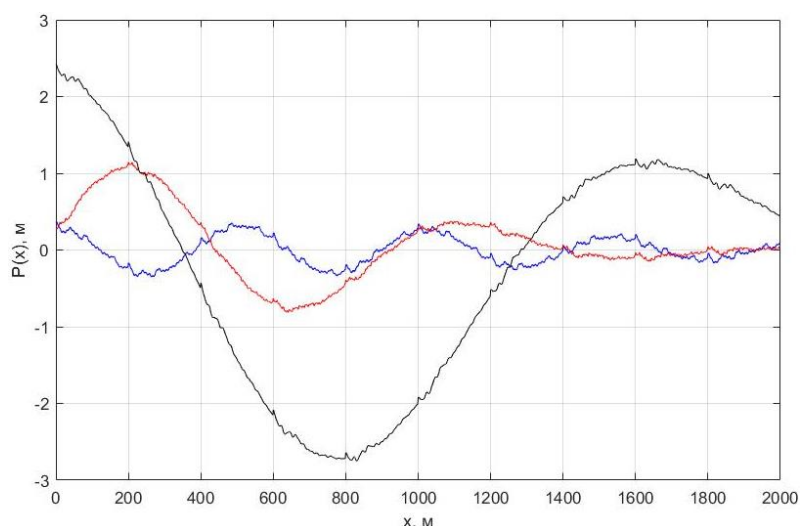


Рис. 2.6. Модель профілю поверхні

За допомогою створеної математичної моделі профілю покриття, що досліджується, маємо можливість дослідити розроблені методи оцінки його параметрів, а розклавши в спектр вимірний профіль, представлений, як сукупність гармонічних коливань (рис. 2.7), – дослідити кожну його частотну складову окремо. При зворотньому перетворенні Фур'є, кожна i -та частотна складова, що розподілена на короткому проміжку ділянки профілю поверхні, що досліджується, може бути локалізована та ідентифікована як вибоїна і не врахована при оцінці коефіцієнту рівності.

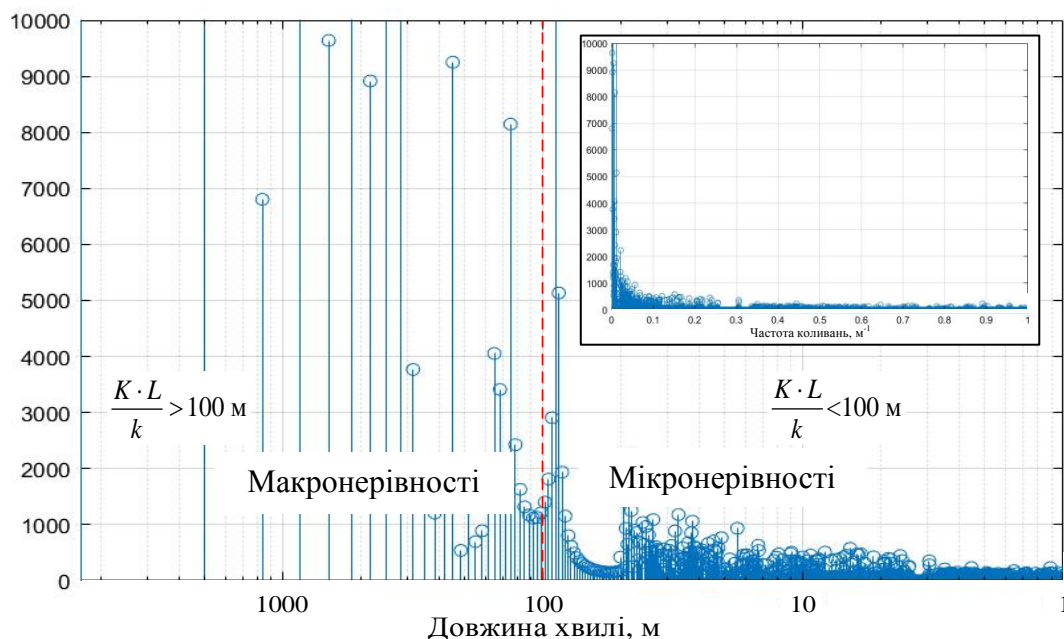


Рис. 2.7. Спектр профілю змодельованої поверхні

Профіль поверхні покриття, що досліджується, відновлений з діапазону частотних складових мікронерівностей (без врахування складових локальних

нерівностей) використовуватиметься для подальшого розрахунку коефіцієнту рівності IRI шляхом моделювання руху моделі чверті автомобіля. Як приклад, мною було проведено розрахунок IRI «елементарного» профілю поверхні представленого синусоїдою з амплітуда = 20 мм, довжина нерівності = 60 м (рис. 2.8), результати розрахунку IRI збігається з результатом, представленими в [7].

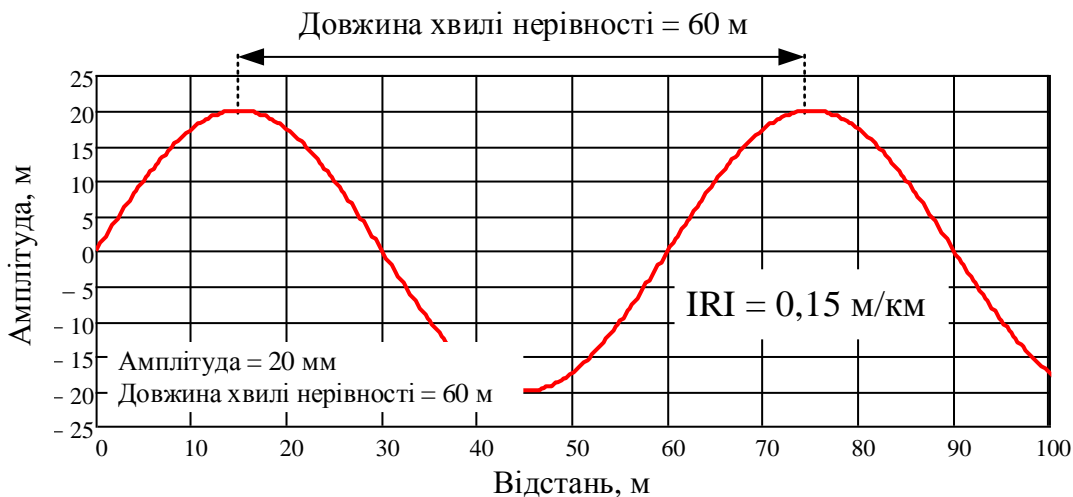


Рис. 2.8. IRI «елементарного» профілю поверхні представленого синусоїдою

Допустимі значення рівності проїзної частини доріг, що здаються в експлуатацію, наведено в таблиці 2.2. [9], в таблиці 2.3 [17]. наведені значення IRI для ЗПС, що застосовуються в Україні.

Таблиця 2.2

Показники рівності автомобільних доріг різних категорій

Категорія дороги	Тип покриття	Допустимі значення рівності, см/км
I - II	Асфальтобетон	0,8
	Цементобетон	1
III	Асфальтобетон	11
	Цементобетон	1.3
IV-V	Щебенева, оброблене зв'язниками	2
	Щебенева необроблене, бруківка	2,5

Кількісно рівність покриття оцінюють коефіцієнтом рівності:

$$K_p = \frac{S_\phi}{S_{\text{доп.}}}, \quad (2.17)$$

де S_ϕ — фактичне значення рівності покриття за поштовхоміром, м/км;

$S_{\text{доп.}}$ — допустиме значення рівності покриття, м/км.

При значення $K_p < 0,5$ рівність покриття дороги відмінна і ремонтні заходи, спрямовані на поліпшення рівності, на найближчий період не плануються. При $K_p = 0,5 \dots 1,0$ рівність добра і ремонтні роботи можуть плануватися на кінець розрахункового періоду, при $K_p = 1 \dots 1,6$ рівність задовільна, ремонтні роботи плануються на найближчі 1-2 роки; при $K_p > 1,6$ рівність покриття незадовільна, потрібен терміновий ремонт.

Таблиця 2.3

Значення IRI для ЗПС, що застосовуються в Україні.

IRI, м/км	Характеристика
1,0 – 3,0	Відмінно
3,0 – 5,0	Добре
5,0 – 7,0	Задовільно
7,0 – 10	Критично
10 – 20	Незадовільно

Але, оскільки, в реальному житті ми можемо, як зазначено вище, відтворити профіль поверхні з похибками, тому надалі розглянемо ітеративний метод відновлення профілю поверхні та оцінимо його точнісні характеристики за допомогою розробленої імітаційної моделі [44, 45].

Під імітаційним моделюванням будемо розуміти процес проведення експериментів з комп'ютерною моделлю замість проведення експериментів з реальною системою. В основу роботи програми імітаційного моделювання покладено чисельний метод розв'язання математичних задач за допомогою моделювання випадкових величин, оскільки побудова аналітичних залежностей є досить складним процесом.

2.1.2. Ітеративний метод відновлення профілю поверхні на базі вимірних кутів просторової орієнтації

Профіль поверхні що досліджується може бути отриманий з множини вимірних кутів між горизонтом та поверхнею, шляхом ітеративного розрахунку з врахуванням кроку вимірювання (рис. 2.9), і може бути розрахований за наступною формулою [43]:

$$h_i = h_{i-1} + L \cdot \tan \alpha_i, \quad (2.18)$$

де h_i – висота профілю в кожній точці;

L – крок вимірювання, дискретизація вимірювань;

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

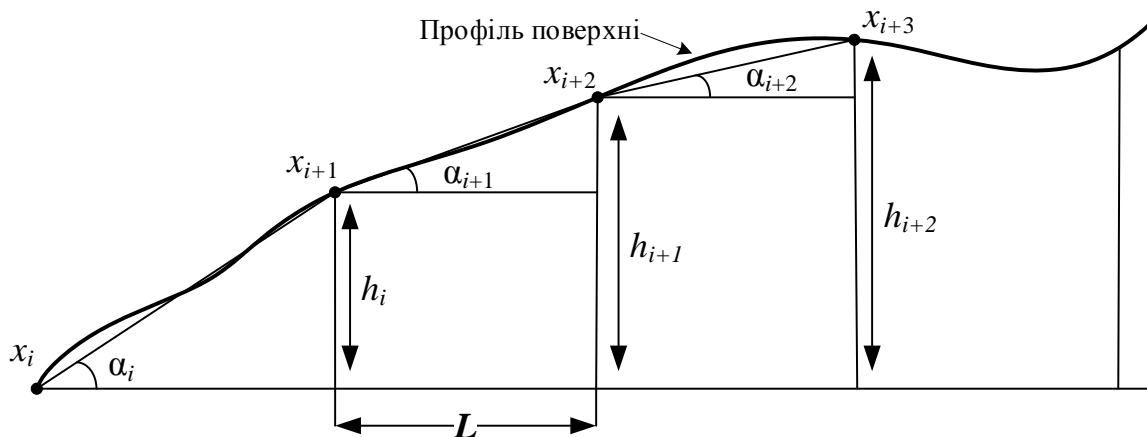


Рис. 2.9. Ітеративний метод відновлення профілю поверхні

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:

$$\alpha = \alpha_{\text{іст.}} + \varepsilon, \quad (2.19)$$

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

Отже, оцінимо точнісні характеристики ітеративного методу побудови профілю поверхні, що досліджується. Дослідження було проведено за допомогою розробленої імітаційної моделі, в основу роботи якої покладено чисельний метод розв'язання математичних задач за допомогою моделювання випадкових величин.

У багатьох дослідженнях із діагностики приймається (і це підтверджується практикою), що значення випадкової складової похибки вимірювання ε розподілене за нормальним законом [46], тобто щільність розподілу:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right]. \quad (2.20)$$

За допомогою створеної математичної моделі профілю поверхні, розглянутої вище, ми отримуємо сукупність точок профілю поверхні – істинна поверхня. Враховуючи похибку вимірювання ε (яка розподілена за нормальним законом з

певним значенням σ_ε), будемо ітеративним методом виміряну поверхню, враховуючи (2.18) і (2.19),

$$h_i = h_{i-1} + L \cdot \tan \alpha_i. \quad (2.21)$$

Визначивши розходження між вимірним профілем поверхні, що досліджується та профілем, побудованим шляхом моделювання (істинним), отримуємо значення абсолютної похибки вимірювання. Використовуючи метод Монте-Карло (ММК) [47], проводимо моделювання відтворення профілю поверхні X , (кратність яких $M = 10000$) отримуємо статистику розподілу СКВ помилки якого $\sigma_{\text{проф.}i}$ відповідає кожному i -ому вимірюванню. Результат залежності $\sigma_{\text{проф.}}$ від довжини профілю поверхні, що досліджується представлено на рис 2.10 [48].

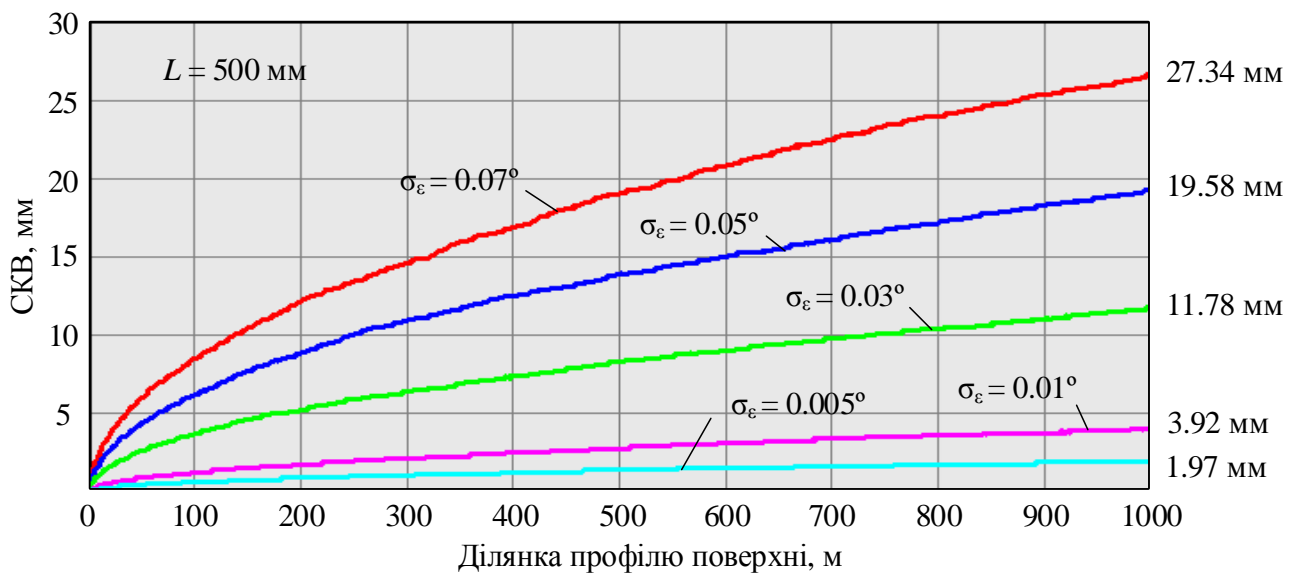


Рис. 2.10. Залежність СКВ помилки відтвореного профілю від його довжини, $\sigma_{\text{проф.}} = f(X, \sigma_{\varepsilon i})$

З результатів моделювання, представлених на рис. 2.10, видно що зі збільшенням довжини профілю поверхні, що досліджується, збільшується похибка вимірювання профілю, це цілком логічно, оскільки в процесі вимірювання відбувається постійне накопичення помилки, аналогічно процесу накопичення помилок при інтегруванні. Отже, при відтворенні профілю поверхні з кроком 500 мм та середньоквадратичному відхиленні похибки вимірювання $\sigma_\varepsilon = 0,03^\circ$, на відрізку профілю, що досліджується, довжиною 1000 м, СКВ відтворення профілю ($\sigma_{\text{проф.}}$) становить 11,78 мм, результати моделювання наведено в таблиці 2.4.

СКВ помилки вимірювання профілю поверхні, мм

Довжина профілю, м	СКВ помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується ($\sigma_{\text{проф.}}$), мм				
	$\sigma_{\varepsilon} = 0,005^{\circ}$	$\sigma_{\varepsilon} = 0,01^{\circ}$	$\sigma_{\varepsilon} = 0,03^{\circ}$	$\sigma_{\varepsilon} = 0,05^{\circ}$	$\sigma_{\varepsilon} = 0,07^{\circ}$
100	0,592	1,24	3,65	6,11	8,71
200	0,84	1,74	5,3	8,68	12,18
300	1,04	2,12	6,56	10,76	15,12
400	1,2	2,49	7,59	12,43	17,17
500	1,34	2,76	8,45	14,09	19,07
600	1,47	3,05	9,25	15,5	21,31
700	1,59	3,26	9,77	16,81	23,11
800	1,73	3,47	10,34	18,01	24,46
900	1,84	3,69	11	18,97	26,05
1000	1,97	3,92	11,78	19,58	27,34

Далі розглянемо вплив кроку вимірювання на значення середньоквадратичного відхилення помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується $\sigma_{\text{проф.}}(X, L_i)$, результат моделювання представлено на рис. 2.11 у вигляді 4-ох графіків: а) при $\sigma_{\varepsilon} = 0,01^{\circ}$, б) при $\sigma_{\varepsilon} = 0,03^{\circ}$, в) $\sigma_{\varepsilon} = 0,05^{\circ}$, г) при $\sigma_{\varepsilon} = 0,07^{\circ}$. Очевидно прослідковується зменшення значення $\sigma_{\text{проф.}}$ при зменшенні кроку вимірювання, а отже й збільшення точності вимірювання.

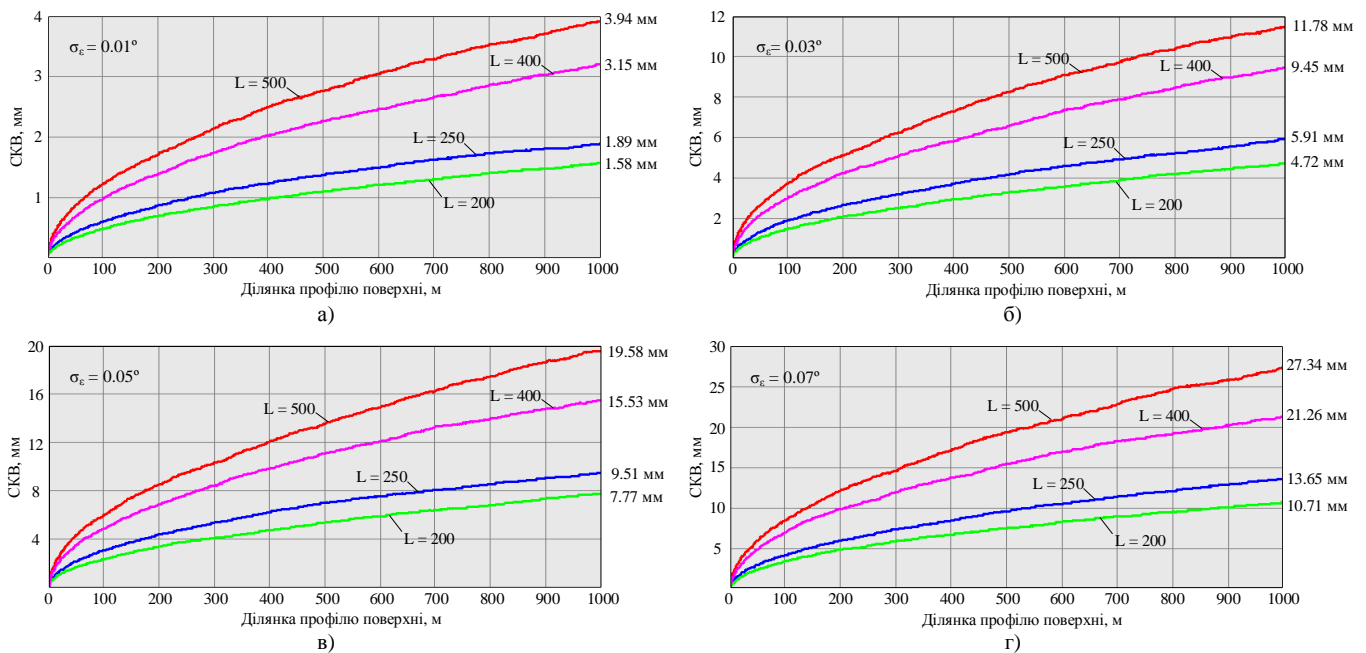


Рис. 2.11. Залежність $\sigma_{\text{проф.}}(X, L_i)$ при
а) $\sigma_{\varepsilon} = 0,01^{\circ}$; б) $\sigma_{\varepsilon} = 0,03^{\circ}$; в) $\sigma_{\varepsilon} = 0,05^{\circ}$; г) $\sigma_{\varepsilon} = 0,07^{\circ}$

Зменшення кроку вимірювання дозволяє проводити оцінку рівностей профілю в більш широкому частотному діапазоні, оскільки дозволяє проводити вимірювання нерівностей з меншим значенням періоду. За результатами моделювання можна зробити висновок щодо зменшення СКВ помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується пропорційно зменшенню кроку вимірювання (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5

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 вимірюванн, 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

2.1.3. Метод підвищення точності вимірювання профілю

На точність визначення профілю поверхні суттєво впливає шум, який присутній у вимірних значеннях кутів ухилів. Для підвищення точності відтворення профілю поверхні доцільно виконати фільтрацію вимірних даних. Для рішення цієї задачі пропонується застосувати алгоритм, в якому спочатку виконується фільтрація вздовж масиву вимірних значень з ліва на право (forward) і справа на ліво (backward), а потім об'єднання результатів, що дозволяє отримати інтерполяційні оцінки в кожній точці, враховуючи всі наявні вимірювання [49, 50].

Задача оцінювання кутів ухилів і висоти профілю поверхні в кожній точці на основі доступних вимірювань може бути вирішена шляхом застосування алгоритму фільтрації Калмана [51]. При вирішенні задачі фільтрації в напрямку зліва направо введемо вектор стану системи [49, 52]:

$$Z_i^f = \left| \begin{array}{c} h_i \\ \tan(\alpha_i) \end{array} \right|. \quad (2.22)$$

Виходячи з (2.18) і (2.19) рівняння стану системи прийме наступний вигляд [53, 54]:

$$Z_i^f = F \cdot Z_{i-1}^f + v, \quad (2.23)$$

$$\text{де } F = \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad Z_{i-1}^f = \begin{vmatrix} h_{i-1} \\ \tan(\alpha_{i-1}) \end{vmatrix}; \quad v = \begin{vmatrix} \omega_h \\ \omega_\alpha \end{vmatrix}.$$

Рівняння спостереження згідно (2.19) прийме наступний вигляд:

$$y_i = \arctan(\tan(\alpha_i)) + v, \quad (2.24)$$

де y_i - спостереження.

Виходячи з рівнянь (2.23) і (2.24), алгоритм Калманівської фільтрації описується наступними виразами:

$$Z_i^{*f} = F \cdot Z_{i-1}^f; \quad (2.25)$$

$$P_i^{*f} = F \cdot P_{i-1}^f F^T + Q; \quad (2.26)$$

$$K_i^f = P_i^{*f} \cdot H_i^T / H_i \cdot P_i^{*f} \cdot H_i^T + \sigma_v^2; \quad (2.27)$$

$$Z_i^f = Z_i^{*f} + K_i^f \cdot (y_i - \arctan(\tan(\alpha_i^*))); \quad (2.28)$$

$$P_i^f = (I - K_i^f H_i) P_i^{*f}, \quad (2.29)$$

$$\text{де } H = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{1+\tan(\alpha_i^*)^2} \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega_h}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\omega_\alpha}^2 \end{bmatrix};$$

Z_i^{*f} і Z_i^f – прогноз і оцінка вектору стану;

P_i^{*f} і P_i^f – кореляційні матриці помилок прогнозу і оцінки;

K_i^f – вектор коефіцієнтів підсилення.

Рішення задачі фільтрації справа наліво виконується аналогічно, при цьому на кожній ітерації розраховується прогноз і оцінка Z_i^{*b} і Z_i^b та кореляційні матриці помилок прогнозу і оцінки P_i^{*b} і P_i^b . Згідно методики, наведеної в [49], алгоритм об'єднання результатів фільтрації, отриманих у протилежних напрямках в точці i , описується виразами:

$$\tilde{P}_i = P_i^{*f} - \frac{P_i^{*f^2}}{P_i^{*b} - P_i^{*f^2}}; \quad (2.30)$$

$$\tilde{Z}_i = Z_i^b + \frac{\tilde{P}_i}{P_i^{*f}} \cdot (Z_i^{*f} - Z_i^b), \quad (2.31)$$

де, індекс f – фільтрація зліва на право;

індекс b – фільтрація справа на ліво;

P^* – дисперсія прогнозу стану;

z^* – прогноз стану;

P – дисперсія оцінки стану;

z – оцінка стану;

\tilde{P} – результуюча дисперсія;

\tilde{z} – результуючий стан.

Результати оцінки СКВ помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується отримані з рівнянь (2.30) і (2.31) представлені на рис 2.12 [55].

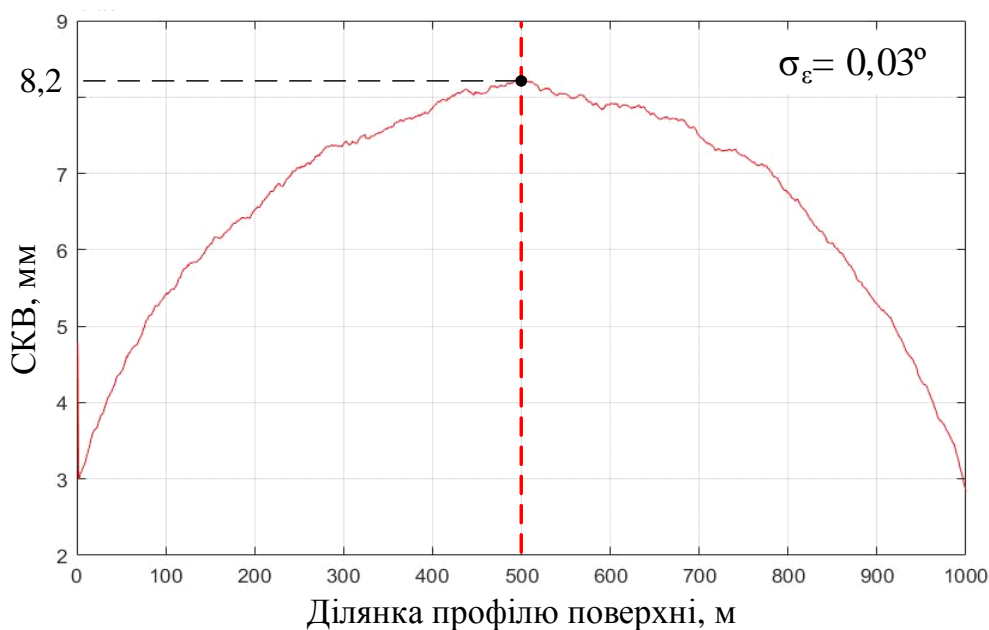


Рис. 2.12. Залежність СКВ помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується від його довжини (з фільтрацією вимірювань)

Як видно з графіка (рис. 2.12), найбільше значення $\sigma_{\text{проф.}}$ буде знаходитись по середині ділянки профілю, що досліджується, порівнявши їх з даними, представленими в таблиці 2.4, можемо переконатися, що помилка вимірювання менша. За результатами моделювання було встановлено, що запропонований метод зменшення похибки вимірювання дає можливість зменшити $\sigma_{\text{проф.}}$ до $\approx 7\%$ в порівнянні зі значенням $\sigma_{\text{проф.}}$ середини ділянки профілю, що досліджується. В порівнянні з довжиною всієї ділянки профілю, зменшення помилки становить $\approx 30\%$ що є, на мою думку, не поганим результатом. Результат порівняння значень $\sigma_{\text{проф.}}$ з фільтрацією та без фільтрації виміряних значень середини ділянки профілю, що вимірюється, представлено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Порівняння значень $\sigma_{\text{проф.}}$ без фільтрації та з фільтрацією вимірних значень

	СКВ помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується, мм				
	$\sigma_\varepsilon = 0,005^\circ$	$\sigma_\varepsilon = 0,01^\circ$	$\sigma_\varepsilon = 0,03^\circ$	$\sigma_\varepsilon = 0,05^\circ$	$\sigma_\varepsilon = 0,07^\circ$
Без фільтрації	1,34	2,76	8,45	14,09	19,07
З фільтрацією	1,26	2,58	7,96	13,15	17,91
Зменшення похибки, %	5,9	6,5	6,3	6,7	6,1

2.2. Індикаторний метод контролю ухилів та рівності

Покриття аеродромних конструкції і автомобільних шляхів проектується як плавна лінія у просторі з ув'язкою елементів плану, поздовжнього та поперечного профілів між собою, з навколишнім ландшафтом і з оцінкою їх впливу на умови руху та зорове сприйняття поверхні [2]. Враховуючи рекомендації ІКАО та вимоги ДБН щодо поперечних ухилів, розроблено індикаторний метод їхнього діагностування, 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.

При вимірюванні ДП спостерігаються систематичні і випадкові похибки. Систематичні похибки вимірювання відомі і виключаються (компенсуються) [56]. Випадкові помилки вимірювання представлені у вигляді адитивної складової $\varepsilon(t)$ результату вимірювання $r(t)$ параметра $x(t)$:

$$r(t) = x(t) + \varepsilon(t). \quad (2.32)$$

У багатьох дослідженнях із діагностики приймається (і це підтверджується практикою), що значення вимірюваного параметра $x(t)$ і значення випадкової складової похибки вимірювання $\varepsilon(t)$ розподілені з нормальним законом [57], тобто щільності їх розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(m_x - x)^2}{2\sigma_x^2} \right] \text{ та } f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right]. \quad (2.33)$$

На графіку щільності розподілу $f(x)$ діагностичного параметра (рис. 2.13) позначено:

$x_{max} - x_{min}$ – поле розсіювання параметра X ;

$l = |x_{max} - x_{min}|/2$ – половина поля розсіювання;

$m_x = M(x)$ – найбільш ймовірне значення (математичне сподівання)

діагностичного параметра X ;

a і b – умовні позначення відповідно нижньої і верхньої меж поля допуску на параметр X ;

x_a – значення параметра X , яке відповідає нижній межі поля допуску;

x_b – значення параметра X , яке відповідає верхній межі поля допуску;

$\Delta = (x_b - x_a)/2$ – половина поля допуску на параметр X ;

$x_c = (x_a + x_b)/2$ – значення параметра X , що відповідає середині поля допуску.

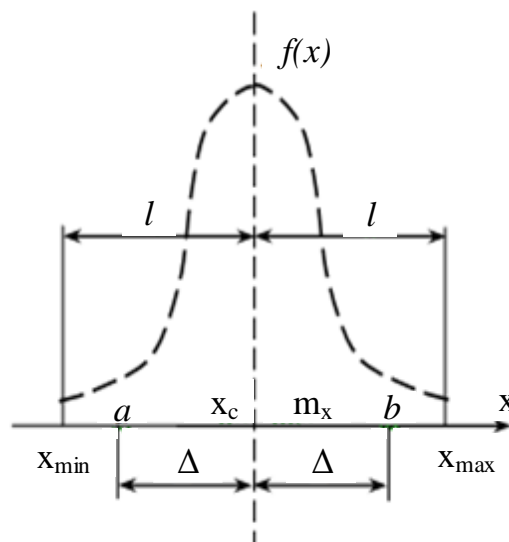


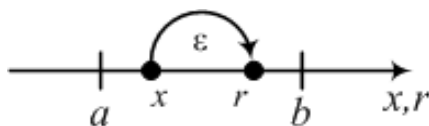
Рис. 2.13. Щільність розподілу $f(x)$ діагностичного параметра X та його характеристики

Прийнято, що при нормальному розподілі значень $x(t)$ діагностичного параметра X поле розсіювання $2l$ становить $6\sigma_x$:

$$\text{Ймов}\{m_x - 3\sigma_x \leq x(t) \leq m_x + 3\sigma_x\} = \int_{m_x - 3\sigma_x}^{m_x + 3\sigma_x} f(x) dx = 0,9973, \quad (2.34)$$

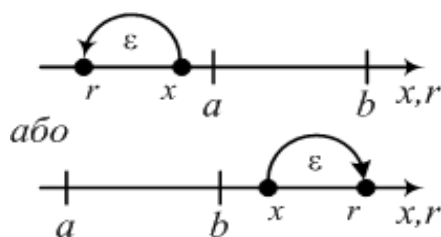
оскільки практично всі значення діагностичного параметра знаходяться у вказаному інтервалі [58]. При однократному вимірюванні ДП можлива одна з таких чотирьох ситуацій [59].

Ситуація 1. Значення діагностичного параметра x – у допуску (одна проста подія); результат вимірювання r – у допуску (друга проста подія). Складну подію позначаємо як $\{xr\}$ (рис. 2.14).

Рис. 2.14. Умови появи події $\{xr\}$

На основі аналізу нерівності $a < r < b$ формується вірне рішення: «Параметр у нормі». Ймовірність прийняття такого рішення позначимо P_{xr} .

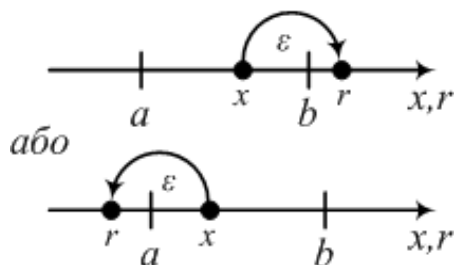
Ситуація 2. Значення діагностичного параметра x – за межами допуску (одна проста подія); результат вимірювання r – за межами допуску (друга проста подія). Складну подію позначаємо як $\{\bar{x}\bar{r}\}$ (рис. 2.15).

Рис. 2.15. Умови появи події $\{\bar{x}\bar{r}\}$

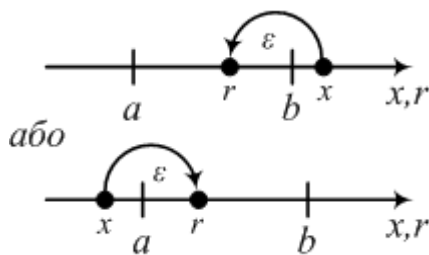
Враховуючи нерівність $r < a$ формується також вірне рішення: «параметр не в нормі», ймовірність прийняття такого рішення позначимо $P_{\bar{x}\bar{r}}$.

Ситуація 3. Значення діагностичного параметра x – у допуску (одна проста подія); результат вимірювання r – за межами допуску (друга проста подія). Складну подію позначаємо як $\{x\bar{r}\}$ (рис. 2.16).

На основі аналізу нерівності $r < a$ формується хибне рішення: «параметр не в нормі». Таку ситуацію зазвичай називають «хибне рішення не норма», а ймовірність прийняття такого хибного рішення $P_{x\bar{r}} = \alpha$ – помилкою першого роду.

Рис. 2.16. Умови появи події $\{x\bar{r}\}$

Ситуація 4. Істинне значення діагностичного параметра x – за межами поля допуску (одна проста подія); результат вимірювання r – у допуску (друга проста подія). Складну подію позначаємо як $\{\bar{x}r\}$ (рис. 2.17).

Рис. 2.17. Умови появи події $\{\bar{x}r\}$

На основі аналізу нерівності $a < r < b$ формується хибне рішення: «параметр у нормі». Цю складну подію називають «невиявлене значення не норма», а ймовірність прийняття такого рішення $P_{\bar{x}r} = \beta$ – помилкою другого роду.

Розглянуті чотири події, $\{xr\}$, $\{\bar{x}\bar{r}\}$, $\{x\bar{r}\}$, $\{\bar{x}r\}$ є несумісними, оскільки в результаті вимірювання параметра X може відбуватися якась одна з чотирьох, та утворюють повну групу подій, представляючи всі можливі виходи при контролі параметра X . Тому, на основі теореми повної групи подій [57] запишемо:

$$P_{xr} + P_{\bar{x}\bar{r}} + P_{x\bar{r}} + P_{\bar{x}r} = 1. \quad (2.35)$$

Очевидно, що сума перших двох доданків є не що інше, як ймовірність прийняття правильного рішення за результатами діагностування, тобто $P_{xr} + P_{\bar{x}\bar{r}} = P_{\text{в.р.}}$, а сума доданків $P_{x\bar{r}} + P_{\bar{x}r} = \alpha + \beta = P_{\text{х.р.}}$ визначає ймовірність прийняття хибного рішення при контролі параметра X .

Ймовірність прийняття правильного рішення за результатами контролю називають достовірністю контролю D . Достовірність діагностування (контролю) - це міра довіри до прийнятого рішення про технічний стан об'єкта. Кількісне значення достовірності визначається виразом [60]:

$$D = P_{\text{в.р.}} = 1 - (\alpha + \beta). \quad (2.36)$$

Отже, для отримання кількісної оцінки достовірності діагностування ухилів поперечного профілю необхідно обчислити значення помилок 1-го і 2-го роду.

З цією метою виявимо взаємозв'язок між допуском на параметр Δ , точністю вимірювання σ_ε та помилками контролю α та β . На рис. 2.18 наведено приклади, що ілюструють появу помилок α та β при контролі параметра X . У разі хибного рішення «не норма» заштрихована площа під кривою $f(\varepsilon)$ є ймовірністю того, що помилка вимірювання ε «забезпечує» $r < a$ або $r > b$ при допускових значеннях x . У разі

невиявленого рішення «не норма» заштрихована площа під кривою $f(\varepsilon)$ є ймовірністю того, що результат r знаходиться в полі допуску при $x < a$ або $x > b$.

Отже, встановимо вид аналітичних залежностей для помилок першого та другого роду $\alpha(\Delta, f(x), f(\varepsilon))$ та $\beta(\Delta, f(x), f(\varepsilon))$.

Хибний результат «не норма» з'являється внаслідок одночасної реалізації таких двох подій:

1) фактичне значення x діагностичного параметра X – у допуску, що виражається співвідношенням виду $a \leq x \leq b$; ймовірність цієї події $P_x(x)$ записується у вигляді:

$$P_x(x) = \int_a^b f(x) \cdot \int_a^b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(m_x - x)^2}{2\sigma_x^2}\right] dx; \quad (2.37)$$

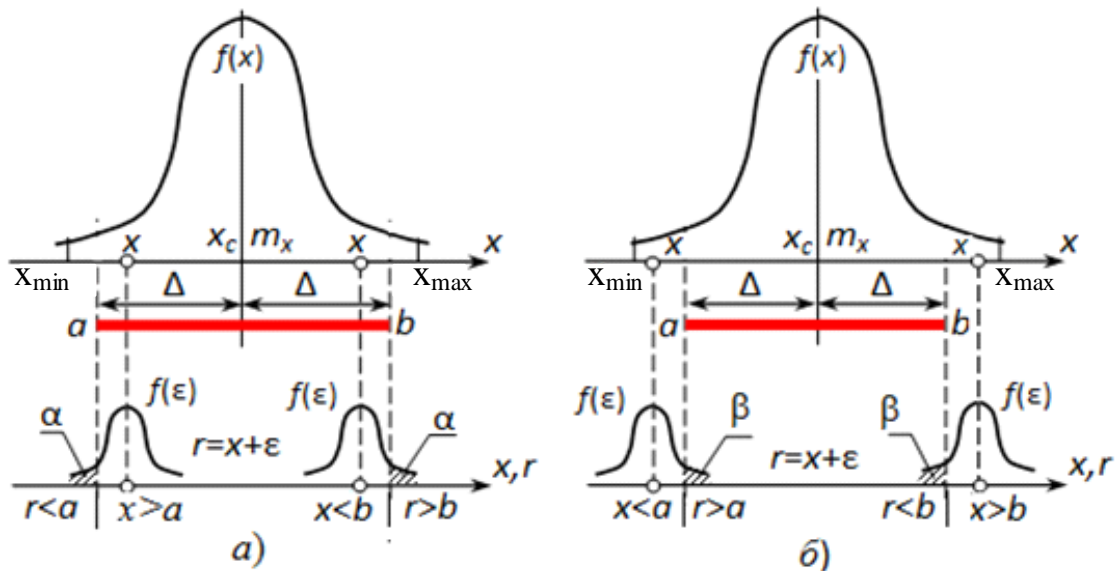


Рис. 2.18. Умови формування хибних рішень: a – помилка α ; b – помилка β

2) результат вимірювання r – за межами допуску, тобто $r < a$ або $r > b$; ймовірність цієї події $P_{\bar{r}}(x, \varepsilon)$, оскільки його реалізація є результатом наявності випадкової складової похибки ε . Отже, ймовірність хибного рішення «не норма» записується у вигляді:

$$\alpha = P_x(x) \cdot P_{\bar{r}}(x, \varepsilon). \quad (2.38)$$

Для визначення $P_{\bar{r}}(x)$ обчислимо межі, у яких повинна знаходитись ε – випадкова похибка вимірювання діагностичного параметра X , що зумовлює помилку першого роду. Згідно з рис. 2.16, запишемо:

$$r = x + \varepsilon < a \text{ або } r = x + \varepsilon > b, \quad (2.39)$$

тоді $\varepsilon < a - x$ або $\varepsilon > b - x$, а ймовірність того, що при вимірюванні діагностичного параметра значення похибки ε виявиться у вказаних межах, запишеться у вигляді [56, 61]:

$$\int_{-\infty}^{a-x} f(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{b-x}^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (2.40)$$

отже, ймовірність хибного рішення «не норма» запишеться у вигляді:

$$\alpha = \int_a^b f(x) \cdot \left[\int_{-\infty}^{a-x} f(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{b-x}^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon \right] dx. \quad (2.41)$$

Виходячи з нормального закону розподілу випадкових величин x та ε , запишемо остаточний вираз для ймовірності помилки α при оцінюванні діагностичного параметра X :

$$\alpha = \frac{1}{2\pi\sigma_\varepsilon\sigma_x} \left\{ \int_a^b \exp \left[-\frac{(m_x-x)^2}{2\sigma_x^2} \right] \cdot \left[\int_{-\infty}^{a-x} \exp \left[-\frac{(\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right] d\varepsilon + \int_{b-x}^{\infty} \exp \left[-\frac{(\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right] d\varepsilon \right] dx \right\}. \quad (2.42)$$

Аналогічно, на основі аналізу складної події $\{\bar{x}r\}$ отримуємо аналітичний вираз для ймовірності помилки другого роду, подавши його у вигляді:

$$\beta = \int_{-\infty}^a f(x) \left[\int_{a-x}^{b-x} f(\varepsilon) d\varepsilon \right] dx + \int_b^{\infty} f(x) \left[\int_{a-x}^{b-x} f(\varepsilon) d\varepsilon \right] dx. \quad (2.43)$$

Виходячи з нормальних законів розподілу випадкових величин x та ε , аналогічним чином запишемо вираз для ймовірності невиявленого рішення «не норма» при оцінюванні діагностичного параметра X :

$$\beta = \frac{1}{2\pi\sigma_\varepsilon\sigma_x} \int_{-\infty}^a \exp \left[-\frac{(m_x-x)^2}{2\sigma_x^2} \right] \left[\int_{a-x}^{b-x} \exp \left[-\frac{(\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right] d\varepsilon \right] dx + \frac{1}{2\pi\sigma_\varepsilon\sigma_x} \int_b^{\infty} \exp \left[-\frac{(m_x-x)^2}{2\sigma_x^2} \right] \left[\int_{a-x}^{b-x} \exp \left[-\frac{(\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right] d\varepsilon \right] dx. \quad (2.44)$$

Враховуючи те, що до діапазону значень ухилів профілів різних покриттів (ЗПС, руліжні доріжки, автомобільна дорога, узбіччя та ін.) висуваються різні вимоги, доцільним є нормування ДП. Введення нормованих, або відносних параметрів дає можливість створити модель з використанням єдиного аналітичного інструменту для дослідження достовірності діагностування не тільки значень ухилів, а й функціональних та діагностичних параметрів різних систем.

Як нормуючі елементи використовуються:

- для експлуатаційного допуску δ та похибки вимірювань z – середнє квадратичне відхилення σ_x значень параметра від математичного сподівання;
- для підінтегральних виразів, що містять розподіл похибки – середнє квадратичне відхилення σ_ε похибки вимірювача.

Отже, запишемо аналітичні вирази для помилок діагностування у відносних координатах при $m_x = 0$ (табл. 2.7) [61] та таких очевидних замінах:

Таблиця 2.7

Нормовані значення помилок діагностування

Нормування підінтегральних виразів		
$y = x/\sigma_x \rightarrow x = y \cdot \sigma_x$	$\tau = \varepsilon/\sigma_\varepsilon \rightarrow \varepsilon = \tau \cdot \sigma_\varepsilon$	
$dx = \sigma_x \cdot dy$	$d\varepsilon = \sigma_\varepsilon \cdot d\tau$	
Нормування меж інтегрування		
$a = -\Delta = -\delta \cdot \sigma_x$	$b = \Delta = \delta \cdot \sigma_x$	
$a/\sigma_x = -\delta$	$b/\sigma_x = \delta$	
$a - x = -\delta\sigma_x - x$	$b - x = \delta\sigma_x - x$	
$(-\delta - y)/z = (-\delta\sigma_x - y\sigma_x)/\sigma_\varepsilon$	$(\delta - y)/z = (\delta\sigma_x - y\sigma_x)/\sigma_\varepsilon$	$\sigma_\varepsilon/\sigma_x = z$

Отримуємо нормовані розрахункові залежності:

$$\alpha(\delta, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \int_{-\delta}^{\delta} \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] \left[\int_{\infty}^{\frac{-\delta-y}{z}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau + \int_{\frac{\delta-y}{z}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau \right] dy \right\}, \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \beta(\delta, z) = & \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{-\delta} \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] \left(\int_{\frac{\delta-y}{z}}^{\frac{\delta-y}{z}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau \right) dy + \right. \\ & \left. + \int_{\delta}^{\infty} \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] \left(\int_{\frac{-\delta-y}{z}}^{\frac{-\delta-y}{z}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau \right) dy \right\} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Використовуючи зазначені вище залежності помилок першого і другого роду можемо розрахувати ймовірності прийняття правильного рішення за результатами контролю ухилів профілю покриття, що досліджується.

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 узбіч, діапазон їх ухилів становить від 30‰ до 60‰, тобто $\sigma_x = 5$ ‰. Значення розрахованих відносних допусків та відносних помилок вимірювання наведені в таблиці 2.8 та таблиці 2.9 відповідно.

Таблиця 2.8

Значення відносних допусків поперечних ухилів

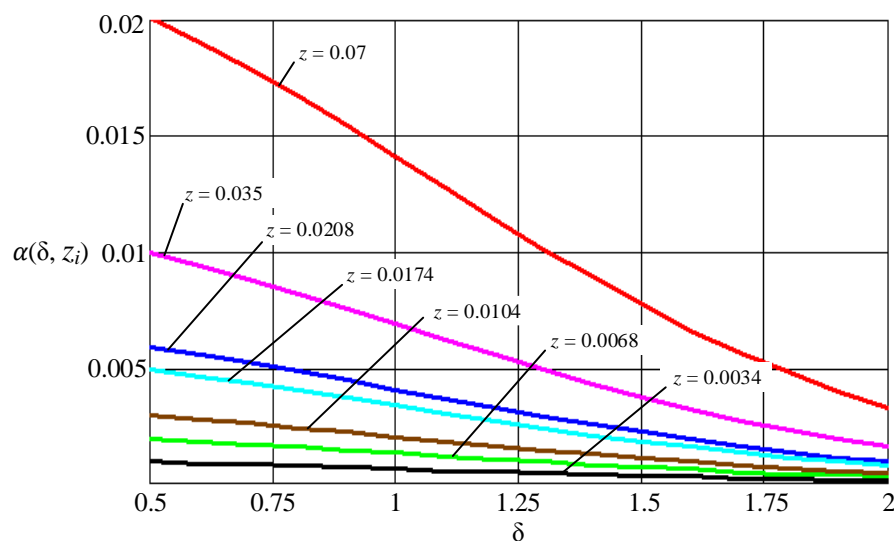
Ухили дорожнього покриття			Ухили узбіччя		
	2Δ	δ		2Δ	δ
З асфальтобетонним та цементобетонним покриттям	5‰	1	Укріплені із застосуванням в'язучих	10‰	1
Гравійне та щебенеve покриття	5‰	1	Укріплені гравієм, щебенем	20‰	2
Ґрунти укріплені в'язучими	10‰	2	Укріплені засівом трав або одернуванням	10‰	1

Таблиця 2.9

Значення відносних помилок вимірювання поперечних ухилів

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

Отже, використовуючи нормовані розрахункові залежності для помилок першого і другого роду (2.45) і (2.46), проведемо дослідження їх характеристик в залежності від параметрів діагностичного процесу: нормованого значення допуску δ та нормованого значення точності вимірювання z . Побудуємо залежності: $\alpha = f(z_i, \delta)$ (рис. 2.19) та $\beta = f(z_i, \delta)$ (рис. 2.20), з яких видно, що зі зменшенням «жорсткості» допуску, зменшується ймовірність виникнення помилок діагностування, також прослідковується цілком логічне зменшення ймовірності виникнення помилок першого і другого роду при збільшенні точності вимірювання.

Рис. 2.19. Залежність помилки першого роду від величини допуску $\alpha = f(\delta, z_i)$

Розрахувавши ймовірності помилок α («хибне рішення не норма») і β («невиявлене рішення не норма»), у відповідності з рівнянням (2.36), побудуємо залежності достовірності діагностування від допуску при фіксованих значеннях точності вимірювання, $D = f(\delta, z_i)$ (рис.2.21). Зведені результати залежності достовірності діагностування, та помилок першого і другого роду від параметрів діагностичного процесу (δ і z) представлені в таблиці 2.10.

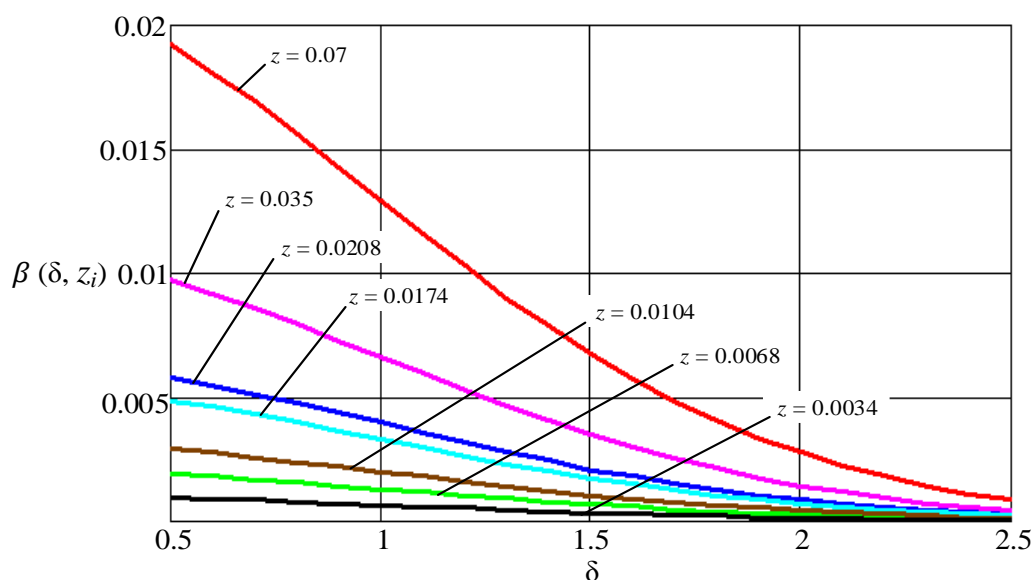


Рис. 2.20. Залежність помилки другого роду від величини допуску $\beta = f(\delta, z_i)$

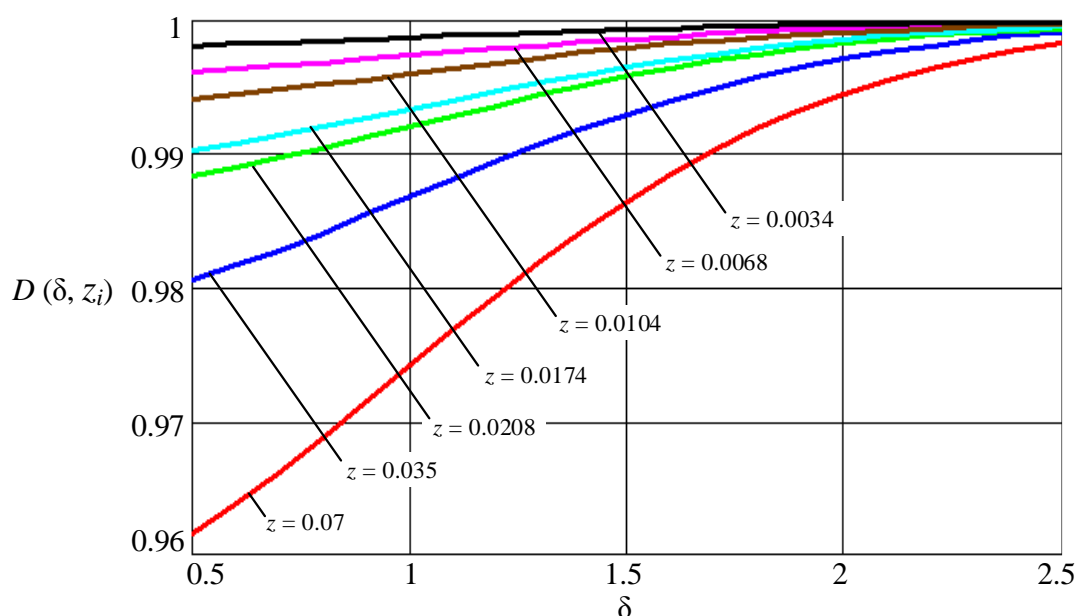


Рис. 2.21. Залежність достовірності діагностування від величини допуску, $D = f(\delta, z_i)$

Отже, розглянуті вище залежності ймовіностей виникнення помилок першого і другого роду дають нам можливість оцінити їхні значення в залежності від параметрів

діагностичного процесу: помилки вимірювання профілю поверхні, та величини допуску на ДП (ухил).

Таблиця 2.10.

Зведені результати розрахованих значень помилок діагностування та достовірності діагностування

			Нормовані значення точності вимірювання профілю поверхні, що досліджується (z)						
			0,07	0,035	0,0208	0,0174	0,0104	0,0068	0,0034
D	Нормовані значення допуску на ухил (δ)	1	0,97297	0,98649	0,99197	0,99328	0,99598	0,99737	0,99869
α			0,014	0,00691	0,00407	0,0034	0,00202	0,00132	0,00066
β			0,013	0,00661	0,00396	0,00332	0,002	0,00131	0,00655
D		1,5	0,9855	0,99276	0,9957	0,9964	0,99785	0,99859	0,9993
α			0,00772	0,00374	0,00219	0,00183	0,00109	0,00071	0,00035
β			0,00678	0,0035	0,00212	0,00177	0,00106	0,0007	0,00035
D		2	0,99394	0,98649	0,99197	0,99328	0,99598	0,99737	0,99869
α			0,0033	0,00158	0,00092	0,00077	0,00045	0,00029	0,00014
β			0,00277	0,00144	0,00087	0,00073	0,00044	0,00029	0,00014

Але однією з основних інженерних задач, є розрахунок прогнозованого рівня достовірності діагностування, яка передбачає висування вимог до точності вимірювальних приладів, наприклад при їх проектуванні. Для виконання таких завдань доцільно провести розрахунок залежності достовірності діагностування від точності вимірювального приладу ($D = f(z, \delta_i)$), яка представлена на рис. 2.22.

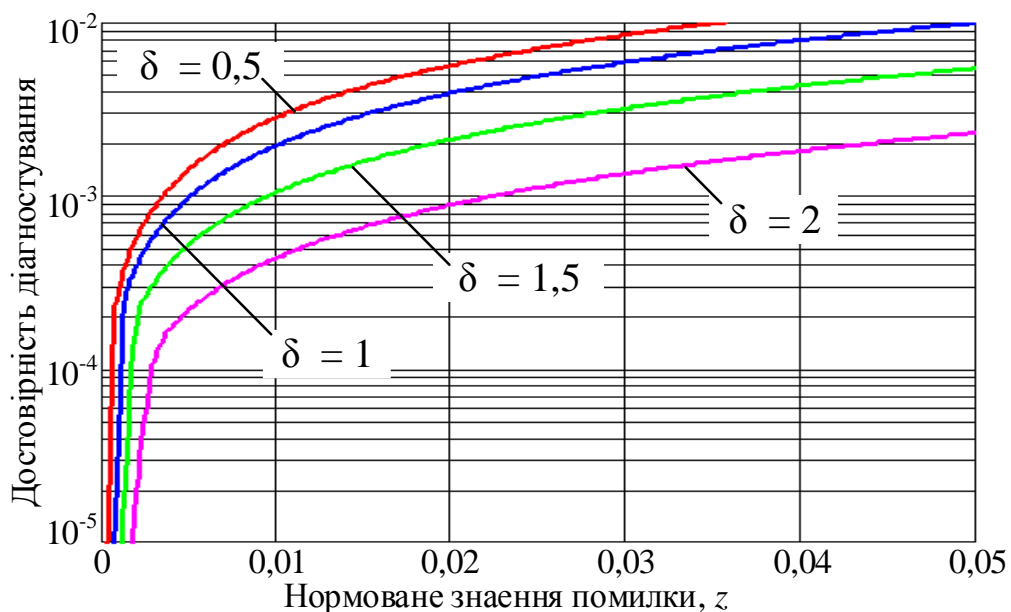


Рис. 2.22. Залежність достовірності діагностування від точності вимірювання профілю поверхні, $D = f(z, \delta_i)$.

Висновки

1. На основі «спектральної щільності дисперсії» – критерію оцінки рівності покриттів удосконалено спектральний метод оцінки ухилів та рівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів. Даний метод найбільш доцільно використовувати для оцінки ухилів та рівності поздовжнього профілю поверхонь, що досліджуються. Обґрунтовано можливість використання даного методу для оцінки як нерівності так і ухилів.

2. Розроблено математичну модель профілю покриття, що досліджується, представлену сукупністю гармонічних коливань розподілених за частотними діапазонами відповідно до їх класифікації. Таким чином отримано можливість проводити дослідження характеристик точності розроблених методів оцінки ухилів та рівності. Шляхом розкладання профілю змодельованої поверхні в спектр обґрунтовано можливість використання спектрального методу вимірювання ухилів та рівності поверхонь, що досліджуються.

3. Розроблено ітеративний метод відновлення профілю поверхні на базі вимірювання кутів між горизонтом та поверхнею з врахуванням кроку вимірювання.

4. Розроблено імітаційну модель для оцінки точності ітеративного методу відновлення профілю поверхні, що досліджується, в основу роботи якої покладено чисельний метод розв'язання математичних задач за допомогою моделювання випадкових величин. Проведено дослідження, та отримано кількісну оцінку точності відтворення профілю.

5. Обґрунтовано доцільність застосування алгоритму фільтрації вимірних значень кутових положень при ітеративному методі відновлення профілю поверхні для підвищення точності. Розглянутий алгоритм, в якому спочатку виконується фільтрація вздовж масиву вимірних значень з ліва на право і справа на ліво, а потім об'єднання результатів з метою отримання інтерполяційної оцінки в кожній точці, що дає можливість зменшити похибку вимірювання на середині проміжку, що досліджується до $\approx 7\%$, а загальне значення похибки вимірювання зменшується на $\approx 30\%$.

б. Враховуючи вимоги нормативних документів, зокрема щодо поперечних ухилів, розроблено індикаторний метод їх контролю. Даний метод контролю ухилів доцільно використовувати для контролю поперечних ухилів саме тоді, коли потрібно прийняти рішення «норма» чи «не норма». Запропоновано модель та проведено розрахунок помилок першого і другого роду, що виникають при допусковому контролі діагностичного параметра. 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.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ

Запропоновані методи оцінки ухилів та рівностей покриттів конструкцій аеродрому та автомобільних шляхів базуються на вимірюванні кутів між точками на профілі поверхні. Тому наступним логічним кроком даного дисертаційного дослідження буде розгляд запропонованого варіанту вимірювання кута між двома точками на профілі поверхні, що досліджується, суть якого полягає у використанні вимірювальної платформи з встановленими на ній мікроелектромеханічними системами (МЕМС), як датчиками визначення просторового положення.

В даному розділі розглядаються особливості застосування МЕМС-датчиків при розробці системи визначення кутового положення вимірювальної платформи. В процесі роботи системи визначення кутової орієнтації необхідно оцінювати значення кута – його відхилення від горизонталі. В даний час широкого поширення набули різні види МЕМС-датчиків, які успішно застосовуються для вирішення цього завдання.

В розділі розглянуті переваги і недоліки датчиків, зокрема акселерометра і гіроскопа відповідно до задачі оцінки кута відхилення від горизонталі. Гіроскоп (датчик кутової швидкості) вимірює кутову швидкість, яку при відомих початкових умовах можна інтегрувати протягом часу для розрахунку кутового положення датчика. Точні гіроскопи, наприклад кільцевий лазер, занадто дорогі громіздкі для багатьох задач, тому в більшості випадків використовуються менш точні МЕМС-датчики. Інтегрування помилок вимірювання гіроскопа приведе до накопичення помилки в обчисленій орієнтації. Таким чином гіроскоп не може самостійно забезпечити абсолютне вимірювання орієнтації. Акселерометр вимірює гравітаційне поле Землі, що забезпечує абсолютне визначення орієнтації. Проте вони також піддаються впливу високих рівнів шуму.

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.

Фільтр Калмана став основою для побудови більшості алгоритмів визначення орієнтації. Широке застосування рішень Калмана є доказом їх точності та ефективності, однак вони мають ряд недоліків. Вони можуть бути складними для реалізації. Лінійна регресія ітерацій є фундаментальною для процесів Калмана і вимагає високу частоту дискретизації. Рівняння стану, які описують оберտальну кінематику в 3D, зазвичай, потребують великих векторів станів і реалізацію розширеного фільтру Калмана для лінеаризації задачі.

Виходячи з вищевказаного, реалізація Калманівських рішень потребує великого обчислювального навантаження і забезпечує чітку мотивацію для створення нових підходів. Багато підходів до вирішення цієї задачі базуються або на нечіткій обробці, або на фіксації фільтра на користь акселерометра для визначення орієнтації при малих кутових швидкостях та інтегруванні вимірів гіроскопа при високих кутових швидкостях (комплементарний фільтр). Такий підхід є простим, але може бути ефективним лише при обмежених умовах використання.

Рішення Маджвіка може бути використаним у системах з магнітометром і без нього. Фільтр займається обробкою масивів даних, що надходять з сенсорів, і знімає проблеми точності і налаштування параметрів фільтрів, які базуються на рішеннях Калмана. Для представлення орієнтації фільтр використовує кватерніон, який описує положення в просторі в 3D і не містить проблем, що пов'язані з описом положення кутами Ейлера.

3.1. МЕМС-датчики

Точність визначення орієнтації в просторі відіграє важливу роль в багатьох сферах, серед яких аерокосмічна галузь, робототехніка, навігація, аналіз руху людини та взаємодія рухів людини з машиною. Не зважаючи на те, що існує ряд методів для визначення просторової орієнтації, інерційні системи мають значну перевагу – вони є самодостатніми, оскільки вимірювання не залежать від руху, середовища або місця знаходження об'єкта. *Inertial Measurement Unit (IMU)* – інерційний вимірювальний блок – складається з акселерометра і гіроскопа, що дозволяє вимірювати оберտальний

і поступальний рухи. Для можливості 3D вимірювання потрібно мати датчики з 3-ма взаємно ортогональними осями чутливості [36, 63].

3.1.1. МЕМС-акселерометр

Акселерометр являє собою електромеханічний пристрій, що використовується для вимірювання сили реакції, що створюється прискоренням або гравітацією, тобто вимірює силу, що пропорційна прискоренню, як це передбачено другим законом Ньютона, $F = m \cdot a$.

Якщо на акселерометр діє лише сила тяжіння, то він буде вимірювати силу прискорення вільного падіння, оскільки під дією цієї сили чутливий елемент відхилиться від положення рівноваги. Існує кілька видів акселерометрів, які відрізняються чутливим елементом і принципами перетворення фізичної величини в електричний сигнал [64].

Для кращого розуміння принципу роботи акселерометра, уявімо його як вантаж, закріплений на пружинах. Принцип буде аналогічний – відбувається зміщення чутливого елемента під дією будь-якої сили. На рис. 3.1 представлена структурна схема одноосьового акселерометра, який перетворює вимірювання положення чутливого елемента у еквівалентний електричний сигнал [65, 66].

В системі маса-пружина-демпфер, маса m , яку ще називають сейсмічною масою, прикріплена до пружини жорсткістю k , яка в свою чергу прикріплена до корпусу. Зазвичай система включає в себе демпфер з коефіцієнтом згасання b , для досягнення бажаного ефекту демпфірування. Коли система піддається лінійному прискоренню, сила, що рівна добутку маси на прискорення змушує сейсмічну масу відхилитися. Це відхилення фіксується відповідними датчиками, та перетворюється у еквівалентний електричний сигнал. Наявність демпфера, тобто потрібного коефіцієнта загасання, дає можливість системі якнайшвидше повернутися до стану рівноваги.

Відповідно до другого закону Ньютона, можемо вивести рівняння руху системи, де всі сили, що діють на сейсмічну масу рівні силі інерції сейсмічної маси

[66]. Таким чином динамічну задачу можна розглянути з точки зору статичної рівноваги:

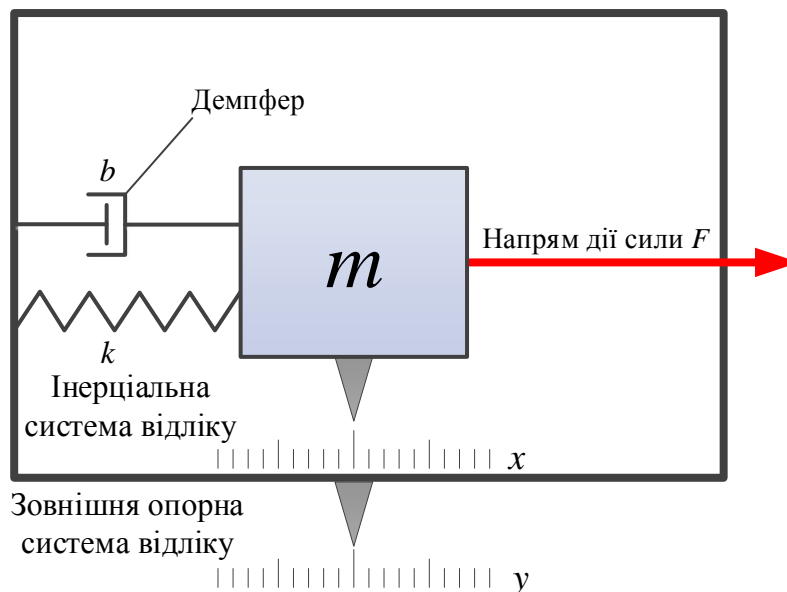


Рис. 3.1. Система маса-пружина-демпфер

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0. \quad (3.1)$$

Дане диференціальне рівняння, поділивши на m , можемо перегрупувати як:

$$\ddot{x} + \frac{b}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0. \quad (3.2)$$

Якщо природна частота системи $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (кутова швидкість, виражається в рад/с) та швидкість згасання $\zeta = \frac{b}{2\sqrt{km}}$ (безрозмірна величина), то диференціальне рівняння можемо записати в наступному вигляді:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0. \quad (3.3)$$

Далі ми маємо можливість розв'язати рівняння, припустивши, що $x = e^{\gamma t}$, підставивши відповідно $\dot{x} = \gamma e^{\gamma t}$, $\ddot{x} = \gamma^2 e^{\gamma t}$ та поділивши на $e^{\gamma t}$:

$$\gamma^2 + 2\zeta\omega_0\gamma + \omega_0^2 = 0, \quad (3.4)$$

розв'язок даного характеристичного рівняння дасть два корені, що можуть бути дійсними, або комплексними.

Поведінка розглянутої системи залежить від співвідношення ω_0 і ζ (природної частоти та коефіцієнту згасання відповідно). Також, якісна поведінка системи

залежить від того який розв'язок має квадратне рівняння для γ : один дійсний корінь, два дійсних, чи два спряжених комплексних.

Оскільки значення прискорення, виміряне акселерометром, є функцією від зміщення x , постає задача вимірювати це зміщення. У більшості MEMS-акселерометрів, завдяки простоті конструкції, використовують ємнісний підхід.

Типова структура MEMS-акселерометра складається з рухомої (сейсмічної) маси з пластинами, яка кріпиться за допомогою механічної пружинної підвіски до основної підкладки мікросхеми, тобто зовнішньої системи відліку, як показано на рис. 3.2.

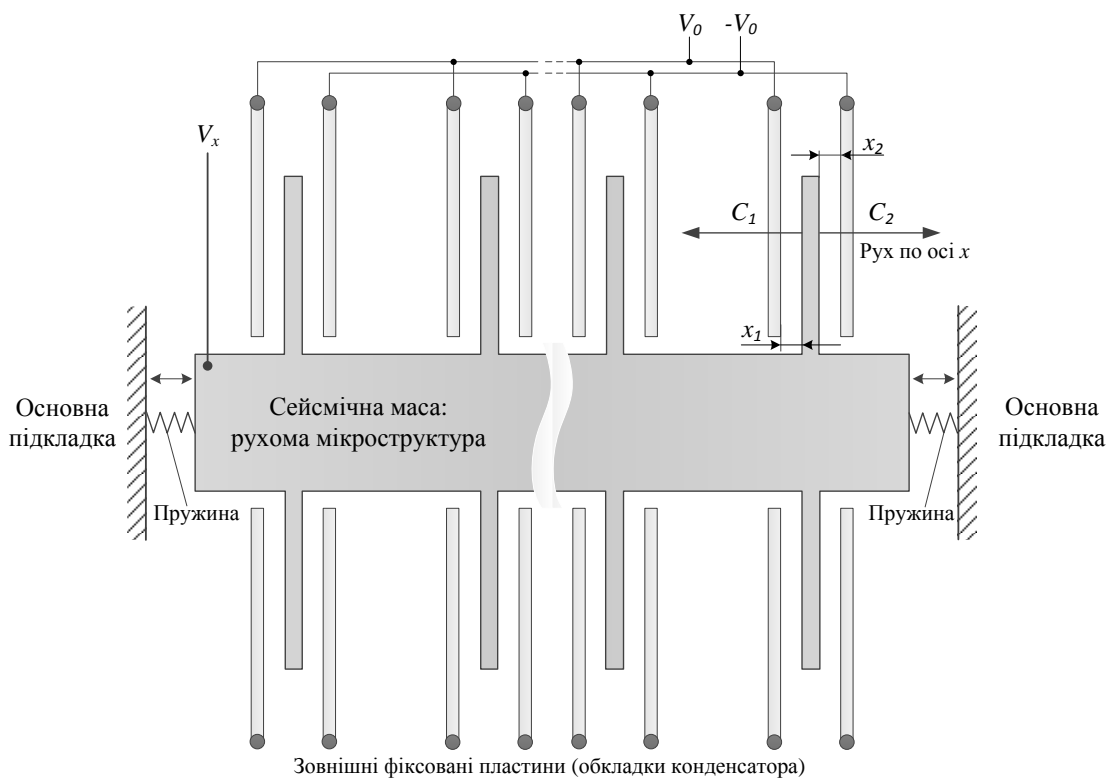


Рис. 3.2. Структура акселерометра

Рухомі пластини і фіксовані зовнішні пластини утворюють обкладки конденсаторів. Зміщення сейсмічної маси визначається шляхом вимірювання різниці електричної ємності [67]. Рівняння для плоского конденсатора має наступний вигляд:

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_A \frac{1}{d}, \quad (3.5)$$

де $\varepsilon_A = \varepsilon_0 \varepsilon A$, ε діелектрична проникність матеріалу між обкладками конденсатора, A – площа обкладок конденсатора, d – відстань між обкладками конденсатора. У

вільному просторі (повітря) значення ємності між рухомою пластиною і двома зовнішніми стаціонарними C_1 і C_2 є функціями відповідних переміщень x_1 та x_2 :

$$C_1 = \varepsilon_A \frac{1}{x_1} = \varepsilon_A \frac{1}{d+x} = C_0 - \Delta C, \quad (3.6)$$

$$C_2 = \varepsilon_A \frac{1}{x_2} = \varepsilon_A \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C. \quad (3.7)$$

Якщо прискорення дорівнює нулю, то ємності C_1 і C_2 рівні, оскільки $x_1 = x_2$. Якщо сейсмічна маса зміщується під дією прискорення, то різниця ємності знаходиться наступним чином:

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\varepsilon_A \frac{1}{d^2-x^2}. \quad (3.8)$$

Вимірювання ΔC , зміщення x можна знайти шляхом розв'язку нелінійного алгебраїчного рівняння:

$$\Delta C x^2 + \varepsilon_A x - \Delta C d^2 = 0. \quad (3.9)$$

Це рівняння можна спростити. Для малих зміщень, $\Delta C x^2$ незначне і ним можна знехтувати, таким чином:

$$x \approx \frac{d^2}{\varepsilon_A} \Delta C = d \frac{\Delta C}{C_0} \quad (3.10)$$

отже, відповідно до (3.10), зміщення x приблизно пропорційне різниці ємності [68].

Як видно на рис. 3.2, кожен датчик має набір конденсаторів. Всі обкладки конденсаторів підключені попарно паралельно одна з одною таким чином, щоб утворити загальні ємності C_1 та C_2 , в іншому випадку різниця ємності при зміщенні сейсмічної маси буде незначною, тобто невідчутною для вимірювання.

Отже розглянемо роботу електричної схеми (рис. 3.3) для вимірювання зміни ємності на прикладі акселерометра фірми Analog Devices ADXL05 [69]. На нерухомі пластин (обкладки конденсатора) подається напруга амплітудою V_0 і частотою коливань (прямокутної форми) 1МГц. Фази коливань верхньої і нижньої частини нерухомих пластини відрізняється на 180° . Дану схему можна розглянути як звичайний дільник напруги вихідний сигнал з якого проходить через підсилювач і демодулятор. Оскільки в першу чергу нас цікавить значення напруги V_x , тобто напруги, знятої з пластин сейсмічної маси, маємо наступне рівняння:

$$(V_x + V_0)C_1 + (V_x - V_0)C_2 = 0, \quad (3.11)$$

враховуючи рівняння (3.7) і (3.10), V_x можна знайти за наступною формулою:

$$V_x = V_0 \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{x}{d} V_0. \quad (3.12)$$

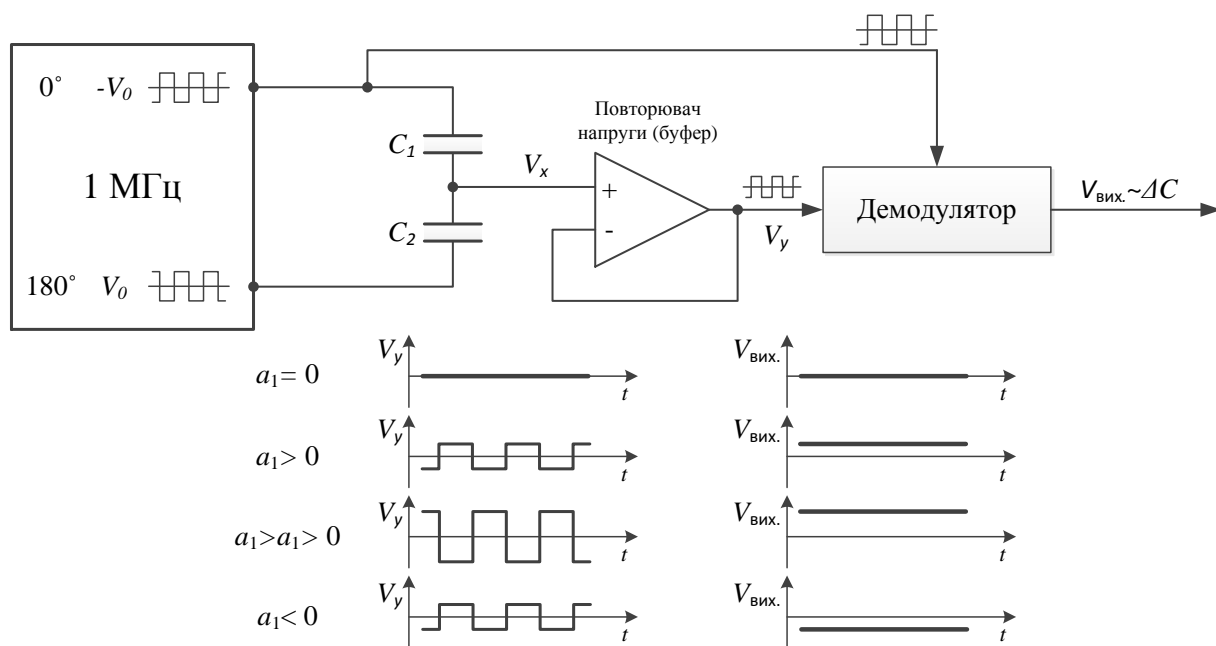


Рис. 3.3. Електрична схема вимірювання прискорення пропорційного зміні ємності

Амплітуда сигналу V_x пропорційна прискоренню, але ми не можемо використовувати цей вихідний сигнал, оскільки він слабкий і зашумлений [70]. Коли на акселерометр не діє прискорення ($a_1 = 0$), то сейсмічна маса не переміщається і вихідна напруга дорівнює нулю. Якщо на датчик діє прискорення ($a_1 > 0$), то вихідна напруга V_x змінюється пропорційно V_0 (3.2). Щоб уникнути загасання сигналу, ми вимірюємо значення V_x з повторювача напруги (буфера). Якщо значення прискорення від'ємне ($a_1 < 0$), сигнали V_x і V_y матимуть від'ємний знак. Знак прискорення визначається в демодуляторі шляхом множення V_y та V_0 – сигнал що згенерований осцилятором. Таким чином ми отримуємо вихідну напругу $V_{\text{вих.}}$ пропорційну діючому на акселерометр прискоренню та відповідним напрямку знаком.

Маса сейсмічної маси, що згадувалась вище, приблизно 0,1 мкг, найменша зміна ємності, що може бути виміряна ≈ 20 аФ, а зазори між пластинами рівні приблизно 1,3 мкм [69]. Це було розглянуто найпростіший приклад однієї осі акселерометра, але якщо одна мікросхема містить в собі подібні набори

конденсаторів розташованих перпендикулярно один до одного, то можемо отримати двох- або навіть трьохосьовий акселерометр (рис. 3.4).

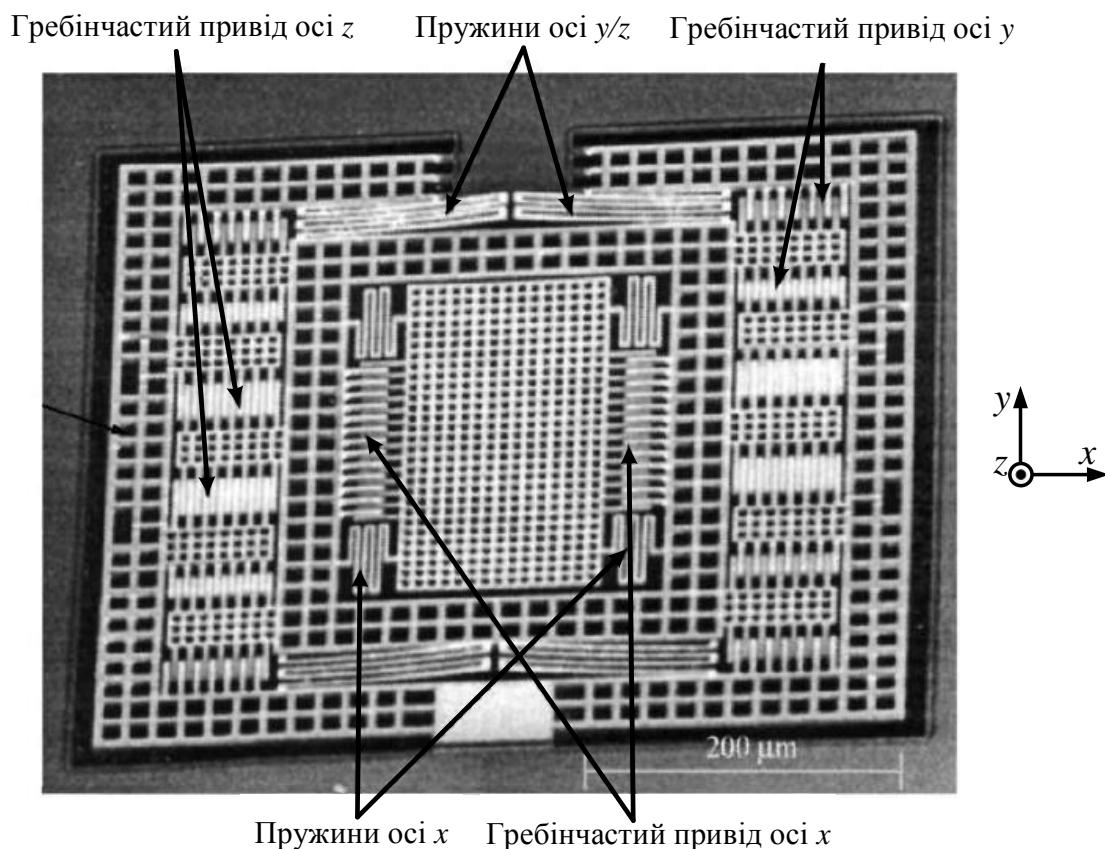


Рис. 3.4. Структура трьохосьового акселерометра

3.1.2. МЕМС-гіроскоп

Гіроскоп - це пристрій, що реагує на зміну кутової швидкості на одній або декількох осях. Існує кілька різновидів МЕМС гіроскопів, що розрізняються внутрішнім пристроєм, але всіх їх об'єднує те, що їх робота основана на використанні сили Коріоліса. У кожному з них є робоче тіло, що здійснює зворотнопоступальний рух. Якщо обертати підкладку, на якій знаходиться це тіло, то на нього почне діяти сила Коріоліса (рис. 3.5), спрямована перпендикулярно осі обертання і напрямку руху тіла, $F_k = 2m[\bar{V} \times \bar{\Omega}]$.

Знаючи лінійну швидкість і силу Коріоліса можна визначити кутову швидкість. Суттєво спрощується завдання, якщо лінійна швидкість коливань V змінюється за синусоїдальним законом $V = V_0 \sin \omega t$. Таким чином, визначення прискорення Коріоліса зводиться до визначення сигналу Ω , що моделюється несучою частотою ω :

$$a_k = 2V_0\Omega \sin \omega t. \quad (3.13)$$

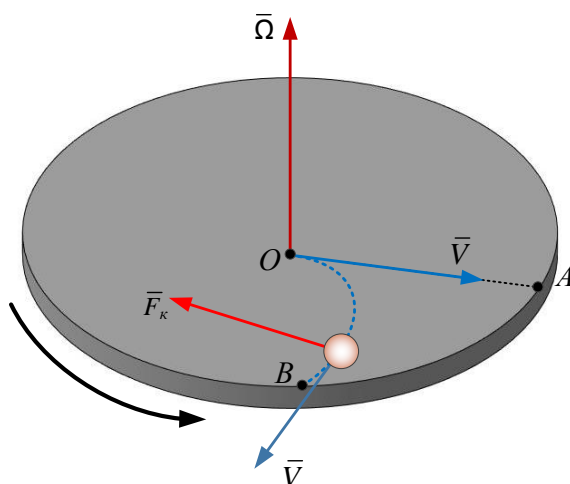


Рис. 3.5. Механізм роботи сили Коріюліса

Одна з можливих реалізацій гіроскопа має наступну структуру: закріплена на гнучких підвісках рамка, всередині якої здійснює поступальні коливальні рухи інерційної маси [71, 72]. Структура такого сенсора представлена на рис. 3.6.

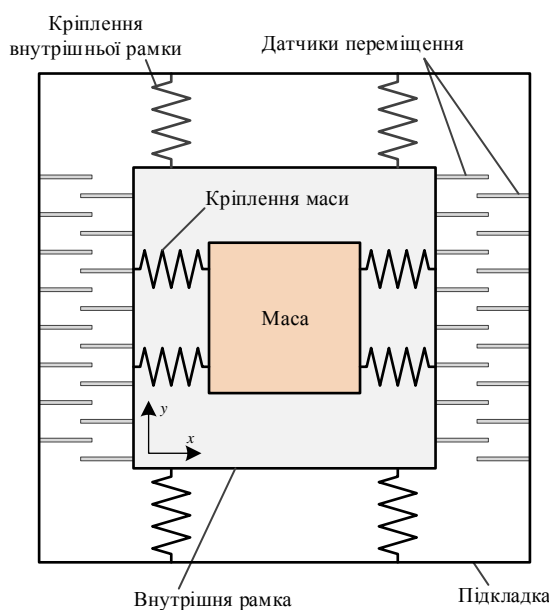


Рис. 3.6. Внутрішня структура гіроскопа

Коливання робочої маси відбуваються уздовж осі X і генеруються електростатично, а коливання внутрішньої рамки можливі тільки уздовж осі Y . Між внутрішньою рамкою і розташованими на підкладці обкладками плоских конденсаторів (датчики переміщення), таким чином, вимірюючи їх ємність, можна реєструвати рух рамки відносно підкладки. На Рис. 3.7 представлена структура гіроскопа при його обертанні в площині XU за годинниковою стрілкою.

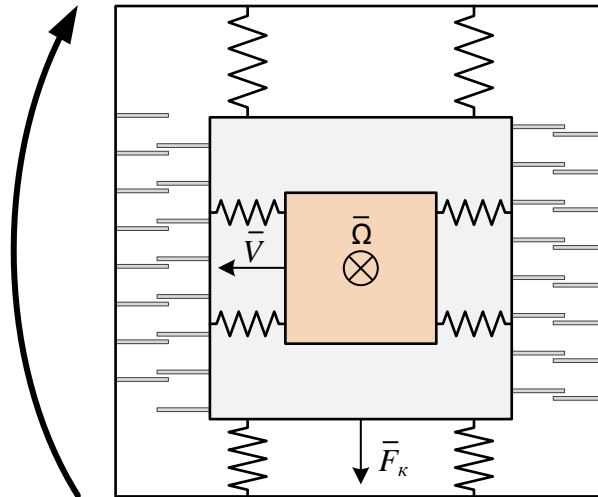


Рис. 3.7. Структура гіроскопа при обертанні

Але коливання внутрішньої рамки можуть викликатися не тільки силою Коріоліса, а й лінійними прискореннями, які діють уздовж осі Y . Проблема вирішується шляхом розміщення на одній підкладці двох рамок, в кожній з яких знаходиться робоча маса. Обидві маси коливаються в протифазі, отже, в конкретний момент часу сила Коріоліса, що впливає на першу масу, спрямована протилежно силі, що впливає на другу. Сигнали, що генеруються силою Коріоліса, будуть складатися, а синфазна складова, породжена лінійними прискореннями, буде відніматися. Таким чином, вимірюючи відхилення внутрішньої рамки за допомогою датчиків переміщення, можна оцінити кутову швидкість.

3.2. Комплексування інформації

Як було зазначено вище, акселерометр вимірює проекцію суми діючих сил на осі чутливості, якщо на об'єкт діє лише сила тяжіння, то вимірюючи проекцію цієї сили на осі чутливості акселерометра, можна визначити кут нахилу об'єкта відносно вертикалі (рис. 3.8.) [70, 73, 74]:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (3.14)$$

Насправді ж на об'єкт можуть діяти додаткові сили, всі лінійні прискорення вносять суттєві спотворення в оцінку кута відхилення від вертикалі.

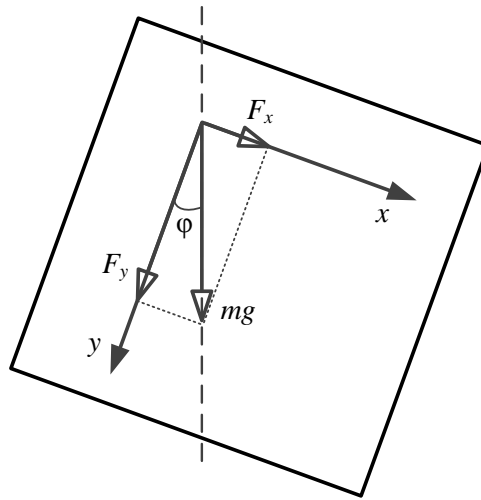


Рис. 3.8. Визначення кута нахилу по проекціях сили тяжіння на осі

Також суттєвим недоліком акселерометра є високочастотний шум вихідного сигналу (рис. 3.9), тому акселерометр в якості датчика кутового положення можна застосовувати лише у випадках, коли не потрібно висока точність вимірювань або об'єкт має значну інерцію.

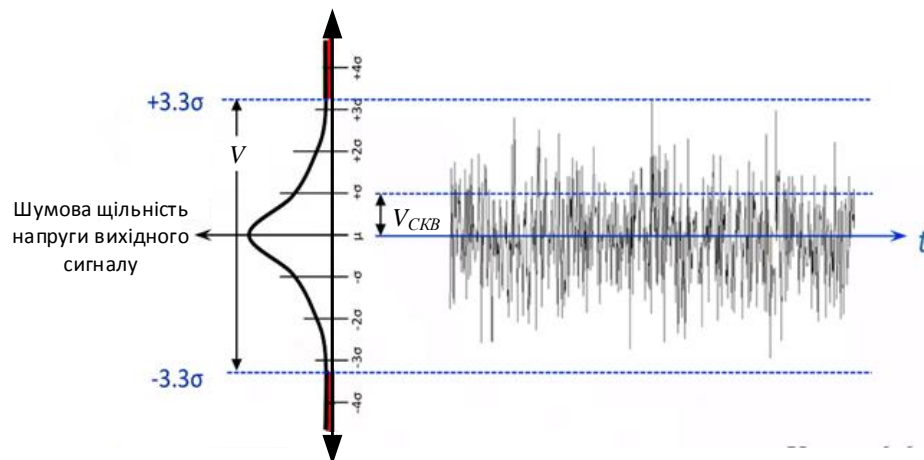


Рис. 3.9. Шум вихідного сигналу акселерометра

Кут нахилу об'єкта відносно вертикалі за допомогою гіроскопа можна визначити шляхом інтегрування значень кутової швидкості, при відомому початковому значенні кута відхилення. На практиці ж такий спосіб визначення пов'язаний з проблемою: «дрейфом» нуля гіроскопа (рис. 3.10). В силу конструктивних особливостей датчиків, значення гіроскопа майже завжди зміщені відносно нульового рівня. Крім того, величина зсуву залежить від різних чинників,

таких як температура, швидкість обертання гіроскопа та ін. Як наслідок, при інтегруванні ця помилка буде накопичуватися.

В свою чергу гіроскоп має ряд переваг в порівнянні з акселерометром:

- менший рівень шуму в області середніх і високих частот;
- при інтегруванні амплітуда завад знижується;
- є можливість визначити безпосередньо похідну кута нахилу;
- низький рівень завад, викликаний дією зовнішніх сил.

До недоліків, окрім «дрейфу» нуля можна віднести відсутність можливості оцінки абсолютного значення кута (для цього необхідно знати його початкове значення) [75].

Враховавши вище зазначені недоліки датчиків, жоден з них не може бути використаний сам по собі для вирішення задачі оцінки кутового положення вимірювальної платформи, тому виникає природне бажання об'єднати показання цих двох датчиків для усунення їх недоліків. Але основним датчиком все ж слід вважати саме гіроскоп, оскільки його показання істотно точніше показань акселерометра в короткий проміжок часу [70, 76, 77].



Рис. 3.10. Інформація від датчиків

Для вирішення завдання визначення кутового положення об'єкта (вимірювальної платформи) відносно вертикалі існує багато алгоритмів комплексування (фільтрації) даних від MEMS-датчиків, кожен з них має свої переваги та недоліки. Тому для вибору оптимального алгоритму фільтрації потрібно чітко розуміти критерії оцінки.

3.2.1. Комплементарний фільтр

Комплементарний фільтр – один з найбільш популярних і водночас один з найпростіших в даний час алгоритмів фільтрування показань акселерометра і гіроскопа. Метою даного методу комплексування, як і всіх інших, є компенсація дрейфу нуля гіроскопа за допомогою даних, отриманих від акселерометра. При цьому для гіроскопа комплементарний фільтр є фільтром високих частот, а для акселерометра - фільтром низьких частот [73]. Таким чином, досягається рішення задачі: на низьких частотах переважають покази акселерометра (відсутність дрейфу нуля), на високих – гіроскопа.

Вираз для розрахунку кута відхилення об'єкта від вертикалі за допомогою комплементарного фільтра:

$$\hat{\varphi}(n) = K(\hat{\varphi}(n-1) + \omega_g \Delta t) + (1-K)\varphi_a, \quad (3.15)$$

де $\hat{\varphi}(n)$ – оцінка кута в даний момент часу; $\hat{\varphi}(n-1)$ – оцінка кута в попередній момент часу; ω_g – значення кутової швидкості, вимірюваної гіроскопом; φ_a – значення кута нахилу, вимірюваного акселерометром; K – коефіцієнт комплементарного фільтра; Δt – крок інтегрування.

Як видно з формули, підсумкова величина кута нахилу є сумою інтегрованого значення гіроскопа і миттєвого значення акселерометра. По суті, головне завдання комплементарного фільтра полягає в тому, щоб за допомогою показань акселерометра нівелювати дрейф нуля гіроскопа і помилки дискретного інтегрування. В зазначеному виразі, на кожному кроці інтегрування ми коригуємо інтеграл кута нахилу за допомогою показань акселерометра. Сила цієї корекції визначається коефіцієнтом фільтрації K . Отже, щоб забезпечити необхідні властивості фільтра, необхідно правильно вибрати значення параметра K , який визначає вклад показів датчиків. Виразу для комплементарного фільтра відповідає структурна схема на рис. 3.11, де $T_S = \frac{2\pi}{\omega_S}$.

При цьому параметр фільтра K і частота зрізу ω_S пов'язані наступним співвідношенням [78]:

$$K = \frac{1}{1 + \omega_s \Delta t}. \quad (3.16)$$

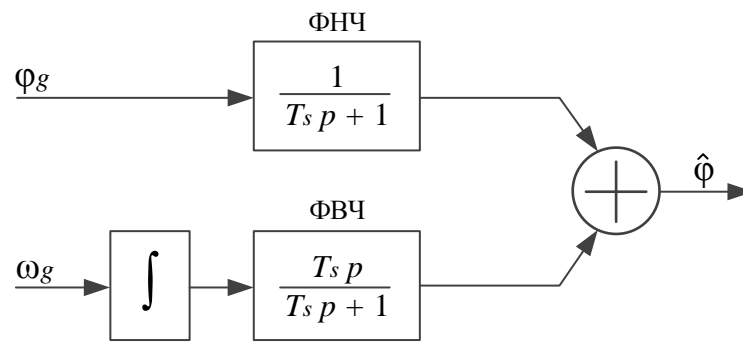


Рис. 3.11. Структурна схема комплементарного фільтра

Як показує практика, значення параметра K потрібно вибирати в діапазоні 0.95 ... 0.99, оскільки при зменшенні значення коефіцієнту фільтра K на вихід фільтра будуть попадати високочастотні завади акселерометра, а при наближенні значення до одиниці, збільшується статична похибка оцінки і час перехідного процесу.

На практиці даний метод оцінки кута має істотний недолік, що обмежує його застосування – вразливість даного фільтра до завад вимірів акселерометра в області середніх частот. Відповідно до структурної схеми (рис. 3.11), частоти зрізу фільтрів акселерометра (ФНЧ) і гіроскопа (ФВЧ) пов'язані один з одним параметром фільтра K , тобто чим нижча частота, на якій завади акселерометра стають істотними, тим нижче повинна бути частота зрізу ФНЧ, відповідно і частота ФВЧ. А зниження частоти зрізу ФВЧ, в свою чергу, призводить до збільшення статичної помилки і часу перехідного процесу. Ця особливість досліджувалась в роботі [79] чисельним експериментом, суть якого полягала в спотворенні сигналу акселерометра коливаннями різної частоти (50, 20 і 5 Гц), імітуючи різного роду впливи на акселерометр.

Частоти 50 Гц і – внутрішній шум датчика; частоти від 5 до 50 Гц відповідають коливанням від ударів, нерівності поверхні, по якій рухається вимірювальна платформа; частоти нижче 5 Гц відповідає лінійним прискоренням.

Результати моделювання (рис. 3.12), проведені для різних значень коефіцієнта фільтра K показали, що фільтр більш вразливий саме до середньочастотних і низькочастотних завад. Для їх усунення необхідно збільшувати коефіцієнт фільтра, а

це в свою чергу призведе до збільшення часу перехідного процесу і помилки оцінки кута (рис. 3.12) [72].

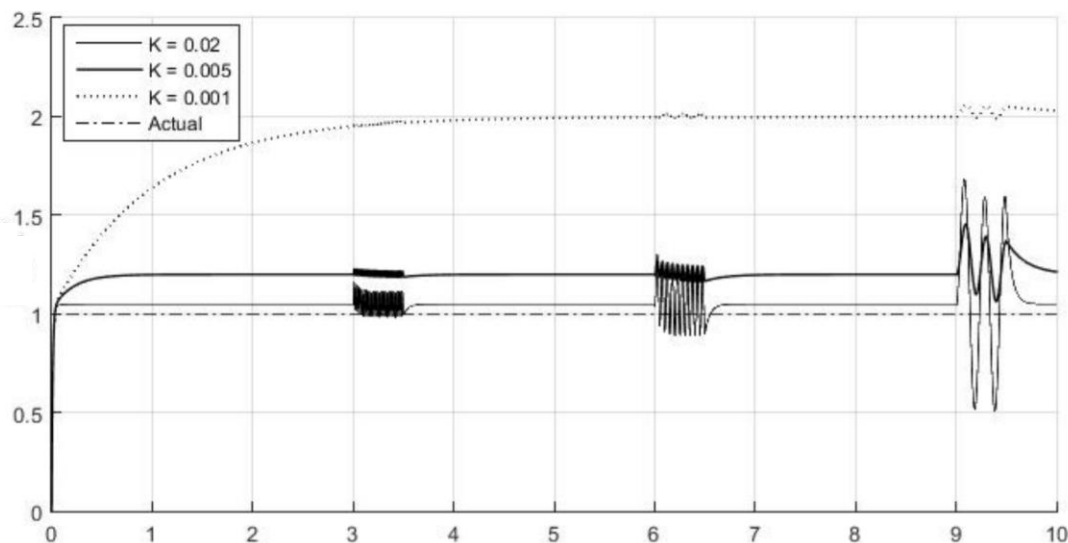


Рис. 3.12. Перехідні процеси комплементарного фільтра

3.2.2. Фільтр Маджвіка

Фільтр Маджвіка - один з новітніх методів розрахунку орієнтації в просторі. Існує два варіанти даного алгоритму комплексування інформації. Перший варіант використовують для побудови систем, що дозволяють визначити кутову орієнтацію об'єкта відносно вертикалі використовуючи дані від акселерометра і гіроскопа. Другий варіант передбачає використання інформації від акселерометра, гіроскопа і магнітометра. В нашому випадку завдання фільтра полягає в обчисленні єдиної оцінки кутового положення отриманої шляхом вимірювань акселерометра і гіроскопа.

Даний фільтр, обробляючи масиви даних, що надходять від датчиків, не має проблем з точністю і налаштуванням параметрів фільтрів на відміну від, наприклад, фільтра Калмана, що буде розглянутий нижче. Для опису просторової орієнтації об'єкта в просторі у трьох вимірах, фільтр Маджвіка використовує кватерніони [80, 81, 82], та дає можливість описати просторове положення кутами Ейлера. Основними перевагами фільтра Маджвіка є «дешевизна» з точки зору обчислювальних ресурсів та ефективність при низьких частотах дискретизації.

Для подальшого опису роботи фільтра визначимо поняття кватерніона та систему позначень. Кватерніон – це чотиривимірне комплексне число, яке може бути

використане для подання орієнтації системи координат в тривимірному просторі. Описати орієнтацію системи відліку B по відношенню до системи відліку A можна за допомогою повороту на кут θ навколо осі ${}^A\hat{r}$ в системі відліку A (рис. 3.13), взаємно ортогональні орти $\hat{x}_A, \hat{y}_A, \hat{z}_A$, і $\hat{x}_B, \hat{y}_B, \hat{z}_B$, визначені головною віссю систем координат A і B відповідно. Кватерніон, що описує цю орієнтацію ${}^A_B\hat{q}$ визначається рівнянням:

$${}^A_B\hat{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4] = \left[\cos \frac{\theta}{2} \quad -r_x \sin \frac{\theta}{2} \quad -r_y \sin \frac{\theta}{2} \quad -r_z \sin \frac{\theta}{2} \right], \quad (3.17)$$

де R_x, R_y і R_z є компонентами вектора ${}^A\hat{r}$ у відповідних осях X, Y і Z системи відліку A .

Щодо позначень: передній нижній індекс позначає цільову систему відліку, верхній індекс – систему відліку, відносно якої задана змінна; Індекс D позначає систему відліку датчика, Z – систему відліку Землі. Протилежно направлені кватерніони позначаються $*$ і використовуються для зміни системи відліку, вектор, протилежно направлений до ${}^A_B\hat{q}$ визначається наступним рівнянням:

$${}^A_B\hat{q}^* = {}^B_A\hat{q} = [q_1 \ -q_2 \ -q_3 \ -q_4]. \quad (3.18)$$

Кватерніон в більшості випадків нормалізований до одиниці, тому має довжину рівну одиниці.

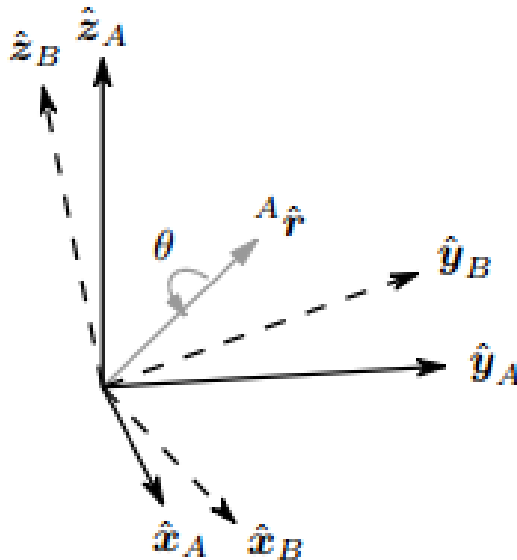


Рис. 3.13. Кватерніон

Кватерніон, який отриманий в результаті операції \times може бути використаний для визначення складових орієнтації, як приклад, для орієнтацій ${}^A_B\hat{q}$ і ${}^B_C\hat{q}$ може бути знайдена ${}^A_C\hat{q}$ за наступною формулою:

$${}^A\hat{q} = {}^B\hat{q} \times {}^A\hat{q}. \quad (3.19)$$

Результат множення двох кватерніонів a і b визначається формулою:

$$a \times b = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] \times [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4] = \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 - a_3 b_4 - a_4 b_3 \\ a_1 b_3 - a_2 b_4 - a_3 b_1 - a_4 b_2 \\ a_1 b_4 - a_2 b_3 - a_3 b_2 - a_4 b_1 \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

при цьому справедливе наступне рівняння: $a \times b \neq b \times a$.

Трьохмірний вектор може бути повернутий на кватерніон рівнянням [83]:

$${}^Bv = {}^A\hat{q} \times {}^Av \times {}^A\hat{q}^*, \quad (3.21)$$

де Av і Bv вектори в системі координат A і B відповідно (кожен вектор, щоб бути чотирьохкомпонентним, тобто кватерніоном, в якості компоненти W містить 0).

Орієнтація, що описана кватерніоном ${}^A\hat{q}$ може бути представлена у вигляді матриці обертання A_R [83]:

$${}^A_R = \begin{bmatrix} 2q_1^2 - 1 + 2q_2^2 & 2(q_2q_3 + q_1q_4) & 2(q_2q_4 - q_1q_3) \\ 2(q_2q_3 - q_1q_4) & 2q_1^2 - 1 + 2q_3^2 & 2(q_3q_4 + q_1q_2) \\ 2(q_2q_4 + q_1q_3) & 2(q_3q_4 - q_1q_2) & 2q_1^2 - 1 + 2q_4^2 \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Кути Ейлера ψ θ та φ описують орієнтацію осей, що досягається шляхом послідовного обертання відносно системи відліку A : за допомогою кута ψ навколо осі Z , θ – навколо осі Y , φ – навколо осі X . Такі кути можна отримати з кватерніона ${}^A\hat{q}$ за допомогою наступних рівнянь:

$$\psi = \text{atan2}(2q_2q_3 - 2q_1q_4, 2q_1^2 + 2q_2^2 - 1); \quad (3.23)$$

$$\theta = -\sin^{-1}(2q_2q_4 + 2q_1q_3); \quad (3.24)$$

$$\varphi = \text{atan2}(2q_3q_4 - 2q_1q_2, 2q_1^2 + 2q_4^2 - 1). \quad (3.25)$$

Отже, перейдемо до розгляду роботи фільтра, спочатку розглянемо можливість визначення просторової орієнтації об'єкта з кутової швидкості. Трьохосьовий гіроскоп вимірює кутові швидкості ω_x , ω_y і ω_z щодо осей X , Y , Z відповідно, в системі відліку датчика. Якщо значення цих швидкостей (рад/сек) перетворити в кватерніон s_ω :

$$s_\omega = [0 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z], \quad (3.26)$$

то похідний кватерніон, що описує швидкість в системі відліку Землі по відношенню до системи відліку датчика $\frac{D}{3}\dot{q}$ може бути обчислений [84] рівнянням:

$$\frac{D}{3}\dot{q}_{\omega,t} = \frac{1}{2} \frac{D}{3}\hat{q} \otimes s_{\omega}. \quad (3.27)$$

За умови, що початкова орієнтація в просторі відома, орієнтація в глобальній системі відліку по відношенню до локальної системи відліку датчика в момент t ($\frac{D}{3}q_{\omega,t}$), може бути обчислена шляхом чисельного інтегрування кватерніонів похідних $\frac{D}{3}\dot{q}_{\omega,t}$ (індекс ω вказує, що кватерніон обчислюється з кутових швидкостей):

$$\frac{D}{3}\dot{q}_{\omega,t} = \frac{1}{2} \frac{D}{3}\hat{q}_{est,t-1} \otimes s_{\omega_t}, \quad (3.28)$$

$$\frac{D}{3}q_{\omega,t} = \frac{D}{3}\hat{q}_{est,t-1} + \frac{D}{3}\dot{q}_{\omega,t}\Delta t, \quad (3.29)$$

де s_{ω_t} – кутова швидкість, виміряна датчиком в момент часу t ; Δt – затримка між вимірами (період дискретизації); $\frac{D}{3}\hat{q}_{est,t-1}$ – попередній результат оцінки орієнтації.

Далі розглянемо можливість визначення просторової орієнтації об'єкта з векторних спостережень. Трьохосьовий акселерометр вимірює вектор сили тяжіння в локальній системі координат разом з лінійними прискореннями. В початковий момент часу фільтр буде припускати, що акселерометр буде вимірювати тільки гравітацію, магнітометр, за умови його використання, – тільки магнітне поле Землі.

Якщо напрямок поля Землі відомо в її системі координат, то вимірювання напрямку в системі координат датчика дозволить розрахувати положення системи координат датчика щодо системи координат Землі. У деяких випадках можна рішення представити у вигляді кутів Ейлера, де буде два відомих кута і один невідомий. Невідомий кут буде обертатися навколо осі паралельної напрямку поля. Для подання рішення кватерніонами потрібне комплексне рішення. Цього можна досягти шляхом оптимізації, де орієнтація датчика $\frac{D}{3}\hat{q}$ це те, що вирівнює визначений заздалегідь напрямок поля в земній системі координат ${}^3\hat{d}$, з вимірним напрямком в системі координат датчика ${}^A\hat{d}$ за допомогою операції обертання, яка визначається рівнянням (3.21). Тому $\frac{D}{3}\hat{q}$ може бути знайдено як рішення наступного рівняння:

$$\min_{\frac{D}{3}\hat{q} \in \mathbb{R}^4} f\left(\frac{D}{3}\hat{q}, {}^3\hat{d}, {}^A\hat{S}\right), \quad (3.30)$$

де цільову функцію визначає рівняння:

$$f(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}, \overset{3}{\hat{d}}, \overset{D}{\hat{S}}) = \overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}^* \otimes \overset{3}{\hat{d}} \otimes \overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}} - \overset{D}{\hat{S}}. \quad (3.31)$$

Компоненти кожного вектора визначаються в рівняннях:

$$\overset{S}{E}\hat{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4], \quad (3.32)$$

$$\overset{3}{\hat{d}} = [0 \quad d_x \quad d_y \quad d_z], \quad (3.33)$$

$$\overset{D}{\hat{S}} = [0 \quad s_x \quad s_y \quad s_z]. \quad (3.34)$$

Існує безліч алгоритмів оптимізації, але метод градієнтного спуску є одним з найпростіших в реалізації і обчисленнях. Даний метод для n ітерацій в результаті оцінки орієнтації $\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{n+1}$ на основі «початкового наближення» орієнтації $\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_0$ та розміру кроку μ описує рівняння:

$$\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{k+1} = \overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k - \mu \frac{\nabla f(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k, \overset{3}{\hat{d}}, \overset{D}{\hat{S}})}{\|\nabla f(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k, \overset{3}{\hat{d}}, \overset{D}{\hat{S}})\|}, k = 0, 1, 2 \dots n. \quad (3.35)$$

Градієнт поверхні рішень:

$$\nabla f(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k, \overset{3}{\hat{d}}, \overset{D}{\hat{S}}) = J^T(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k, \overset{3}{\hat{d}}) f(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k, \overset{3}{\hat{d}}, \overset{D}{\hat{S}}), \quad (3.36)$$

яка визначається цільовою функцією:

$$f(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k, \overset{3}{\hat{d}}, \overset{D}{\hat{S}}) = \begin{bmatrix} 2d_x \left(\frac{1}{2} - q_3^2 - q_4^2 \right) + 2d_y (q_1 q_4 + q_2 q_3) + 2d_z (q_2 q_4 - q_1 q_3) - s_x \\ 2d_x (q_2 q_3 - q_1 q_4) + 2d_y \left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_4^2 \right) + 2d_z (q_1 q_2 + q_3 q_4) - s_y \\ 2d_x (q_1 q_3 + q_2 q_4) + 2d_y (q_3 q_4 - q_1 q_2) + 2d_z \left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2 \right) - s_z \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

і її якобіан, спрощений до трикомпонентних векторів:

$$J^T(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_k, \overset{D}{\hat{d}}) = \begin{bmatrix} 2d_y q_4 - 2d_z q_3 & 2d_y q_3 + 2d_z q_4 \\ -2d_x q_4 + 2d_z q_2 & -4d_y q_2 + 2d_y q_2 - 2d_z q_1 \\ 2d_x q_3 - 2d_y q_2 & -4d_z q_2 + 2d_x q_4 - 2d_y q_1 \\ -4d_x q_3 + 2d_y q_2 - 2d_z q_1 & 4d_x q_4 + 2d_y q_1 + 2d_z q_2 \\ 2d_x q_2 + 2d_z q_4 & -4d_y q_4 + 2d_z q_3 - 2d_x q_1 \\ -4d_z q_3 + 2d_x q_1 + 2d_y q_4 & 2d_x q_2 + 2d_y q_3 \end{bmatrix}. \quad (3.38)$$

Рівняння (3.35) – (3.38) описують загальний вигляд алгоритму, що застосовується до поля, спочатку орієнтованого в будь-якому напрямку. Однак, якщо напрямок поля можна розглядати тільки в одній або двох осях глобальної системи координат, рівняння спрощується. Відповідна умова буде припускати, що напрямок

сили тяжіння направлено вертикально, уздовж осі Z , як показано в рівнянні (3.39). Підставляючи кватерніон ${}^3\hat{g}$ і нормалізовані вимірювання акселерометра ${}^D\hat{a}$, ${}^3\hat{d}$, ${}^D\hat{s}$, і відповідно з рівняння (3.37) і (3.38) отримаємо рівняння (3.41) і (3.42):

$${}^3\hat{g} = [0 \ 0 \ 0 \ 1], \quad (3.39)$$

$${}^D\hat{a} = [0 \ a_x \ a_y \ a_z], \quad (3.40)$$

$$f_g({}^D_3\hat{q}, {}^D\hat{a}) = \begin{bmatrix} 2(q_2q_4 - q_1q_3) - a_x \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) - a_y \\ 2\left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2\right) - a_z \end{bmatrix}, \quad (3.41)$$

$$J_g({}^D_3\hat{q}) = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.42)$$

Напрямок магнітного поля землі також можна вважати таким, що розташований в одній площині та вимірюється по горизонтальній та вертикальній осях. Вертикальна складова залежить від точок на земному шарі, в якому відбувається зміна. Для Англії це значення знаходиться в межах від 65 до 70 градусів відповідно до горизонту [85]. Це може бути представлено рівнянням (3.43). Підставивши ${}^D\hat{b}$ та нормалізовані значення вимірювань ${}^D\hat{m}$, ${}^3\hat{b}$ та ${}^D\hat{s}$ відповідно, в рівняння (3.37) та (3.38) отримаємо рівняння (3.45) та (3.46):

$${}^3\hat{b} = [0 \ b_x \ d_y \ b_z], \quad (3.43)$$

$${}^D\hat{m} = [0 \ m_x \ m_y \ m_z], \quad (3.44)$$

$$f_b({}^D_3\hat{q}, {}^D\hat{b}, {}^D\hat{m}) = \begin{bmatrix} 2b_x\left(\frac{1}{2} - q_3^2 - q_4^2\right) + 2b_z(q_2q_4 - q_1q_3) - m_x \\ 2b_x(q_2q_3 - q_1q_4) + 2b_z(q_1q_2 + q_3q_4) - m_y \\ 2b_x(q_1q_3 + q_2q_4) + 2b_z\left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2\right) - m_z \end{bmatrix}, \quad (3.45)$$

$$J_b({}^D_3\hat{q}, E_{\hat{b}}) = \begin{bmatrix} -2b_zq_3 & 2b_zq_4 & -4b_xq_3 - 2b_zq_1 & -4b_xq_4 + 2b_zq_2 \\ -2b_xq_4 + 2b_zq_2 & 2b_xq_3 + 2b_zq_1 & 2b_xq_2 + 2b_zq_4 & -2b_xq_1 + 2b_zq_3 \\ 2b_xq_3 & 2b_xq_4 - 4b_zq_2 & 2b_xq_1 - 4b_zq_3 & 2b_xq_2 \end{bmatrix}. \quad (3.46)$$

Як вже було зазначено, вимірювання сили тяжіння або магнітного поля Землі самі по собі не дозволяють отримати унікальну орієнтацію датчика, для цього вимірювання та відношення цих двох полів повинно бути об'єднано відповідно до

рівнянь (3.47) та (3.48). У той час, як поверхня рішень, створена цільовими функціями в рівняннях (3.41) та (3.45) має, мінімум, визначений відповідно до поверхні рішень, за допомогою рівняння (3.47) і мінімум, визначений за однією точкою, за умови, що $b_x \neq 0$:

$$f_{g,b}(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}, \overset{D}{\hat{a}}, \overset{3}{\hat{b}}, \overset{D}{\hat{m}}) = \begin{bmatrix} f_g(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}, \overset{D}{\hat{a}}) \\ f_b(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}, \overset{3}{\hat{b}}, \overset{D}{\hat{m}}) \end{bmatrix}, \quad (3.47)$$

$$J_{g,b}(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}, \overset{3}{\hat{b}}) = \begin{bmatrix} J_g^T(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}) \\ J_b^T(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}, \overset{3}{\hat{b}}) \end{bmatrix}. \quad (3.48)$$

Традиційний підхід до оптимізації потребує декількох ітерацій порівнянь (3.35), щоб вичислити результат для кожної нової орієнтації та відповідних вимірювань датчиків. Ефективні алгоритми вимагають також розмір кроку μ для корекції результату на кожній ітерації до оптимального значення, як правило, отримується на основі другої похідної цільової функції. Для нас прийнятне вирахування однієї ітерації на відлік часу за умови, що швидкість збіжності регулюється μt рівна або більше, чим фізична швидкість змін орієнтацій. Рівняння (3.49) розраховує приблизний напрямок $\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{\nabla,t}$ розрахований в момент часу t на основі попередньої оцінки орієнтації $\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{est}$ та цільової функції градієнта ∇f , що визначається шляхом вимірювань датчиків $\overset{D}{\hat{a}}_t$ і $\overset{D}{\hat{m}}_t$ в момент часу t . Форма ∇f вибирається відповідно до датчиків, що використовуються, як показано в рівнянні (3.50). Індекс ∇ означає, що кватерніон розраховується з використанням методу градієнтного спуску:

$$\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{\nabla,t} = \overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{\nabla,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|}, \quad (3.49)$$

$$\nabla f = \left\{ \begin{array}{l} J_g^T(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{est,t-1}) f_g(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{est,t-1}, \overset{D}{\hat{a}}_t) \\ J_{g,b}^T(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{est,t-1}, \overset{3}{\hat{b}}) f_{g,b}(\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{est,t-1}, \overset{D}{\hat{a}}, \overset{3}{\hat{b}}, \overset{D}{\hat{m}}) \end{array} \right\}. \quad (3.50)$$

Оптимальне значення μt може бути визначене як таке, що забезпечує швидкість збіжності $\overset{D}{\underset{3}{\hat{q}}}_{\nabla,t}$ та обмежується фізичною швидкістю орієнтації, оскільки це дозволяє уникнути занадто великого розміру кроку. Тому μt може бути вираховано за допомогою рівняння (3.51), де Δt – це час між вимірами, $\overset{D}{\underset{3}{\dot{q}}}_{\omega,t}$ – це фізична швидкість

змін орієнтацій, виміряна гіроскопом, α – це збільшення μ для врахування шуму при вимірюваннях акселерометром та магнітометром:

$$\mu_t = \alpha \left\| \frac{D}{3} \dot{q}_{\omega,t} \right\| \Delta t, \alpha > 1. \quad (3.51)$$

Розглянемо далі алгоритм об'єднувального фільтра. Ми бачимо, що орієнтація датчика по відношенню до Землі $\frac{D}{3} \hat{q}_{est,t}$ може бути отримана шляхом об'єднання розрахунків орієнтації $\frac{D}{3} q_{\omega,t}$ і $\frac{D}{3} q_{\nabla,t}$ що розраховуються за допомогою рівнянь (3.29) і (3.49) відповідно. Об'єднання і описується рівнянням (3.52), де γ_t та $(1 - \gamma_t)$ - це ваги, що застосовуються до кожного розрахунку орієнтації:

$$\frac{D}{3} \hat{q}_{est,t} = \gamma_t \frac{D}{3} q_{\nabla,t} + (1 - \gamma_t) \frac{D}{3} q_{\omega,t}, \quad 0 \leq \gamma_t \leq 1. \quad (3.52)$$

Оптимальне значення γ_t може бути визначено як таке, при якому зважена розбіжність дорівнює зваженій збіжності $\frac{D}{3} q_{\nabla}$. Це представлено рівнянням (3.53), де $\frac{\mu_t}{\Delta t}$ - це швидкість збіжності Δt , а β - це швидкість розбіжності $\frac{D}{3} q_{\omega}$, виражена у вигляді величини кватерніона, похідного від відповідної похибки вимірювань гіроскопа. Рівняння (3.53) може бути змінено, щоб визначити γ_t в рівняння (3.54):

$$(1 - \gamma_t) \beta = \gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t} \quad (3.53)$$

$$\gamma_t = \frac{\beta}{\frac{\mu_t}{\Delta t} + \beta} \quad (3.54)$$

Рівняння (3.52) і (3.54) забезпечують оптимальне поєднання $\frac{D}{3} q_{\nabla,t}$ і $\frac{D}{3} q_{\omega,t}$ за умови, що швидкість збіжності $\frac{D}{3} q_{\nabla}$ регулюється α , яка більше або дорівнює ніж фізична швидкість зміни орієнтації. Тому α не має верхньої межі. Якщо вважати α дуже великий, то μt визначається виразом (3.51), а також стає і дуже великим значення в спрощеному рівнянні фільтра орієнтації. Великі значення μt використані в рівнянні (3.49) означають, що стає зневажливо мало і рівняння можна переписати у вигляді виразу (3.55):

$$\frac{D}{3} q_{\nabla,t} \approx -\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (3.55)$$

Рівняння (3.54), обчислює γ_t , може бути додатково спрощено шляхом прийняття незначності величин β в знаменнику і вираз тоді можна переписати у вигляді рівняння (3.56). З рівняння (3.56) цілком можливо, що $\gamma_t \approx 0$:

$$\gamma_t \approx \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \quad (3.56)$$

Підставляючи рівняння (3.29), (3.55) і (3.56) в рівняння (3.52) отримуємо безпосередньо рівняння (3.57). Зверніть увагу, що γ_t в рівнянні (3.57) замінюється і як вираз (3.55) і як 0:

$$\frac{D}{3}q_{\nabla,t} = \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \left(-\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \right) + (1 - 0) \left(\frac{D}{3}\hat{q}_{est,t-1} + \frac{D}{3}\dot{q}_{\omega,t} \Delta t \right) \quad (3.57)$$

Рівняння (3.57) можна спростити до рівняння (3.58), де $\frac{D}{3}\dot{q}_{est,t}$ - це розрахункова швидкість зміни орієнтації, яка визначається виразом (3.59); $\frac{D}{3}\dot{\hat{q}}_{est,t}$ - це напрямок помилки $\frac{D}{3}\dot{q}_{est,t}$, яке визначається виразом (3.60):

$$\frac{D}{3}q_{est,t} = \frac{D}{3}\hat{q}_{est,t-1} + \frac{D}{3}\dot{q}_{est,t} \Delta t, \quad (3.58)$$

$$\frac{D}{3}\dot{q}_{est,t} = \frac{D}{3}\dot{q}_{\omega,t} - \beta \frac{D}{3}\dot{\hat{q}}_{est,t}, \quad (3.59)$$

$$\frac{D}{3}\dot{\hat{q}}_{est,t} = \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|}. \quad (3.60)$$

З рівнянь (3.58), (3.59) і (3.60) бачимо, що фільтр обчислює орієнтацію $\frac{D}{3}q_{est}$ шляхом чисельного інтегрування розрахункової швидкості орієнтації $\frac{D}{3}\dot{q}_{est}$. Фільтр обчислює $\frac{D}{3}\dot{q}_{est}$ як швидкість зміни орієнтації, яка вимірюється гіроскопом, але ще й з помилкою вимірювання гіроскопа, β - це компенсація в напрямку передбачуваної помилки; $\frac{D}{3}\dot{\hat{q}}_{est}$ обчислюється на підставі вимірів акселерометра і магнітометри, блок-схема фільтра представлена на рис. 3.14 [88].

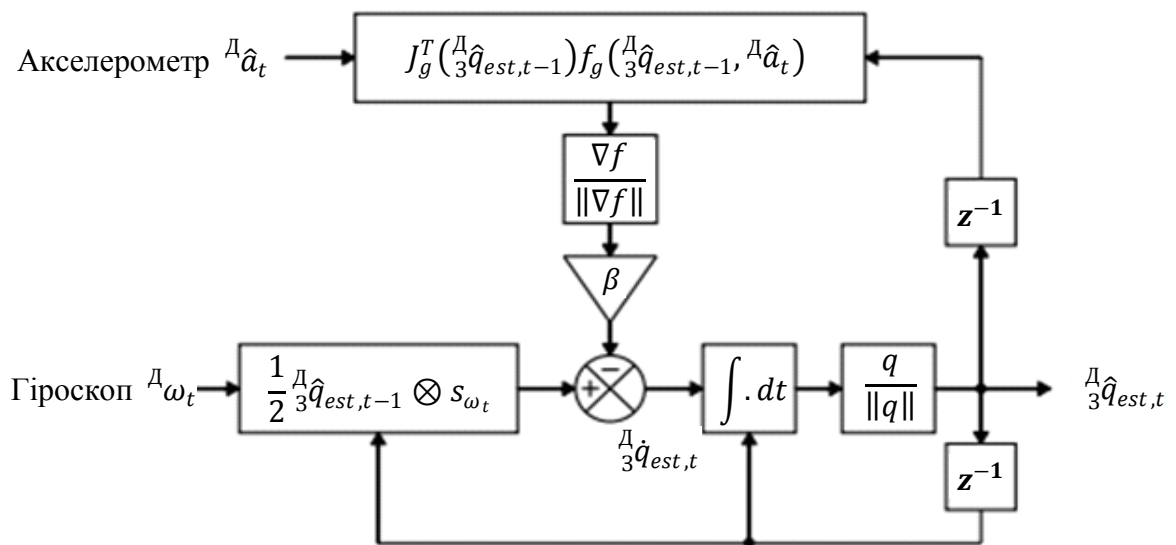


Рис. 3.14. Блок-схема фільтра орієнтації

3.2.3. Фільтр Калмана

При вирішенні задач оптимальної оцінки і керування в динамічних системах ключовою проблемою являється наявність шумів вимірювання. Для їхнього усунення традиційно застосовують алгоритми статистичного оцінювання, які використовують апіорну інформацію про статистичні властивості процесу, що протікає, його вимірювання і незміщену оцінку з мінімізацією дисперсії її помилки, що відносяться до фільтрів Калманівського типу. Ефективність їхньої роботи сильно залежить від ступеню адекватності побудованої моделі реальним характеристикам системи [89].

При використанні у вимірювальній системі датчиків, що видають покази з присутністю шумів, характеристики яких залежать від сукупності зовнішніх факторів і не можуть бути передбачені до початку вимірювань, використання класичної парадигми Калманівської фільтрації стає ускладненим [90]. Вихід може полягати у збільшенні кількості чутливих елементів в системі, що дублюють і доповнюють одне одного. Подібний підхід може бути виправданий, якщо характеристики шумів датчиків мають принципові відмінності. Як і в даному випадку, система складається з датчика кутових швидкостей і акселерометра [64, 91]. Як і було зазначено вище, датчик кутових швидкостей видає достатньо точні значення вимірювань на коротких проміжках часу, але йому властивий низькочастотний дрейф, що приводить до накопичення помилки, акселерометр – навпаки, видає незміщені, але зашумлені у високочастотній області покази [92].

Фільтр Калмана на кожному ітеративному кроці оцінює вектор стану динамічної системи у два етапи (кроки) [42]. На першому кроці здійснюється прогнозування наступного значення стану системи на підставі попередніх значень, на другому кроці поточне значення стану системи оцінюється на підставі результатів прогнозування та отриманих в цей момент істинних вимірювань (рис. 3.15) [93, 94].

1. Перший крок – етап передбачення:

1.1. Передбачення стану системи:

$$\hat{x}_k^- = F \cdot \hat{x}_{k-1} + B \cdot u_{k-1}, \quad (3.61)$$

де \hat{x}_k^- – передбачення стану системи в поточний момент часу (момент часу k);

F – матриця переходу між станами (динамічна модель системи);

\hat{x}_{k-1} – передбачення стану системи в момент часу $k - 1$;

B – матриця застосування керуючого впливу;

u_{k-1} – керуючий вплив в момент часу $k - 1$.

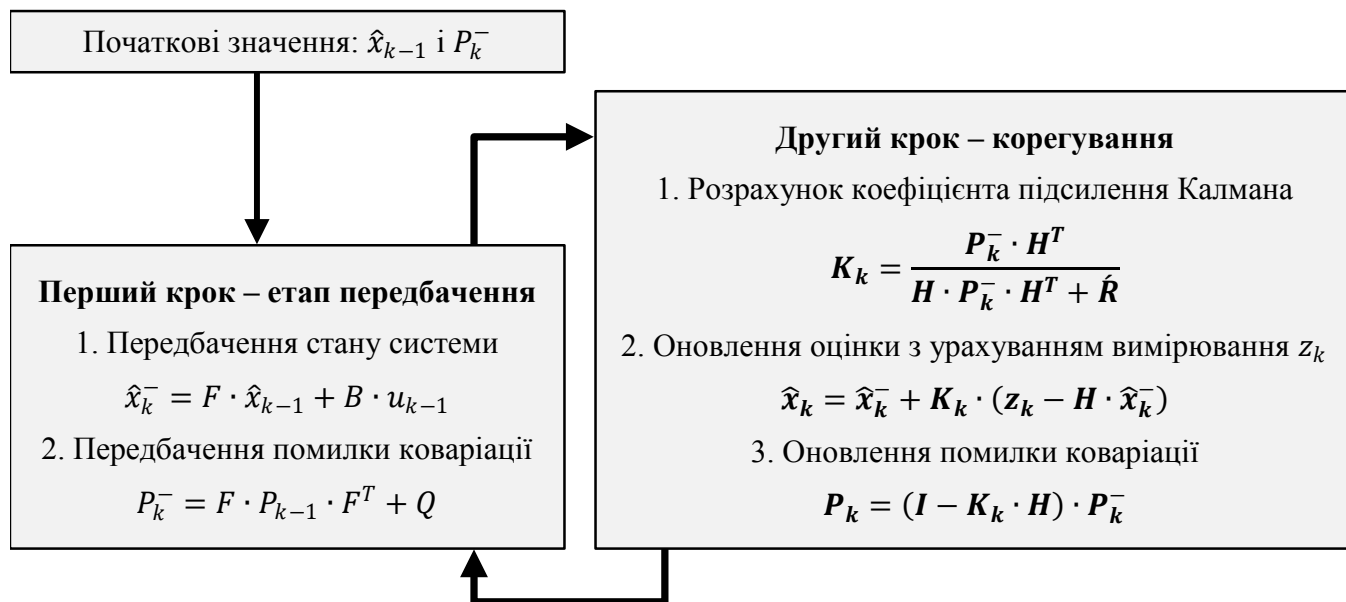


Рис. 3.15. Алгоритм роботи фільтра Калмана

1.2. Передбачення помилки коваріації:

$$P_k^- = F \cdot P_{k-1} \cdot F^T + Q, \quad (3.62)$$

де P_k^- – прогноз помилки в момент часу k ;

P_{k-1} помилка в момент часу $k - 1$;

Q – коваріація шуму процесу.

2. Другий крок – корегування:

2.1. Розрахунок коефіцієнта підсилення Калмана:

$$K_k = \frac{P_k^- \cdot H^T}{H \cdot P_k^- \cdot H^T + \hat{R}}, \quad (3.63)$$

де K_k – коефіцієнт підсилення калмана;

H – матриця вимірювань, що відображає відношення вимірювань і станів;

\hat{R} – коваріація шуму вимірювання.

2.2. Оновлення оцінки з урахуванням вимірювання z_k :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot (z_k - H \cdot \hat{x}_k^-), \quad (3.64)$$

де z_k – вимірювання в поточний момент часу.

2.3. Оновлення помилки коваріації:

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k^- \quad (3.65)$$

де I – матриця ідентичності [95].

Отримана у результаті корегування величина є апостеріорною оцінкою вектора стану системи. Апостеріорна оцінка і є кінцевим результатом роботи фільтра [96].

3.3. Експериментальне дослідження точності визначення просторової орієнтації вимірювальної платформи

Розглянувши теорію алгоритмів 3-ох найбільш розповсюджених (для поставленої задачі) фільтрів: комплементарного, фільтра Маджвіка та фільтра Калмана, перейдемо до практичної їх реалізації. Оцінимо точність визначення кутової орієнтації вимірювальної платформи (ВП) і саме за цим критерієм визначимо оптимальний варіант фільтра.

Для порівняння точності визначення кутового положення вимірювальної платформи було використано 3 типи *IMU*: *pr530al*, *ADXL 335 (Analog Devices)*, *MPU-6050 (InvenSense)* та *BNO055 (BOSH)*, тобто інформація від кожного з 3-ох типів запропонованих *IMU* комплексувалась розглянутими вище алгоритмами фільтрації.

Для проведення експерименту мною була розроблена і виготовлена лабораторна установка, за допомогою якої було проведено експериментальні вимірювання кутів просторової орієнтації. Основою лабораторної установки послужив поворотний кронштейн КП-9 (рис. 3.16).

Блок датчиків *IMU* встановлюється на кріпильних отворах. Абсолютне значення кута повороту кронштейна фіксується енкодером (*INC-6H-58.060-161001-SSII-AC1-12-S*), розрядність якого становить 16 біт, роздільна здатність – $0,0055^\circ$. При повороті кронштейна, сирі значення виміряні датчиками передаються на мікроконтроллер (*ATmega328*, на базі апаратно-програмної платформи *Arduino UNO R3*), який їх синхронізує з абсолютним значенням кута повороту, далі фільтрується на ПК. Блок-схема експериментальної установки представлена на рис. 3.17.

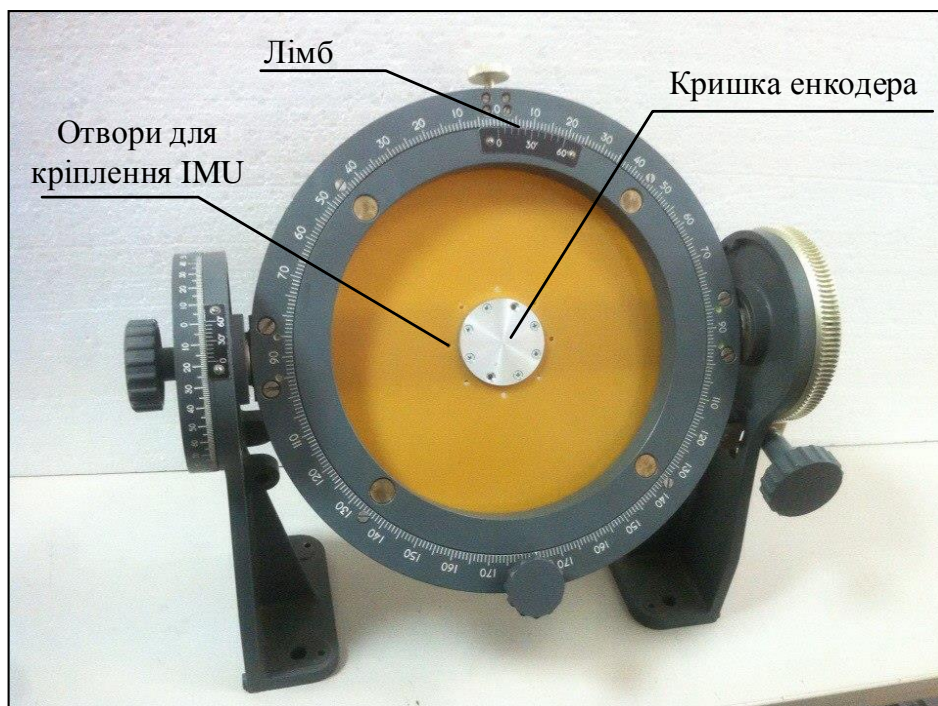


Рис. 3.16. Поворотний кронштейн КП-9

Для комплексування інформації (реалізації алгоритмів фільтрації), мною було запропоновано використання програмного середовища *MATLAB*, що дало можливість не обмежувати експеримент «обчислювальними потужностями» при розрахунку орієнтації вимірювальної платформи. Пристрій і відповідне програмне забезпечення використовують сирі дані з датчиків. Особливістю отримання інформації від *IMU* до складу якого входить 3-осьовий датчик кутової швидкості *rg530a1* та 3-осьовий акселерометром *ADXL 335* є необхідність використання АЦП, оскільки вони аналогові, натомість *IMU* з датчиками *MPU-6050* та *BNO055* – цифрові і позбавлені цього недоліку [97, 98].

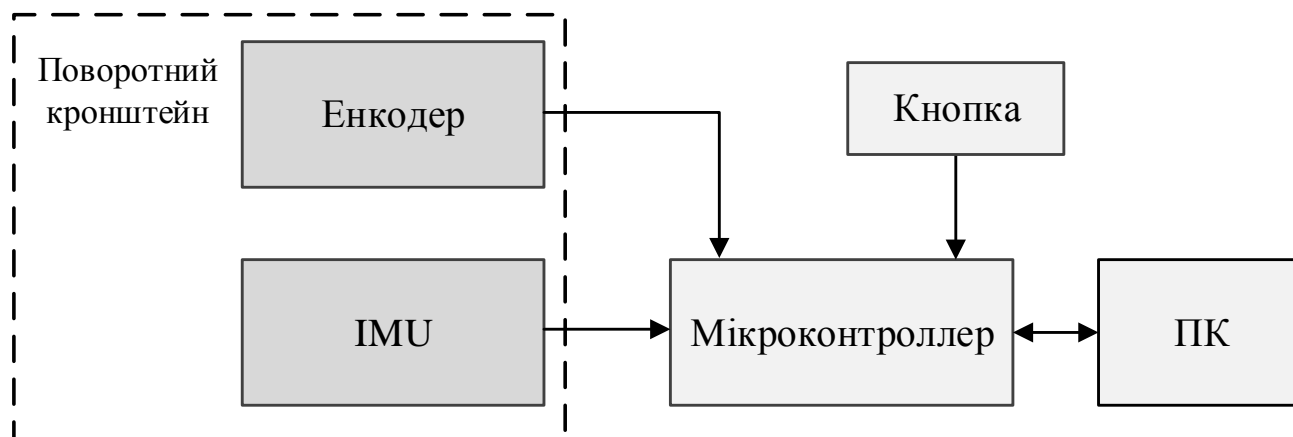


Рис. 3.17. Блок-схема експериментальної установки

Алгоритм проведення дослідження полягає в тому, щоб в ручну повернувши *IMU*, встановлену у поворотному кронштейні на певний кут (в даному експерименті діапазон кутів повороту складає від -5° до $+5^\circ$) зафіксувати дані натиском на кнопку – це фіксується програмним забезпеченням і при кожному наступному вимірюванні формується масив даних $\Delta\alpha_i$ (різниця між виміряним і абсолютним значенням), розмірність якого збільшується на 1. Процес проведення досліджень є досить трудомістким, оскільки для кожного типу *IMU* було отримано 1000 ($i=1000$) вимірювань (такий процес займає, орієнтовно від 3 год до 3,5 год). Отримавши, в процесі проведення експерименту, масив вимірних даних, маємо можливість побудувати щільності розподілу похибок вимірювання (рис. 3.18), задля оцінки їхніх характеристик. З отриманих статистичних масивів даних отримуємо значення СКВ помилки вимірювання (σ_ε), значення яких представлені в табл. 3.1. Як видно з графіків на рис. 3.18, щільність розподілу похибки вимірювання розподілена за нормальним законом, що підтверджує обраний нами закон розподілу похибки вимірювання профілю поверхні, що досліджується при моделюванні процесу її відтворення ітеративним методом (розглянуто в попередньому розділі).

Таблиця 3.1.

Отримані експериментально значення σ_ε .

	Комплементарний фільтр	Фільтр Маджвіка	Фільтр Калмана
pr530al, 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)

Отже, враховуючи досягнуті значення точності σ_ε , що представлені в табл. 3.1, для комплексування даних від MEMS-датчиків оптимальним (за критерієм точності), в розглянутому випадку, виявився алгоритм фільтра Калмана. Хоча досягнуті точності при комплексуванні даних алгоритмом фільтра Маджвіка теж показав хороший результат і такий алгоритм, враховуючи меншу його потребу в

обчислювальних «потужностях», на відміну від фільтра Калмана, має великі перспективи у використанні.

Також, хочу зазначити, що всі дослідження проводились в статиці, тому за допомогою комплементарного фільтра вдалося досягнути достатньо високої точності вимірювання ($\sigma_\varepsilon = 0,0461^\circ$), але в динаміці ці показники будуть значно гірші, через тривалий перехідний процес.

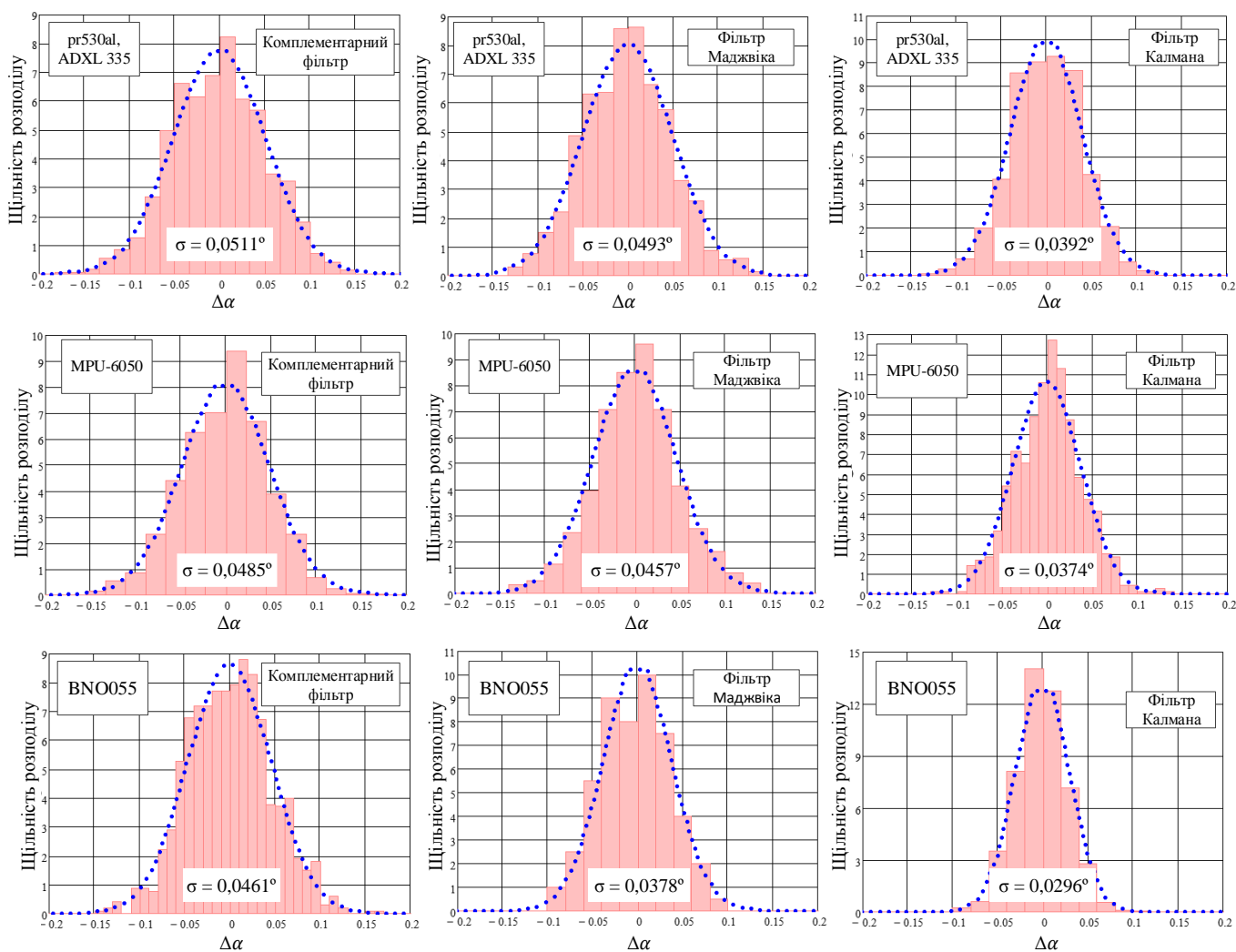


Рис. 3.18. Щільності розподілу похибки вимірювання, σ_ε .

Окрім алгоритмів комплексування (відповідно з результатами, наведеними в табл. 3.1) на точність вимірювання кутового положення вимірювальної платформи впливають і точності датчиків, розглянуті 3 типи *IMU* це підтверджують. Задіяні в експерименті аналогові датчики (*pr530al* та *ADXL 335*) [99, 100], займаючи найнижчу цінову категорію, відповідно з високим рівнем шумів акселерометра, та дрейфом нуля гіроскопа, показали свою найменшу ефективність. Отже, при необхідності

підвищення достовірності діагностування кутового положення вимірювальної платформи, питання вибору датчиків потребує значної уваги [101, 102].

Досягнутий рівень точності вимірювання $\sigma_\varepsilon = 0,0296^\circ$ шляхом використання датчика *BNO055* виробництва фірми *BOSH*, та алгоритму Калманівської фільтрації, дає нам можливість отримати точнісні характеристики відновлення профілю поверхні, що досліджується. Отже, залежність СКВ помилки відтвореного ітеративним шляхом профілю поверхні від довжини цього профілю та при фіксованих значеннях кроку вимірювання ($\sigma_{\text{проф.}} = f(X, L_i)$) представлена на рис. 3.19.

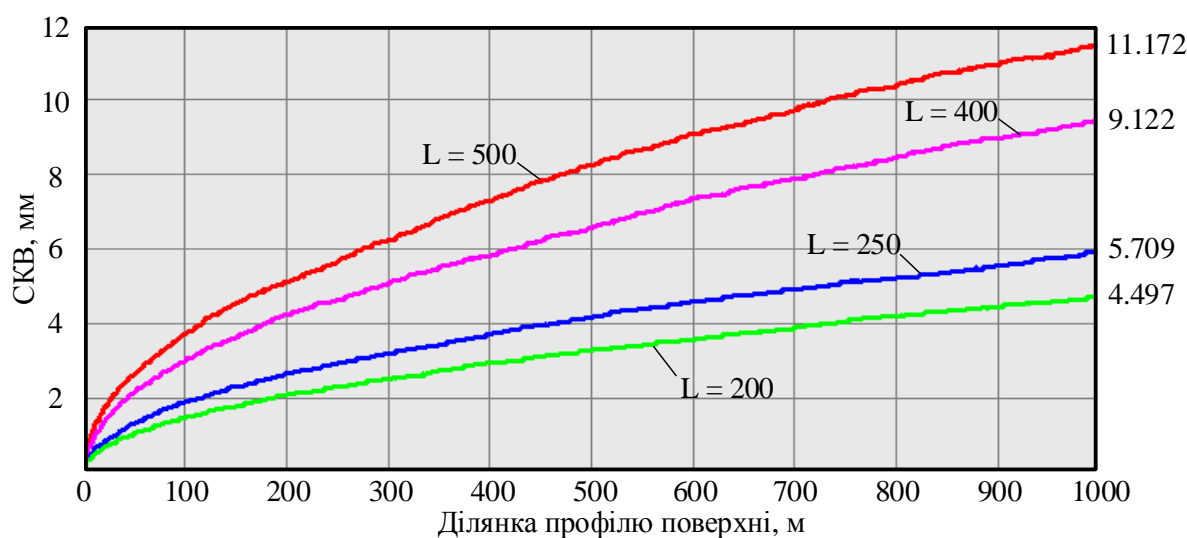


Рис. 3.19. Залежність СКВ помилки вимірювання профілю поверхні від її довжини, при фіксованих значеннях кроку вимірювання, $\sigma_{\text{проф.}} = f(X, L_i)$.

Відштовхуючись від значення точності вимірювального засобу ($\sigma_\varepsilon = 0,0296^\circ$), отриманого експериментальним шляхом, проведемо розрахунок значень помилок діагностування, запропонованого індикаторного методу вимірювання. Перед проведенням розрахунків потрібно провести нормування величини z – нормованого значення похибки засобу вимірювання. Якщо перед нами стоїть завдання провести діагностування поперечного ухилу асфальтобетонного дорожнього покриття з подальшим прийняттям рішення «норма» або «не норма», то відповідно до нормативних документів [2] $\sigma_x = 2,5\%$. Оскільки $\sigma_\varepsilon = 0,0296^\circ = 0,517\%$, $z = \sigma_\varepsilon / \sigma_x$, то $z = 0,21$.

На рис. 3.20 представлено залежність помилок першого і другого роду від величини поля допуску ($\alpha = f(\delta)$ і $\beta = f(\delta)$) – ліва вісь, а також на одному полі

графіка побудовано залежність достовірності діагностування від поля допуску ($D = f(\delta)$) – права вісь. Зведемо результати розрахунків, представлені на рис. 3.20 в таблицю 3.2.

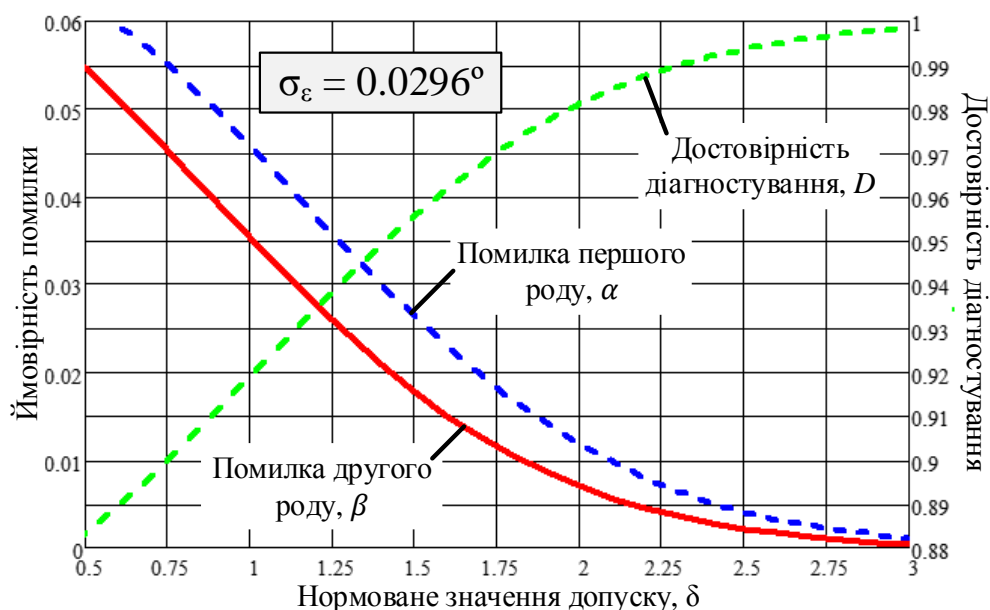


Рис. 3.20. Залежність помилок вимірювання та достовірності діагностування від величини допуску на ДП, при фіксованому значенні $\sigma_\varepsilon = 0,0296^\circ$.

Таблиця 3.2

Зведені результати розрахованих значень помилок діагностування та достовірності діагностування

$\sigma_\varepsilon = 0,0296^\circ$	Відносне значення допуску, δ				
	0.5	1	1.5	2	2.5
α	0,062	0,046	0,026	0,012	0,0042
β	0,055	0,035	0,018	0,007	0,0022
D	0,883	0,919	0,956	0,981	0,994

Висновки

1. Враховуючи розглянуті переваги і недоліки МЕМС-датчиків, зокрема акселерометра і гіроскопа, обґрунтована необхідність фільтрації їхніх даних для задачі оцінки кута відхилення від горизонту.

2. Розглянуто 3 алгоритми комплексування інформації: комплементарний фільтр, фільтр Калмана та фільтр Маджвіка. Фільтр Калмана є одним з найбільш розповсюджених алгоритмів визначення кутової орієнтації. Широке застосування

алгоритму Калманівської фільтрації є доказом його точності та ефективності, але він достатньо складний для реалізації. Вимагає високу частоту дискретизації. Комплементарний фільтр є частковим випадком фільтра Калмана і базується на фіксації коефіцієнта фільтра на користь акселерометра або гіроскопа, такий підхід є простим, але може бути ефективним лише при обмежених умовах використання. Алгоритм фільтра Маджвіка на відміну від Калмана, потребує менших обчислювальних потужностей, і, в більшості випадків має меншу точність.

3. Розроблено та виготовлено експериментальну установку на основі поворотного кронштейну КП-9, за допомогою неї проведено експериментальні вимірювання кутів просторової орієнтації. Розроблено методику вимірювання. Дослідження проводились з використанням 3-ох типів *IMU*: 1) з датчиками *pr530al* та *ADXL 335*, 2) *MPU-6050*, 3) *BNO055*. Проведено порівняння точності вимірювання розглянутих алгоритмів фільтрації з використанням різних типів *IMU*. Встановлено, що найбільшу точність визначення кута просторової орієнтації забезпечує алгоритмом фільтра Калмана. При Калманівській фільтрації даних від датчика *BNO055* отримано значення СКВ помилки вимірювання кутового положення, $\sigma_\varepsilon = 0,0296^\circ$.

4. На основі досягнутого експериментально рівня точності вимірювання кута просторової орієнтації, досліджено точнісні характеристики профілю поверхні при ітеративному методі його відтворення, та розраховано достовірність діагностування при індикаторному методі діагностування ухилів.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МАКЕТУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЗДОВЖНИХ ТА ПОПЕРЕЧНИХ УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНИХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЗАМІРІВ

При будівництві нових аеропортів в Україні в 2011-2012 роках потрібно було забезпечити високу якість покриття злітно-посадкових смуг, зокрема відповідність параметрів шорсткості, поздовжніх та поперечних ухилів діючим європейським стандартам та нормам ІКАО. Відповідальність за науково-методичну сторону проведення робіт була покладена на ДПТ НДІ ЦА “Украеропроект” [103].

Поздовжні і поперечні ухили ЗПС геодезичними методами вимірюються з кроком порядку 60 м, тобто в цьому проміжку, що дорівнює 8 плитам (розмір плити 7,5 x 7, 5 м²), не контролюються ні ухили, ні нерівності кожної плити. Тому на каф. Авіоніки спільно ДПТ НДІ ЦА “Украеропроект” (договір № 753-ХІІ) був розроблений діючий модуль для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності. Заміри ухилів та рівності були проведені при будівництві нової злітно-посадкової смуги (ЗПС) в міжнародному аеропорті «Харків» (Основа). Проведені випробовування показали доцільність досліджень в даному напрямку. Розробка методу і приладу вимірювання ухилів та нерівностей ЗПС підвищить якість контролю поверхні ЗПС при будівництві та безпеку експлуатації авіаційного транспорту [104].

Вимірювальний модуль є рухомою платформою, переміщуваною 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 [104, 105].

Як датчики ухилів використовуються акселерометри і гіроскопи, виконані за мікросхемною *MEMS*-технологією. Датчики розміщені на платі, яка встановлена в центрі КП-9. На цій же платі встановлений мікроконтролер, який здійснює обробку інформації від датчиків і результат вимірювання видає на рідкокристалічний індикатор, де одночасно висвічується інформація про поздовжній ухил (тангаж) в

діапазоні вимірювання $\pm 90^\circ$ (кут. градусів) і поперечний ухил (крен) в діапазоні вимірювання $\pm 90^\circ$ (кут. градусів) з ціною молодшого розряду – $0,1^\circ$ (кут. градуса) або $6'$ (кут. мінут) [95].

4.1. Конструктивні особливості вимірювального модуля

На рис. 1 наведена функціональна схема вимірювального модуля. Він складається з блока живлення ± 12 В (акумулятор), який через перемикач В1 підключений до стабілізаторів напруги $+5$ В, до 8-розрядного мікроконтролера типу *AT Mega 16*. Стабілізатор $+3,3$ В, підключений до MEMС акселерометра *ADXL 325*, який вимірює кути розгалуження по осях *X, Y, Z*. Його виходи зв'язані зі входами 1-3 АЦП мікроконтролера. Також напруга $+3,3$ В подається на два MEMС -гіроскопа. Перший гіроскоп типу *LPR530al* вимірює кутову швидкість в площині *XY*, а другий гіроскоп *LPY530al* вимірює кутову швидкість в площині *XZ*. Інформація з виходів гіроскопів поступає на входи 4-6 мікроконтролера. Також напруга $+5$ В подається на рідинно-кристалічний індикатор типу *LCDWX1602*, де індикується знак і визначення поздовжнього ухилу (тангаж) та знак і визначення поперечного ухилу (крен). Стабілізатори, MEMС-акселерометри та гіроскопи і *LCD*-індикатор виконані на друкованих платах, які розміщені всередині двоосьового поворотного кронштейну КП – 9 [106].

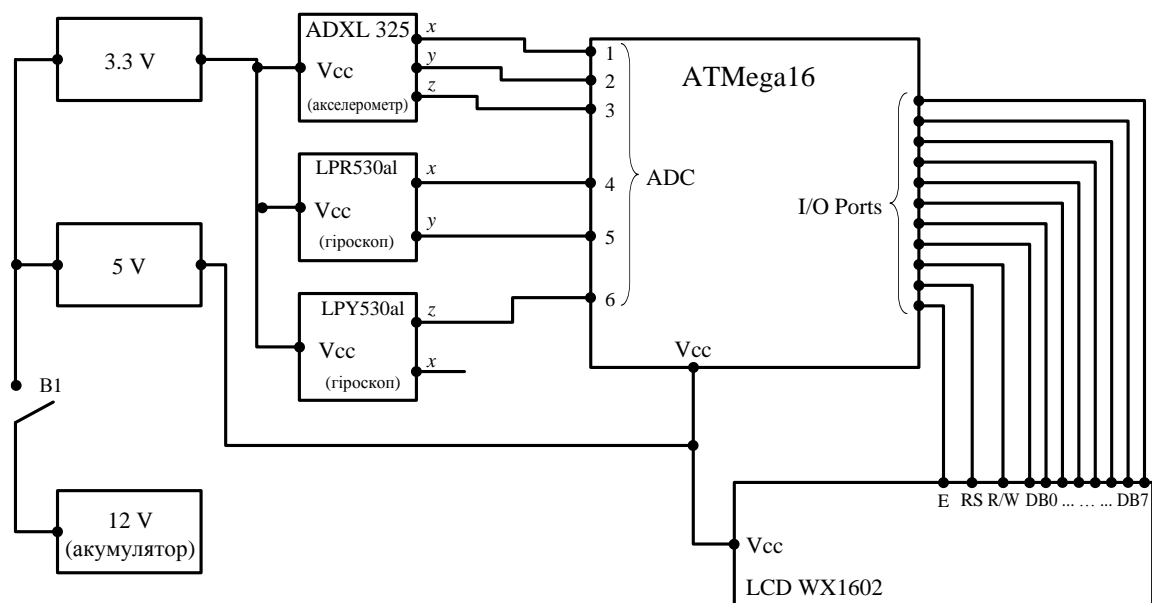


Рис. 4.1. Функціональна схема модуля

На рис. 4.2 наведена конструкція вимірювального модуля. Вимірювальний модуль складається з рухомої на 3-х колесах основи 1, до якої через опори 2, що регулюються,

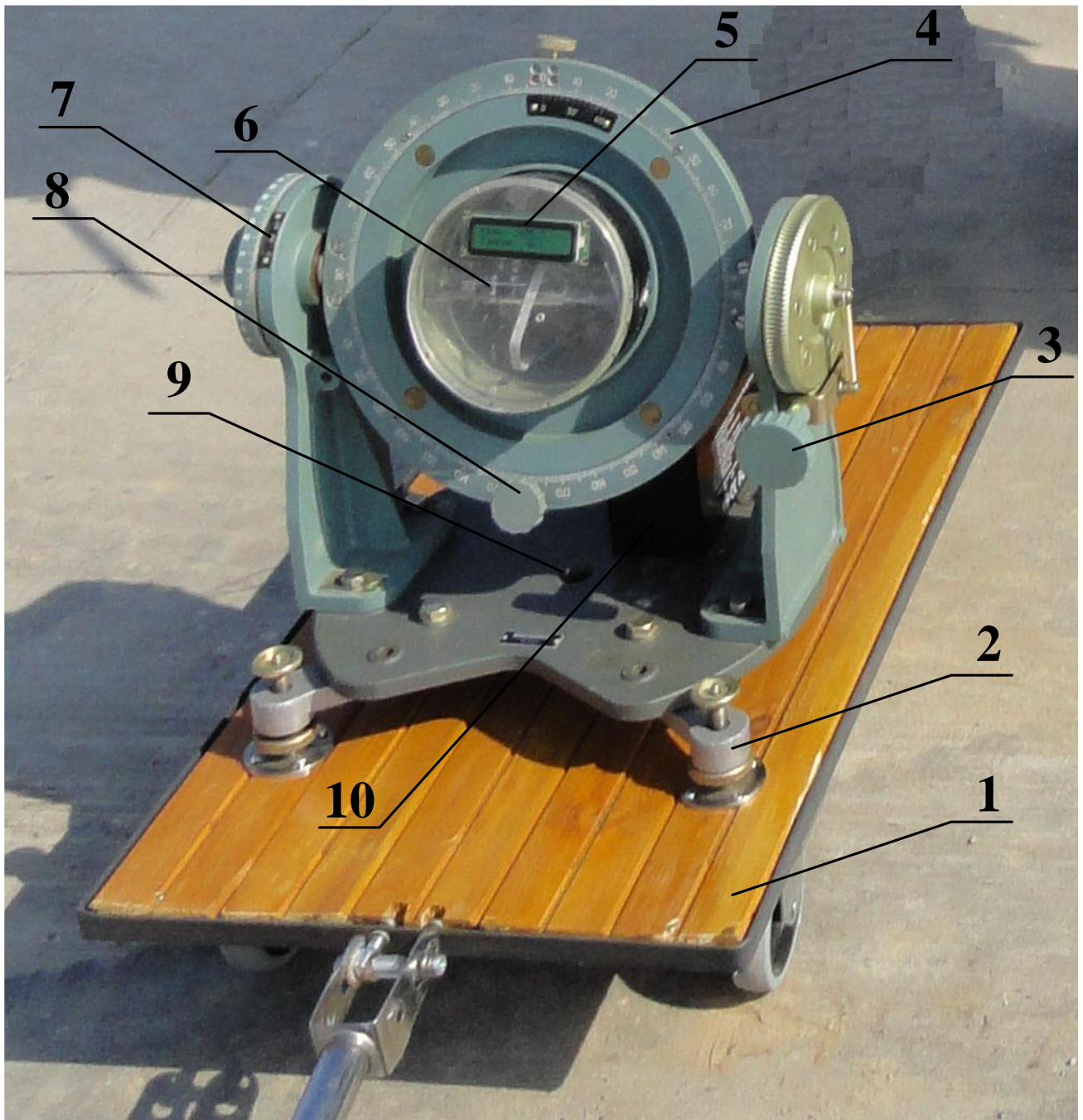


Рисунок 4.2. Конструкція вимірювального модуля:
 1 – основа; 2 – регульована опора; 3 – маховик по тангажу; 4 – лімб;
 5 – LCD-індикатор; 6 – MEMS-датчики; 7 – лімб; 8 – маховик по крену;
 9 - двохкоординатний датчик горизонту; 10 - акумулятор

жорстко закріплюється поворотний кронштейн КП-9, який має можливість розвороту датчиків як по тангажу, так і по крену, тобто за його допомогою можна виконувати калібрування модуля. Кут тангажа задають за допомогою маховика 3, а кут

крену – за допомогою маховика 7. Лімба 4 та 6 фіксують кути розвороту. Значення кутів фіксує *LCD*-індикатор 5. На основі КП-9 встановлені двокоординатний датчик горизонту 8 та акумулятор 9 з перемикачем живлення [106].

Робота з модулем:

1. Мобільний модуль встановлюють в вихідну точку – початок відліку.
2. Встановлюють бульбашку датчика горизонту по центру за допомогою опор 2.
3. Маховиками 3, 7 встановлюють нульові значення по тангажу та крену на індикаторі *LCD*. Модуль готовий для вимірювання.
4. Починають переміщувати модуль до заданої точки і зупиняються. Через 10 секунд зчитують декілька значень кутів по крену і тангажу з *LCD*-індикатора.
5. Довжина переміщень залежить від довжини мобільної основи.

4.2. Експериментальні дослідження фрагментів злітно-посадкової смуги в міжнародному аеропорту «Харків» (Основа)

В період з 19.09 по 23.09.2011 р. робоча бригада від Національного авіаційного університету провела експериментальні дослідження деяких фрагментів нової злітно-посадкової смуги довжиною 2,5 км та шириною 45 м в міжнародному аеропорту м Харкова [104].

Згідно з вимогами СНиП 2.05.08-85 поздовжній ухил ділянки штучної ЗПС повинен бути не більше 0,008, тобто не більше 28' (кутових мінут). При цьому довжина кінцевих ділянок ЗПС (в нашому випадку початкова ділянка) повинна дорівнювати $1/6$ довжини ЗПС, тобто $2500/6 \approx 416$ м. На цій ділянці поздовжній ухил повинен бути одного напрямку (або висхідний, або низхідний).

Поперечний ухил для надійного стоку дощових і талих вод з поверхні штучної ЗПС повинен бути більше 0,015, тобто більше 52' (кутових мінут) [104].

Експериментально досліджувались наступні фрагменти ЗПС:

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

2) нерівності плит, які були виявлені дефектними при вимірюванні триметровою лінійкою, а потім з них були вирізані окремі ділянки і знову забетоновані.

Експериментальне дослідження фрагмента № 1 виконувалось наступним чином: у вихідній (нульовій) точці початкової ділянки ЗПС з правого боку, де встановлені ліхтарі світлосигнальної зони, на відстані 1 м від осі ЗПС проведено горизонтування модуля, після цього проведено зміщення модуля вздовж першої плити, не дійшовши на 1 м до її стика з другою плитою, де були зняті перші вимірювання, далі вимірювання проводилися на наступних плитах в аналогічних точках. Кожному вимірюванню передувала зупинка на 10 секунд.

Таким чином, був пройдений шлях 660 м в одному напрямку по кожній плиті, а потім назад з розворотом модуля з вимірюванням в тих же точках.

Дані вимірювань проведених вперед і назад наведені в табл. 4.1, а їх результати – на рис. 4.3, де пунктиром позначена межа $\pm 28'$ (кутових хвилин), Δ – значення ухилів при переміщенні «вперед», а \square – при переміщенні «назад».

Зв'язок між дискретними значеннями по плитах виконано за методом лінійної апроксимації.

Результати вимірювань поздовжнього ухилу на початковій ділянці ЗПС [104]:

– 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 ÷ 105 м; 130 ÷ 160 м; 215 ÷ 255 м; 345 ÷ 380 м), де виявлені нерівності.

Експериментальне дослідження фрагмента № 2. Згідно зі звітом вимірювань підрядником на пікеті ПК6, на відмітці + 91 м справа осі була виявлена лінійкою велика нерівність (рис.4.4). Частина плити була будівельниками вирізана і заново забетонована (рис. 4.2).

Цей фрагмент представляв інтерес для післяремонтного вимірювання нерівностей, а також для вимірювання ухилів на частині плити, оскільки такий фрагмент геодезичними методами не вимірюється. Модуль переміщувався в середині прямокутника на відстані 1 м від краю ремонтного фрагмента.

Таблиця 4.1.

Результат вимірювань фрагмента №1

Вперед						Назад					
№ вимірювання	Величина ухилу, °	№ вимірювання	Величина ухилу, °	№ вимірювання	Величина ухилу, °	№ вимірювання	Величина ухилу, °	№ вимірювання	Величина ухилу, °	№ вимірювання	Величина ухилу, °
1	0,3	31	0,4	61	0,3	1	0,2	31	0,3	61	0,2
2	0,3	32	0,4	62	0,3	2	0,2	32	0,3	62	0,2
3	0,1	33	0,3	63	0,2	3	0	33	0,2	63	0,1
4	0,4	34	0,3	64	0,3	4	0,3	34	0,2	64	0,2
5	0,4	35	0,4	65	0,3	5	0,3	35	0,3	65	0,2
6	0,3	36	0,3	66	0,4	6	0,2	36	0,2	66	0,3
7	0,05	37	0,2	67	0,3	7	0,45	37	0,1	67	0,2
8	0,5	38	0,2	68	-0,1	8	0,4	38	0,3	68	0
9	0,4	39	0	69	-0,3	9	0,3	39	0,1	69	-0,2
10	0,4	40	0,2	70	0,3	10	0,3	40	0,1	70	-0,2
11	0,4	41	0,1	71	0,3	11	0,3	41	0	71	-0,2
12	0,4	42	0,2	72	0,2	12	0,3	42	0,1	72	0,1
13	0,3	43	0,5	73	0,2	13	-0,2	43	0,4	73	0,1
14	0,1	44	0	74	0,4	14	-0,2	44	0	74	0,3
15	0,4	45	-0,1	75	-0,1	15	-0,3	45	0	75	0
16	0,4	46	0,3	76	0	16	0,3	46	0,2	76	0,1
17	0,5	47	-0,1	77	-0,2	17	0,4	47	0	77	0,1
18	0,4	48	-0,1	78	-0,1	18	0,3	48	0	78	0
19	0,4	49	0,2	79	-0,1	19	0,3	49	0,4	79	0
20	0,5	50	-0,1	80	-0,5	20	0,4	50	0,2	80	0,4
21	0,4	51	-0,1	81	-0,3	21	0,3	51	0,2	81	0,2
22	0,2	52	-0,2	82	0,3	22	0,3	52	0,2	82	0,2
23	0,3	53	0,2	83	0,3	23	0,2	53	0,2	83	0,2
24	0,3	54	0,2	84	0	24	0,4	54	0,2	84	0,2
25	0,3	55	0	85	0,3	25	0,2	55	0	85	0,2
26	0,4	56	-0,1	86	-0,1	26	0,3	56	0,3	86	0
27	0,3	57	-0,1	87	0,4	27	0,2	57	0,2	87	0,3
28	0,3	58	0,1	88	0,3	28	-0,2	58	0,1	88	0,2
29	0,4	59	0			29	0,3	59	0,1		
30	0,3	60	0			30	0,2	60	0,1		

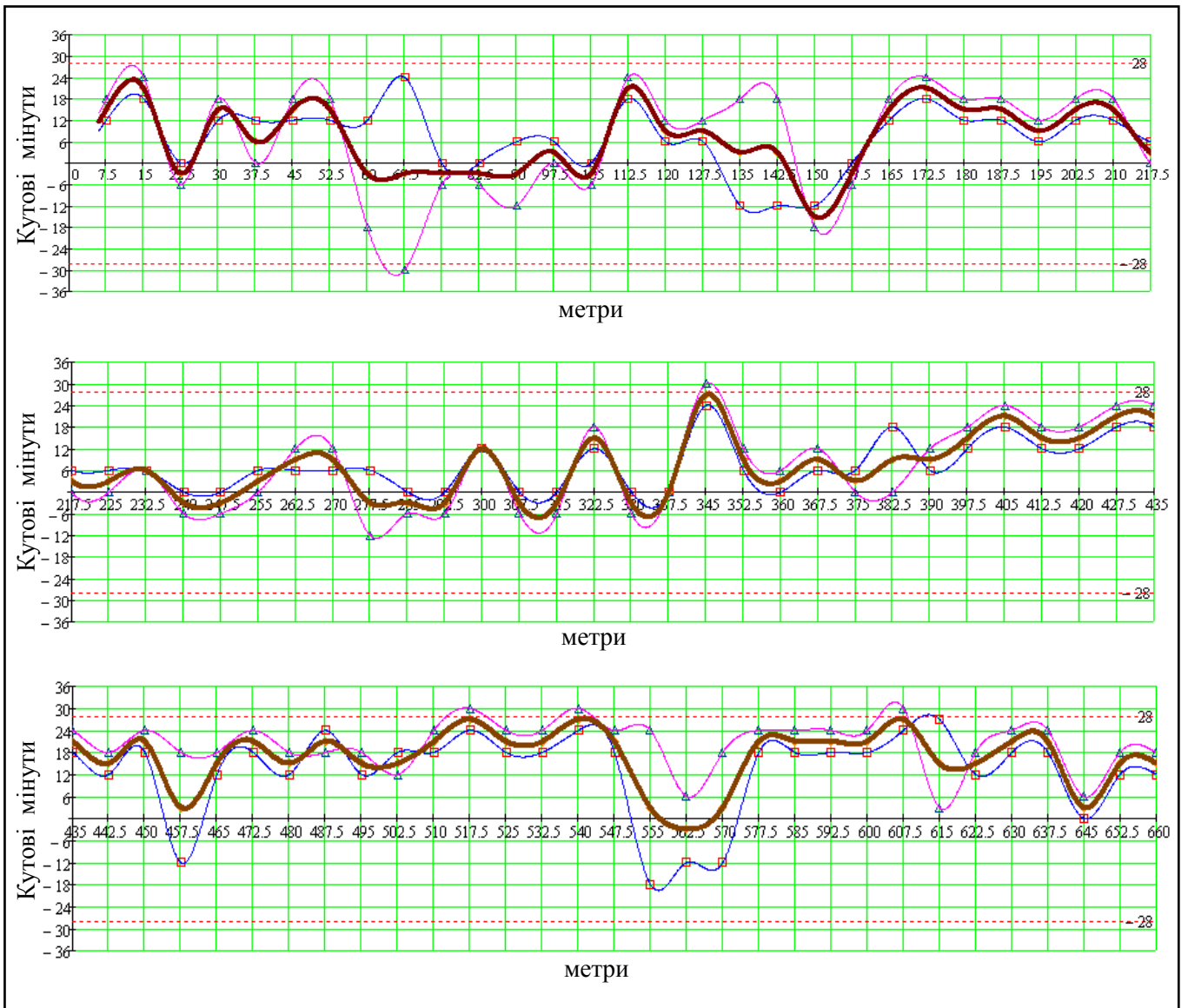


Рис. 4.3. Результати вимірювань на фрагменті №1

В табл. 4.2 наведені середні результати вимірювань поздовжніх та поперечних ухилів. Вимірювання проводилися переміщенням модуля за годинниковою стрілкою. В кутах прямокутника модуль розвертався на дев'яносто градусів.

Таблиця 4.2

Результати вимірювань фрагмента №2

Верх	Низ	Ліво	Право
0,35	- 0,05	1,2	1,3
0,15	0,15	0,75	0,15
0,35	0,05	1,15	1,15
0,3	-0,05	1	1
		0,85	0,85

На рис. 4.5 (а) та 4.5 (б) наведені графічні результати вимірювань поперечних ухилів ремонтного фрагмента.

На рис 4.5 (в) та 4.5 (г) наведені графічні результати вимірювань поздовжніх ухилів ремонтного фрагмента. Графіки виконані методом лінійної апроксимації.

Результати вимірювань [104]:

– поздовжні ухили ремонтного фрагмента не перевищують 0,008 (28' (кут. мінут) та відповідають вимогам СНиП;

– поперечні ухили виконані більше 0,015 (52'(кут. мінут) 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. мінут) менша допуску.

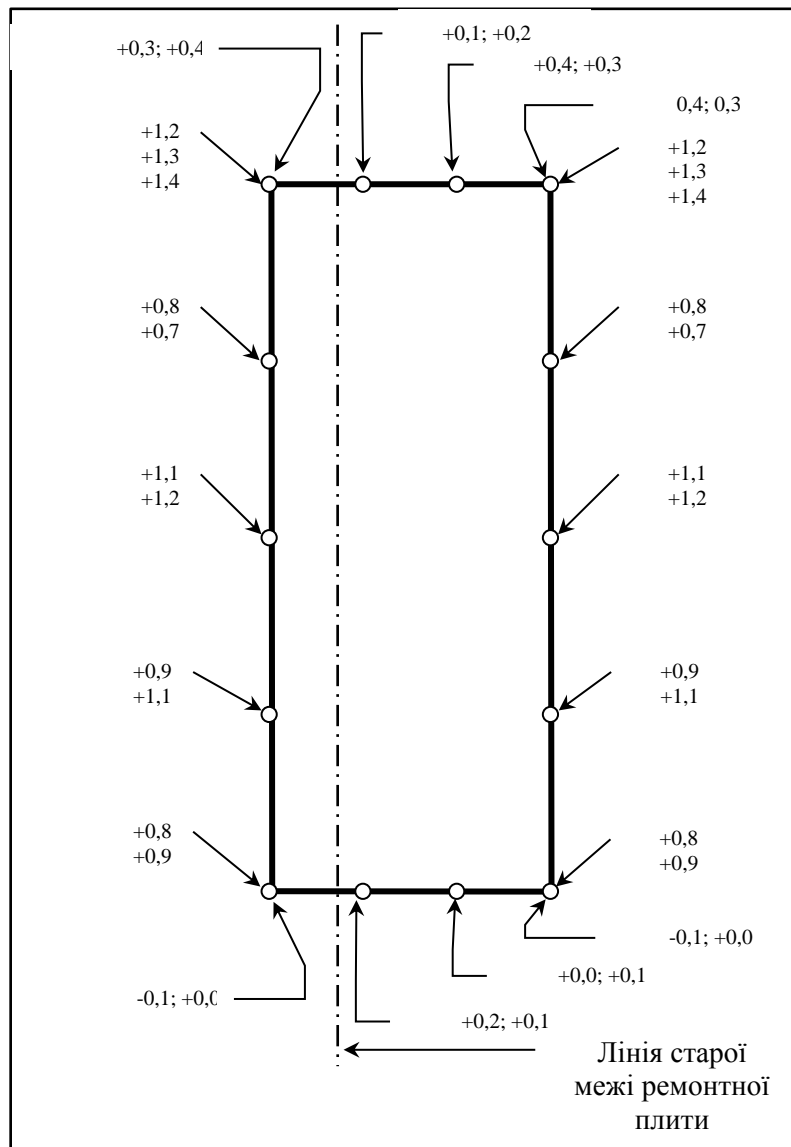


Рисунок 4.4. Фрагмент плити, що потребував ремонту

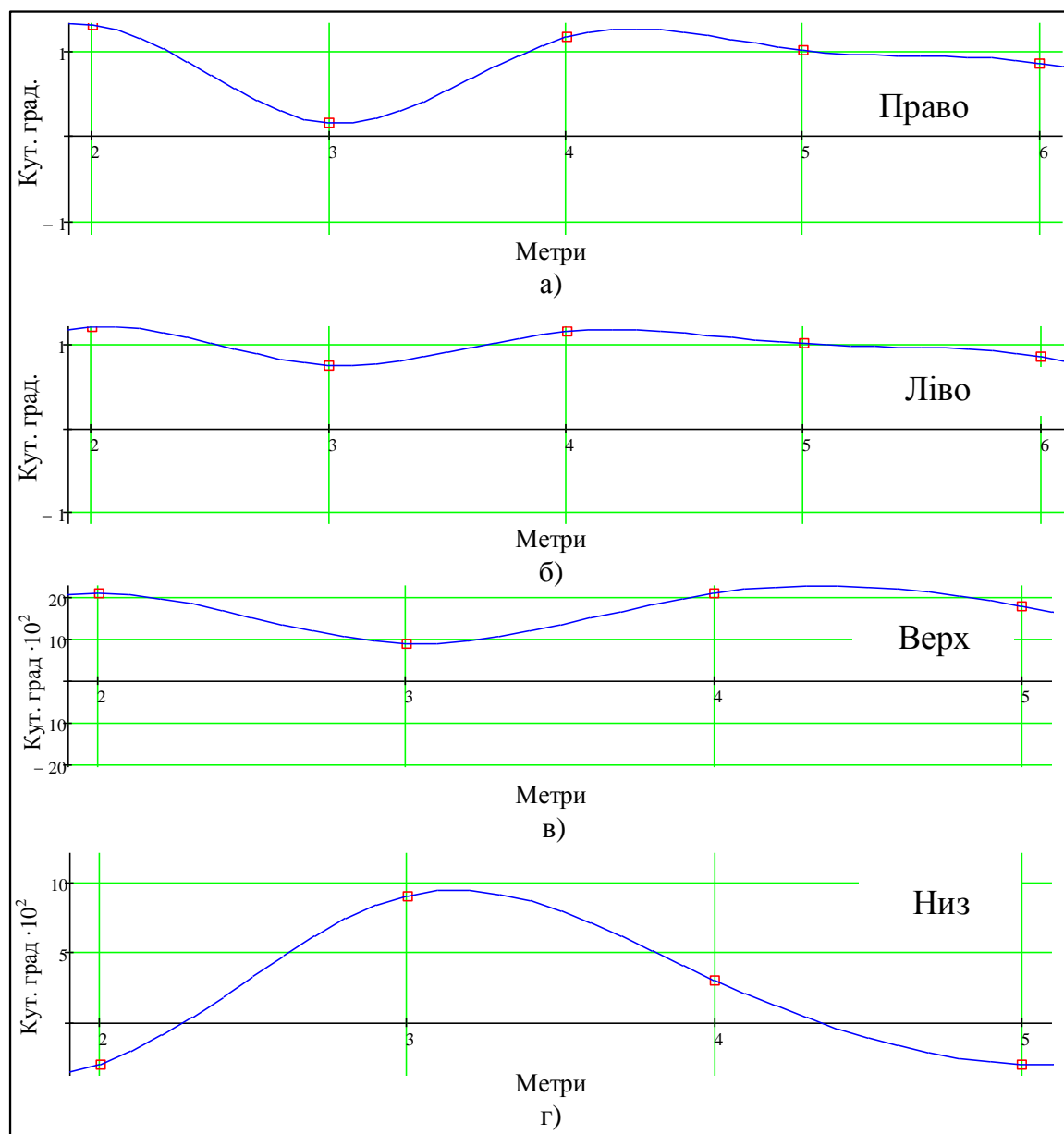


Рисунок 4.5. Графічні результати вимірювань фрагмента №2 (вимірювання проведені шляхом переміщення модуля за годинниковою стрілкою): а) поперечний ухил вправо, б) поперечний ухил в ліво, в) поздовжній ухил в верх, г) поздовжній ухил в низ.

4.3. Перспектива розробки діючого модуля для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів

Розглянемо далі проект розробленого модуля для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів, який являє собою колісну базу (рис. 4.6 та рис. 4.7) що переміщується оператором, на ній встановлено вимірювальний блок та монітор для виводу інформації. Спроектована конструкція рами вимірювальної платформи (ВП) складається з алюмінієвого

профілю, що зварюється, зовнішній корпус виготовлений шляхом вакуумної формовки, запропоновано встановити монітор наступної моделі: Newest 7" LCD TFT 1024 x 600 FPV Monitor.

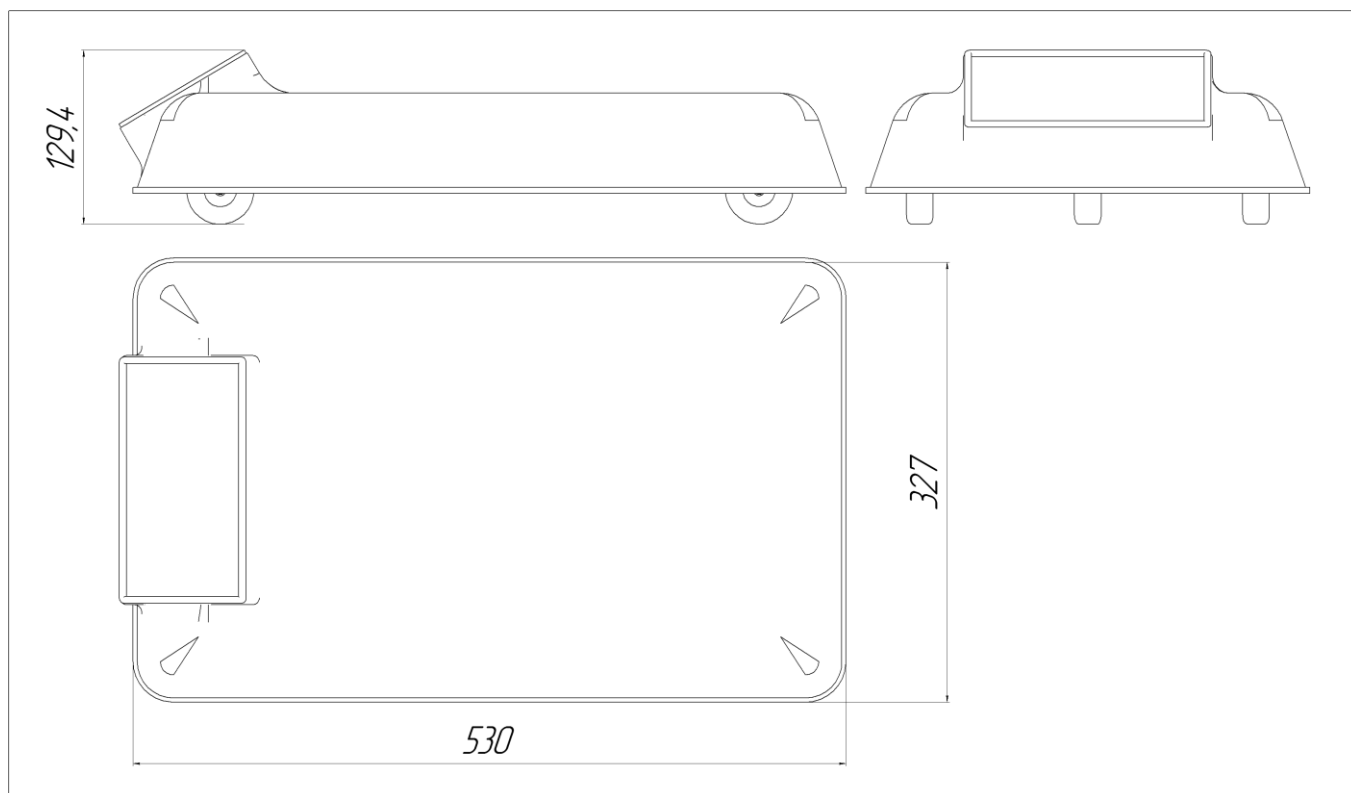


Рис. 4.6. Габаритні розміри колісної бази

Вимірювальний блок складається з ІМУ, побудованого з МЕМС-датчиків (акселерометр, гіроскоп, магнітометр) моделі *BNO055 (BOSCH)*; датчика кутового положення (*AS4850B*) (для вимірювання пройденої відстані); плати, що синхронізує інформацію від МЕМС -датчиків з пройденим шляхом; комп'ютера для обробки інформації (*Industrial PC NP93*) та накопичувача інформації типу *SSD*.

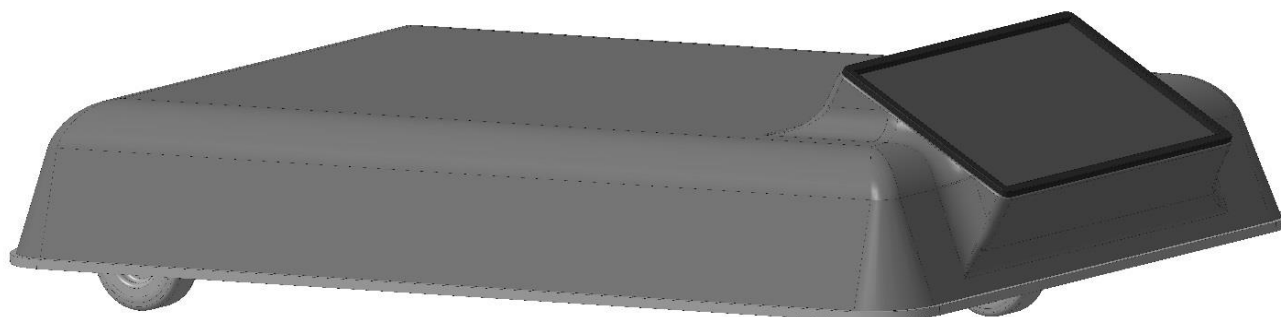


Рис. 4.7. Загальний вигляд вимірювальної платформи

Розрахункові технічні характеристики:

- точність вимірювання, ° -

$\pm 0,089$ (5,3 кут. мін.);

- діапазон вимірювання, ° - ± 30 ;
- габаритні розміри, мм - $530 \times 327 \times 129.4$;
- автоматичне переміщення - відсутнє;
- ПЗ, що забезпечує вивід інформації щодо кутів ухилу - є;
- ПЗ, що дозволяє автоматично визначити коефіцієнт IRI - немає;
- маса приладу обмежень не має.

Також в проекті передбачена можливість автоматичного переміщення ВП по покриттю поверхні, що досліджується. Це можливе шляхом встановлення на колісну базу електричних приводів (кроковий двигун або сервопривід), пульта керування (*Hobby King 2.4Ghz 4Ch*) та системи керування ВП типу Pixhawk [107]. В такому випадку виникає необхідність наземної станції керування, за допомогою якої з'являється можливість дистанційної обробки даних [108].

Розроблений мною проект наземної станції керування з можливістю отримання даних по радіозв'язку, та паралельною обробкою даних: побудова 3D моделі вимірювальної поверхні, та нормування вимірних нерівностей представлена на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Загальний вигляд проекту наземної станції керування

4.4. Прилад для вимірювання шорсткості профілю поверхонь, що досліджуються

Враховуючи те, що ВП, у зв'язку з наявністю певної ширини колісної бази не має можливості виміряти весь частотний діапазон нерівностей профілю покриття, що досліджується, втрачається можливість виміряти шорсткість. Оскільки шорсткість профілю покриття, що досліджується перш за все обумовлена її зв'язком з коефіцієнтом зчеплення і безпосередньо впливає на безпеку руху на автошляхах і може суттєво знизити рівень регулярності та ефективності польотів, виникає необхідність розробки такого приладу.

Розглянемо розроблений мною у співавторстві прилад який на основі методу лазерної триангуляції дозволяє безконтактно вимірювати нерівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів в діапазоні частот шорсткості.

Суть триангуляційного методу вимірювання полягає у розрахунку шуканої відстані через співвідношення трикутника з використанням відомих параметрів системи. Він дозволяє вимірювати як відносну зміну відстані від датчика до об'єкта, що контролюється, так і абсолютну його величину. До того ж відстань, яка контролюється, може мати масштаб від декількох мікрометрів (наприклад, при контролі поверхні кристалів мікроелектроніки) до сотень і тисяч метрів (при геодезичних застосуваннях) [109].

Триангуляційну схему (рис. 4.9) умовно можна розділити на три частини: радіаційний (або освітлювальний) канал, поверхня, що контролюється, приймальний канал [110].

Перша частина схеми - радіаційний канал, який складається з джерела випромінювання і об'єктива, який формує пучок зондування на поверхні, яка контролюється. Як джерело випромінювання використовується лазерний діод. Об'єктив складається з однієї або декількох оптичних лінз. Відносне положення об'єктива і лазерного діода визначає параметри радіаційного каналу [111].

Друга невід'ємна частина триангуляційної вимірювальної схеми – це поверхня, що контролюється. Кожна поверхня має властивість відбивати або розсіювати

падаюче випромінювання. Розсіяне поверхнею об'єкта контролю дифузне випромінювання використовується в триангуляції як фізична основа для отримання інформації про відстані до цієї поверхні.

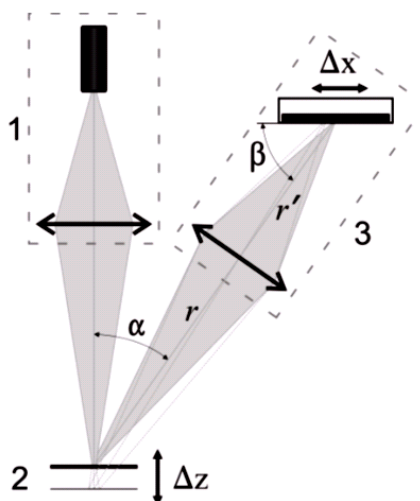


Рис. 4.9. Принципова схема триангуляційного вимірювача: 1 – канал випромінювання; 2 – поверхня, що контролюється; 3 – приймальний канал

Третя частина схеми триангуляційного вимірювача – приймальний канал, який складається з об'єктива і фотоприймача. Об'єктив формує зображення плями зондування в площині фотоприймача. Чим більший діаметр об'єктиву, тим вища його світлосила. Інакше кажучи, тим інтенсивніше і якісніше будується зображення плями. Схема триангуляційного вимірювача (рис. 4.9) працює таким чином: радіаційний канал 1 формує зображення світлової плями на поверхні, що контролюється 2. Далі розсіяне поверхнею, яка контролюється світло потрапляє в приймальний канал 3. Таким чином, в площині фотоприймача створюється зображення освітленої ділянки поверхні, що контролюється (світлова пляма). При зсуві поверхні, що контролюється, на величину ΔZ світлова пляма в площині фотоприймача зміщується на величину ΔX . Залежність зміщення поверхні, що контролюється ΔZ від зсуву світлової плями в площині фотоприймача ΔX , має наступний вигляд:

$$\Delta Z = r \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)}, \quad (4.1)$$

де $\varphi = \arctg(A \cdot \Delta X / (1 + B \cdot \Delta X))$, $A = \sin \beta / r'$, $B = -\cos \beta / r'$;

r – відстань від поверхні, що контролюється 2 до об'єктива приймального каналу 3;

r' – відстань від об'єктива до фотоприймача, при тому, що контрольована поверхня знаходиться в центрі діапазону вимірювань зсувів, відповідно.

Як показано на рис. 4.10, якщо в якості пучка зондування використовувати лазерну лінію, створену за допомогою циліндричної лінзи, то на фотоприймачі сформується лінія, яка відповідає профілю поверхні, яка контролюється.

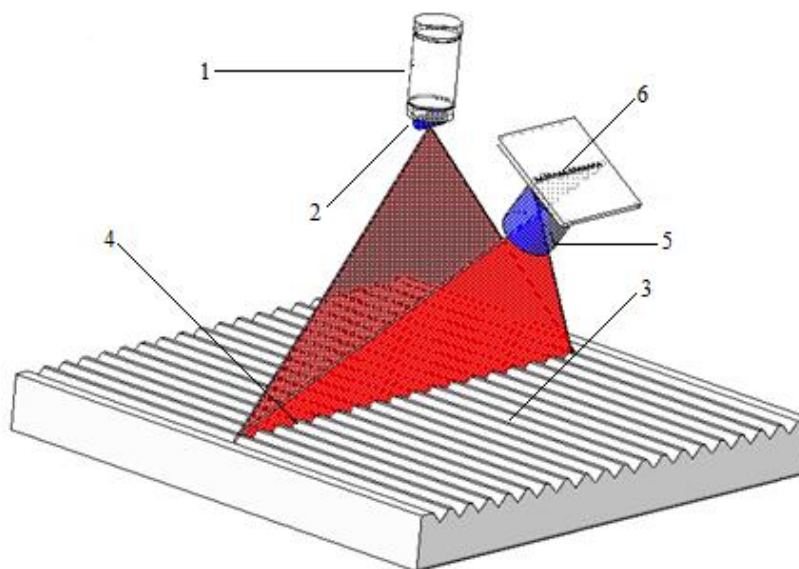


Рис. 4.10. Триангуляційний вимірювач з лазерною лінією: 1 – лазерний діод; 2 – циліндрична лінза; 3 – поверхня, що контролюється; 4 – лінія сканування; 5 – збиральна лінза; 6 – матриця фотоприймача

У розробленій установці в якості радіаційного каналу використовується лазерний діод і циліндрична лінза. В результаті чого на поверхні покриття, що досліджується, формується лазерний пучок у вигляді тонкої лінії. Приймальний канал являє собою цифрову фотокамеру *SONY DSC-H55*. Це полегшує завдання конструювання, оскільки об'єктив і фотоприймач (матриця) виконані в єдиному корпусі [112].

За допомогою лазерного випромінювача на фрагменті поверхні створюється лінія сканування. Площина лазерного пучка перпендикулярна площині фрагмента. Цифрова фотокамера розташована під строго заданим кутом α (рис. 4.9) до площини лазерного пучка. При фотографуванні фрагмента на фотографії буде видно червону лінію, яка чітко описує його профіль. Фотографія має вигляд, зображений на рис. 4.11.

Таким чином, сигналом на виході розробленого вимірювача є цифрове зображення, яке обробляється в середовищі *MATLAB* за допомогою стандартного

пакета програмування *Image Processing Toolbox*. Після обробки отримаємо чисельні значення глибини нерівностей і їх геометричні параметри.



Рис. 4.11. Лазерна лінія на фрагменті поверхні покриття, що досліджується

Шляхом зсуву фрагмента поверхні, що досліджується відносно лінії сканування, отримуємо тривимірну модель поверхні, зображену на рис. 4.12 [115].

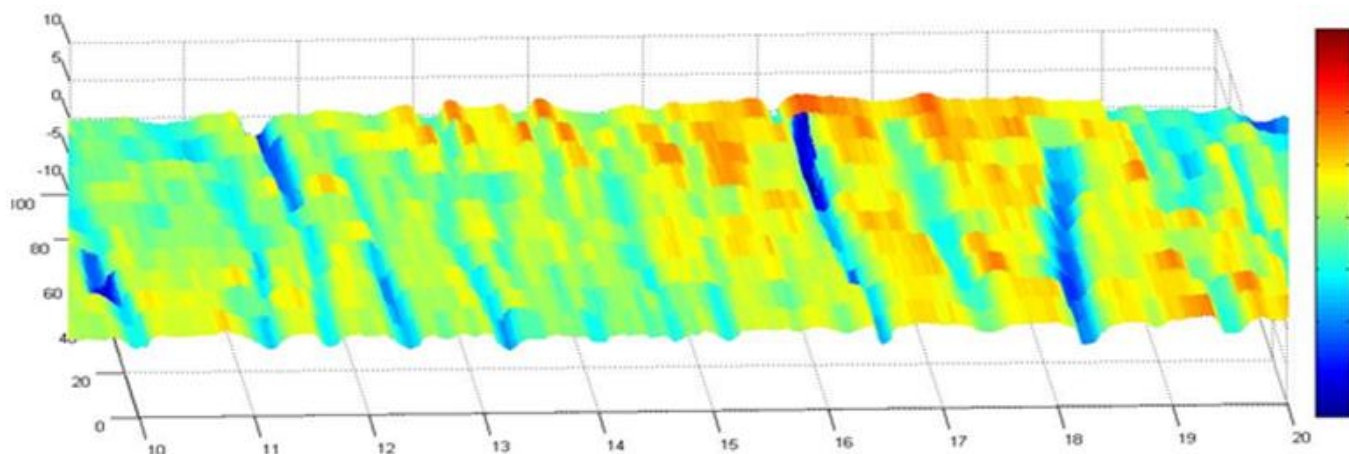


Рис. 4.12. Тривимірна модель поверхні покриття, що досліджується

Тривимірні зображення фрагментів поверхонь, що досліджуються можна в подальшому аналізувати аеропортовими та дорожніми службами і визначати такі параметри як: середня шорсткість, пікове значення заглиблення, глибина вирівнювання, середня глибина та ін. Прилад був випробуваний в лабораторії на бетонному фрагменті поверхні з розмірами 30 x 40 см, з нанесеними заглибленнями (борозенками) різної глибини (0,5 - 3 мм). Точність вимірювання глибини профілю складає 0.09 мм [116].

Таким чином, розроблений прилад дозволяє проводити вимірювання профілю поверхні дорожніх та аеродромних покриттів, охопивши весь діапазон хвиль

нерівностей, на даний прилад отримано патент на корисну модель [113], також розроблено комплексний прилад для вимірювання ухилів, рівності, та шорсткості поверхонь покриттів, що досліджуються, на який також отримано патент на корисну модель [114].

Висновки

1. Сучасна елементна база (МЕМС-технологія), яка використовується для побудови акселерометрів та гіроскопів, дозволяє розробити малогабаритний інерційний вимірювальний блок (*IMU*).

2. Обробка інформації з виходу датчика за допомогою мікроконтролера, в якому програмно реалізований фільтр Калмана, дозволила отримати інформацію одночасно за двома координатами в діапазоні $\pm 90^\circ$ (кут. градусів) з ціною молодшого розряду $\pm 6'$ (кут. мінут).

3. Проведені дослідження фрагментів ЗПС в міжнародному аеропорту м. Харкова показали, що за допомогою модуля можна 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.

4. Експериментальні дослідження також показали, що початкова ділянка нової ЗПС в міжнародному аеропорту м. Харкова виконана в межах допуску, тобто з ухилом не більше $0,008$ ($28'$) і має практично один знак ухилу, але кожна плита має невеликі відхилення одна від одної. Дослідженнями також визначено декілька нерівностей по ряду плит в діапазоні $0 \div 28'$ (кут. мінут).

5. Розроблена макетна конструкція модуля показала, що на підґрунті модуля можливо розробляти конструкторську документацію мобільного двокоординатного вимірювача ухилів для виготовлення дослідної партії приладів, які можливо використовувати як для дослідження якості ЗПС, так і сучасних дорожніх покриттів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Результати дисертаційної роботи спрямовані на розробку нових методів оцінки ухилів та рівності покриття 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 виміряних 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 [95]). 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 [106]). 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 [107]). Але через те, що конструкція ВП не має можливості вимірювати весь частотний діапазон довжин хвиль нерівностей (зокрема шорсткість), 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 [113]), а також у співавторстві отримано патент на корисну модель на комплексний прилад для вимірювання ухилів, рівності та шорсткості (№ 106862 Україна [114]).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Приложение 14 к Конвенции о Международной гражданской авиации. Том I Проектирование и эксплуатация аэродромов. Монреаль: ИКАО, 2009. 272 с.
2. ДБН В.2.3-4:20015 «Автомобільні дороги Частина I. Проектування Частина II. Будівництво», К.: Мінрегіон України, 2015. 104 с.
3. Савенко В.Я., Філіппов В. В., Кіяшко Д. І., Смолянук Р. В., Смірнова Н. В. Недоліки оцінки рівності поверхні дорожніх покриттів, яку використовують в Україні. *Автошляховик України. Держ. автотр. наук. досл. і проектн. ін-т*. 2011. №6. С. 24-31.
4. Филиппов В. П. Нормирование уровня ровности аэродромных покрытий с учетом его комплексного влияния на средний магистральный самолет. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2013. №187. С. 1-7.
5. Роев Ю. Д. Оцінка нерівностей штучних покриттів аеропортів. *Информационное агентство «ГРОМ». Геопроефі*. 2006. №3. С. 15-17.
6. Скрипец А. В., Краснов В. М., Смолич Д. В., Кіреєв М.Е. Разработка прибора для измерения продольных и поперечных уклонов и неровностей взлетно-посадочных полос. *Наука и Мир. Научное обозрение*. 2014. №3 (7). С. 208 – 210
7. Sayers M.W. The little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles / M. W. Sayers, S. M. Karamihas. – Michigan : The University of Michigan Transportation Research Institute, 1998. 306 p.
8. Павлюк Д. О., Рибіцький Л. Л., Лебедев О. С., Іваниця Є. В. Досвід виробничої експлуатації автомобільної причіпної установки ПКРС-2У та поштовхоміра “ВСВП-УТУ”. *Автошляховик України. Держ. автотр. наук. досл. і проек. ін-т*. 2004. № 2. С. 25–27.
9. Кіяшко Д. І., Савенко В. Я., Кіяшко І. В. Обґрунтування нормативних показників для оцінки поздовжньої рівності дорожніх покриттів. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 90-95.

10. ДСТУ 3587-97. Видання. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. [Чинний від 1998-01-01). Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1997. 19 с.

11. П-Г.1-218-113:2009 «Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України», [Чинний від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2009. 232 с.

12. ДСТУ Б В.2.3-3-2000. Дороги автомобільні та аеродроми. Методи вимірювань нерівностей основ і покриттів. [Чинний від 2000-07-01). Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2000. 10 с. (Національні стандарти України).

13. Бируля А. К. Эксплуатационные качества автомобильных дорог / А. К. Бируля, Н. Я. Говорущенко, Д. В. Ермакович. - М. : АВТОТРАНСИЗДАТ, 1961. - 136 с.

14. Смолянчук Р. В., Кіяшко І. В. Використання системи ЛВС-2-ХНАДУ для оцінки рівності дорожніх покриттів. *Автошляховик України. Держ. автотр. наук. досл. і проектн. ін-т.* 2009. № 5. С. 24–26.

15. Y. Ouyang, S. Madanat. Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions / *Transp Res Part A*, 38 (5) (2004), pp. 347-365.

16. Савенко В.Я., Кіяшко Д.І. Зв'язок між оцінками рівності поверхні дорожнього покриття за показниками поштовхоміра та IRI. *Вісник ХНАДУ*. Харків, 2011. № 53. С. 83–86.

17. Горб А.А., Горб А.И. Определение индекса ровности методом наземного лазерного сканирования. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів. № 21. 2011. С. 145-149.

18. Павлюк Д.О., Терещук В.П., Лебедев О.С., Шур'яков М. Застосування спектральної щільності для оцінки якості покриттів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2014. № 1. С. 84-88.

19. Скрипець А.В., Краснов В.М., Мельніков Д.Є., Бойко В.І., Сагідаєв Ю.М. Побудова та експериментальне дослідження мобільного автоматичного вимірювача похилів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 2013. № 90. С.118–134.

20. Євдокімов А. А. Електронні геодезичні прилади: текст лекцій для студентів напряму підготовки 6.080101. Геодезія, картографія та землеустрій.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. 65 с.

21. Голубев А.Н. Основы геотроники. Электронные методы и средства геодезических измерений: Учебное пособие для студентов геодезических специальностей вузов. Москва., МГУГиК, 2003. 87 с.

22. Мацко П.В. Космічна геодезія. Глобальні супутникові навігаційно-геодезичні системи в землевпорядкуванні. Херсон: Айлант, 2002. 44с.

23. Шануров Г.А., Мельников С. Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ: Учебн. пособие. Москва : ЧПП «Репрография» МИИГАиК, 2001. 136 с.

24. M. Zapateiro, F. Pozo and N. Luo, "On variable structure control approaches to semiactive control of a quarter car system" in *Advances on Analysis and Control of Vibrations-Theory and Applications*, InTech, 2012

25. Бочкарев Н.Н. Аппаратно-программный комплекс для определения международного индекса продольной ровности автомобильных дорог. *Наука и образование в жизни современного общества: сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. науч.-практ. конф. 29 ноября 2013 г. Часть 10; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. С. 23–24.*

26. Канунников О.В., Грошев И.В, Люляев М.Ю. Определение высотных отметок продольного профиля ИВПД для вычисления индекса ровности R. *Аэропорты. Прогрессивные технологии*. 2001. № 4(13). С. 22–24.

27. Грошев И.В. Технология съемки продольного профиля с использованием микронивелира Dipstick-2000. *Аэропорты. Прогрессивные технологии*, 2003. № 2. С. 25–27.

28. Huft D.L. South Dakota Profilometer. *Transportation Research*. 1984. № 1000. P. 1-7.
29. Y. Zhao, J. McDaniel and M. Wang, “IRI estimation using probabilistic analysis of acoustic measurements,” *Materials performance and characterization*, (2013).
30. Sayers M.W., S.M. Karamihas. Interpretation of Road Roughness Profile Data. *Federal Highway Administration Report FHWA/RD-96/101*. 1996. 177 p.
31. H. Imine and Y. Delanne Triangular observers for road profiles inputs estimation and vehicle dynamics analysis. *Robotics and Automation 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference*. 2005, P. 4751-4756.
32. Lucas, J. and A. Viano, Systematic Measurement of Evenness on the Road Network: High Output Longitudinal Profile Analyser. Laboratoire Central des Ponts et Chaussees Report Number 101, (1979).
33. Still, P.B. and P.G. Jordan, Evaluation of the TRRL High-Speed Profilometer. Transport and Road Research Laboratory Report LR 922, (1980) 45 p.
34. Sanjay S Eligar, R. M. Banakar. Data Acquisition Model for Road Profiling and Its Statistical Validation. International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT). Mysuru, India, 14-15 Dec. 2018.
35. Щилова М.А., Черноморский А.И. Одноосная колесная платформа-измеритель уклонов аэродромных покрытий. Проектно-конструкторские и производственные вопросы создания перспективной авиационной техники / Под ред. проф. Ю.Ю. Комарова. Москва: Изд-во МАИ, 2009. 424 с.
36. Філяшкін М. К., Рогожин В. О., Скрипець А. В., Лукінова Т. І. Інерціально-супутникові навігаційні системи: навч. посіб. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. 272 с.
37. Teslyuk V., Pereyma M., Karkulyovskyy V., Lobur M. Features of microelectromechanical systems design. *Proc. of the 2nd Inter. Conf. of Young Scientists “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” (MEMSTECH 2006)*. Lviv–Polyana, 2006. P. 67–70

38. High-Aspect Ratio MEMS Fabrication Technologies: URL: <https://www.memsnet.org/mems/fabrication.html> (дата звернення: 15.11.2017)
39. Соколов Л.В. Твердотельные микроприборы и микросистемы с интегрированными микромеханическими структурами. *Зарубежная электронная техника*. 1998. №2. С.62-79
40. Stephen Beeby, MEMS Mechanical Sensors. *Artech House*. 2004. 269 p.
41. Мельніков Д.Є., Кіреєв М.Е., Смолич Д.В. Використання MEMS акселерометрів та гіроскопів при проектуванні та розробці сучасної авіоніки. *Наука і молодь. Прикладна серія: збірник наукових праць; Національний авіаційний університет*. Київ, 2010. Вип. 10. С. 27-30.
42. Мельніков Д.Є., Кіреєв М.Е., Смолич Д.В. Пристрій для визначення кутового положення літака в просторі на основі MEMS-акселерометра та гіроскопа. *Наука і молодь. Прикладна серія: збірник наукових праць; Національний авіаційний університет*. Київ, 2012. С. 61-64.
43. Смолич Д.В., Кіреєв М.Е., Шпилька О.О. Спектральний метод оцінки ухилів та рівностей покриття аеродромних конструкцій. *Вісник інженерної академії України: теорет. і наук.-практ. часоп. Інж. акад. України*. 2016. №3. С. 50 – 53.
44. 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.
45. Смолич Д.В., Кіреєв М.Е., Шпилька О.О., Герасименко А.О. Математична модель покриття аеродромних конструкцій. *Вісник інженерної академії України: теорет. і наук.-практ. часоп. / Інж. акад. України*. Київ, 2018. №2. С. 33 – 37.
46. Новиков В. С. Эксплуатация радиоэлектронного авиационного оборудования: учебник. М.: Транспорт, 1989. 288 с.
47. Методы Монте-Карло: URL <http://www.polybook.ru/comma/1.4.pdf> (дата звернення 10.10.2017).

48. 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/ATM*: зб. тез доп. наук.-техн. конф., м Київ, 21-23 листопада 2016 р. Київ, 2016. С. 88.

49. Мирончук А.Ю., Шпилька А.А., Жук С.Я. Метод оценивания частотной характеристики канала в OFDM системах на основе фильтрации и экстраполяции пилот-сигналов. *Вестник НТУУ "КПИ". Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение*. 2019. №78. С. 36-42.

50. Myronchuk O. Two-stage Channel Frequency Response Estimation in OFDM Systems / O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk // *Path of Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 1001-1007, – 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.22178/pos.55-1>.

51. 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.

52. Myronchuk O. Algorithm Of Channel Frequency Response Estimation In Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems Based On Kalman Filter / O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 31-34, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385.

53. Grewal M.S., Andrews A.P. Kalman filtering: theory and practice using MATLAB. Wiley–IEEE Press. 2008. 592 p.

54. Жук С.Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой: монография. Київ: вид-во НТУУ КПИ. 2008. 232 с.

55. Grewal M.S., Andrews A.P. Kalman filtering: theory and practice using MATLAB. Wiley–IEEE Press. 2008. 592 p.

56. Грибов В.М. Техническое диагностирование авионики. Модуль 1. Методы диагностирования, достоверность функционирования и контролепригодность авионики. Київ: вид-во НАУ. 2017. 269 с.

57. Новиков В. С. Эксплуатация радиоэлектронного авиационного оборудования: учебник. М.: Транспорт, 1989. 288 с.
58. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник, изд 5-е. М.: Наука, 1998. 576 с.
59. Грибов В. М. Техническое диагностирование авионики. Конс-пект лекций: электронный ресурс. – К. : НАУ, каф. Авионики, 2012. – 12 Мб.
60. V.Gribov, G.Polozhevets, Y.Hryshchenko, D.Smolych, M.Kireiev Technical diagnostics of avionics: Guide to Laboratory Work / compilers – К.: «NAU-print», 2016. 64 p.
61. Грибов В.М., Смолич Д.В. О возможности уменьшения вероятности ложных отказов блоков типа LRU на основе алгоритмической избыточности. *Математичні машини і системи*. 2014. №3. С. 136 – 146.
62. Грибов В.М., Смолич Д.В. Статистический анализ функций ошибок принятия решения при допусковом контроле работоспособности компонентов авионики. *Математичні машини і системи*. Київ, 2014. №2. С. 128 – 136.
63. Тимошенко С.П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов. *Национальный исследовательский университет МИЭТ*. 2017. С.23 – 30.
64. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Соловьева Т.И., Томилин А.В. Критерии выбора акселерометров для инерциального измерительного блока. *Инновационные информационные технологии: Материалы международной научнопрактической конференции*. Том 2. М.: Изд-во НИУ ВШЭ. 2013. С.372 – 378.
65. I. Lee, G. H. Yoon, J. Park, S. Seok, K. Chun, K. Lee, Development and analysis of the vertical capacitive accelerometer. *Sensors and Actuators*. 2005. №119. P. 8-18.
66. S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N.White, MEMS mechanical sensors (Artech house inc., USA, 2004).
67. Bouffard, Joshua Lee, "An Alternative Sensor Fusion Method For Object Orientation Using Low-Cost Mems Inertial Sensors" (2016). Graduate College Dissertations and Theses. Paper 537.

68. A. Nistico, “Working Principle of a Capacitive Accelerometer,” Eng. Sci., Univ. of Roma Tor Vergata, 2013.
69. Woodman O. J. An introduction to inertial navigation. Technical Report, Number 696, University of Cambridge, 2007.
70. S. E. Lyshevski, Mems and Nems: systems, devices and structures (CRC Press LLC, USA, 2002).
71. Datasheet ADXL05. © Analog Devices, Inc., 1996.
72. Ивойлов А.Ю. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2017. №3 (89). С. 32–51.
73. Шахнович И. МЭМС-гироскопы – единство выбора. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2007. № 1. С. 76–85.
74. Ayazi F., Najafi K. A HARPSS Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope. *Journal Of Microelectromechanical Systems*. 2001. Vol. 10, № 2. P. 79-84.
75. Fisher C.J. Using an accelerometer for inclination sensing. URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN_1057.pdf (дата звернення 23.11.2017).
76. Pedley M. Tilt sensing using a three-axis accelerometer. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3461.pdf> (дата звернення 23.11.2017).
77. Туяхова А. Є. Система визначення орієнтації та положення мультикоптера з використанням мікромеханічного модуля: маг. дис.: 178 / НТУУ КПІ, 2019. 120 с.
78. Комплементарный фильтр: веб-сайт. URL: <https://robotclass.ru/articles/complementary-filter> (дата звернення: 05.11.2020).
79. Malinen E. Fusion of data from quadcopter’s inertial measurement unit using complementary filter: bachelor’s thesis. Lappeenranta, 2015.
80. Xsens Technologies B.V. MTi and MTx User Manual and Technical Documentation. Pantheon 6a, 7521 PR Enschede, The Netherlands, May 2009.

81. H. J. Luinge and P. H. Veltink. Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2006. №43(2). P. 273–282.
82. N.H.Q. Phuong, H.-J. Kang, Y.-S. Suh, and Y.-S. Ro. A DCM based orientation estimation algorithm with an inertial measurement unit and a magnetic compass. *Journal of Universal Computer Science*. 2009. №15(4). P. 859–876.
83. J. B. Kuipers. Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality. Princeton University Press, 1999.
84. David R. Pratt Robert B. McGhee Joseph M. Cooke, Michael J. Zyda. Npsnet: Flight simulation dynamic modelling using quaternions. *Presence*. 1994. №1. P.404–420.
85. John Arthur Jacobs. The earth's core, volume 37 of International geophysics series. Academic Press, 2 edition, 1987.
86. Mark Euston, Paul Coote, Robert Mahony, Jonghyuk Kim, and Tarek Hamel. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing uav with a low-cost imu. In 6th International Conference on Field and Service Robotics, July 2007.
87. Sung Kyung Hong. Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (uav). *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003. №107(2). P.109 – 118.
88. Madgwick Sebastian O.H., An ecient orientation filter for inertial and inertialmagnetic sensor arrays // April 30, pages 40 – 54, 2010.
89. Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Разработка системы автоматической стабилизации в вертикальном положении двухколесной платформы. *Автоматика и программная инженерия*. 2014. № 2 (8). С. 15–21.
90. Купервассер О.А., Рубинштейн А.С. Система навигации беспилотных летательных аппаратов. *IV конференция ТРИЗ: Практика применения методических инструментов*”. 2013. С.14 – 20.
91. Ревзин Г.Г, Пригодность инерциальных MEMS-датчиков к решению задач персональной навигации. *Шаг в будущее МГТУ*. 2012. № 6. С. 233 – 242.

92. Markus Haid and Jan Breitenbach. Low cost inertial orientation tracking with kalman filter. *Applied Mathematics and Computation*. 2004. №153(4). P. 567-575.

93. M. A. Brodie, A. Walmsley, W. Page. The static accuracy and calibration of inertial measurement units for 3D orientation. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2008. №11(6). P. 641–648.

94. Матвеев В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных систем. Санкт-Петербург: Изд-во ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроника», 2009. 280 с.

95. 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 MEMS акселерометрів та гіроскопів для визначення кутового положення літака в просторі на основі оптимального рекурсивного фільтра Калмана» // №38841 від 25.06.2011.

96. J. L. Marins, Xiaoping Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee, and M. J. Zyda. An extended kalman filter for quaternion-based orientation estimation using marg sensors. *In Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2001. Vol. 4, P.2003–2011.

97. Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Использование измерительной системы MPU 6050 для определения угловых скоростей и линейных ускорений. *Автоматика и программная инженерия*. 2015. № 1 (11). С. 75–80.

98. BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor: Data sheet. – BST-BNO055-DS000-12: Revision 1.2, November 2014.

99. Строкач, Г. Ю., Сапегін, О. М. Кутомір на основі акселерометру ADXL-335. *Погляд у майбутнє приладобудування*. 2019. С. 46–48.

100. Khomenko V. Non-invasive low cost method for linear and angular accelerations measurement in biped locomotion mechanisms / V Khomenko, O Bruneau, FB Ouezdou, P Henaf // *SENSORS*, 2011 IEEE, 2011.

101. Murphy C. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application: Part 1 / Chris Murphy // *Analog Devices*, December 12, 2017.

102. Murphy C. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application: Part 2 / Chris Murphy // Analog Devices, December 22, 2017.

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

104. Звіт про науково-дослідну роботу «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 аеропорті «Харків» (Основа)» (Договір про створення (передачу) науково-технічної продукції між Українським державним проектно-технологічним, науково-дослідним інститутом цивільної авіації «Украеропроект» і Національним авіаційним університетом від 23.06.2011 р. № 753-ХП).

105. 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.*

106. Вимірювач рівності та ухилів поверхонь конструкцій аеродрому: пат. 103211 Україна. №U201504877 зпаявл. 19.05.2015, опубл; 10.12.2015, Бюл. №23.

107. Скрипець А.В., Краснов В.М., Мельніков Д.Є., Волков О.Є., Волощенко 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.

108. 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 CNC/ATM: зб. тез доп. наук.-техн. конф., м Київ, 17-19 листопада 2014 р. Київ, 2014. С. 112.*

109. PIARC World Road Association Report of the Committee on Surface Characteristics. Proceeding of XVIII World Road Congress; Brussels, Belgium. 13–19 September 1987.

110. Guidi G., Russo M., Magrassi G., Bordoni M. A performance evaluation of triangulation based range sensors. *Sensors*. 2010. №10. P. 7192–7215.

111. Скрипець А.В., Краснов В.М., Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Сагідаєв Ю.М. Побудова та експериментальне дослідження автоматичного вимірювача шорсткості ЗПС. *Науково-технічний збірник. Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2013р. Вип. 89. С. 118-134.

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

113. Вимірювач шорсткості поверхонь конструкцій аеродрому: пат. 98226 Україна, №U201410943; заявл. 07.10.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. №8.

114. Комплексний пристрій для діагностики параметрів поверхонь конструкцій аеродрому: пат. 106862 Україна, №U201511018; заявл. 11.11.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. №9.

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

116. 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.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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

4. Грібов В.М. О возможности уменьшения вероятности ложных отказов блоков типа LRU на основе алгоритмической избыточности / В.М. Грібов, 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.- практич. часоп. / Інж. 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.- практич. часоп. / Інж. 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.

Патенти

10. Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Краснов В.М., Скрипец 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.

11. Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Краснов В.М., Скрипец 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.

12. Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Краснов В.М., Скрипец 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

13. Скрипец 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.

14. 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.

ДОДАТОК Б

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. XI міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013», яка відбулася 21-23 травня 2013 року в Національному авіаційному університеті, м. Київ, тема доповіді: «Прилад для вимірювання шорсткості новозбудованих злітно-посадкових смуг».

2. 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, тема доповіді: «Вимірювач ухилів та рівностей покриття аеродромних конструкцій з дистанційною обробкою даних».

3. 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, тема доповіді: «Розробка приладу для вимірювання поздовжніх та поперечних ухилів та нерівностей злітно-посадкових смуг».

4. 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, тема доповіді: «Комплексний пристрій для діагностики параметрів поверхонь конструкцій аеродрому».

5. 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, тема доповіді: «Оцінка точнісних характеристик методу вимірювання ухилів та рівностей покриття конструкцій аеродрому».

6. 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, тема доповіді: «Kalman filter for channel estimation in OFDM systems».

7. 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, тема доповіді: «Спектральний метод оцінки ухилів та рівностей покриття злітно-посадкових смуг».

ДОДАТОК В
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО
ДОСЛІДЖЕННЯ

Міжнародний науково-
навчальний центр
інформаційних технологій
та систем НАН та МОН України

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора з наукової роботи
Міжнародного науково-навчального центру
інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України



К.М. Синиця

2021 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук
Смолича Дениса Вікторовича у науково-дослідний процес Міжнародного науково-
навчального центру інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України

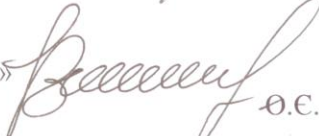
Ми, що нижче підписалися, вчений секретар, к.т.н., с.н.с. О.О. Родіонов та завідувач відділу «Інтелектуального управління» Міжнародного Центру, склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Смолича Дениса Вікторовича «Оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів» використовуються у науково-дослідному процесі Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України:

Найменування впровадженого результату	НДР, в яких впроваджено результат
Алгоритми оцінки рівності поверхонь смуг розбігу для БПЛА	НДР: «Розробка технології інтелектуального управління безпілотними літальними апаратами» (№ держреєстрації в УкрІНТЕІ 0117U006355); НДР «Фундаментальні засади створення мережецентричної технології контролю передачі інформаційно-комунікаційних даних в мережі» (№ держреєстрації в УкрІНТЕІ 0115U005108).

Вчений секретар Міжнародного Центру,
к.т.н., с.н.с.

 О.О. Родіонов

Завідувач відділу «Інтелектуального управління»
Міжнародного Центру

 О.С. Волков



Дата 27.01.2021 № 27-01-21/к

ТОВ «ЮА ТЕХНОЛОДЖІ»
Україна, 03115, м. Київ,
Святошинський район,
вул. Святошинська, 32,
ЄДРПОУ 37395161
Тел. +380444941988

ДОВІДКА

про впровадження наукових результатів
кандидатської дисертації асистента кафедри авіоніки НАУ
Смолича Дениса Вікторовича
«Оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх
та аеродромних покриттів»
(спеціальність 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми)

Результати науково-дослідної роботи Смолича Д.В. «Оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів» було використано при розробці методу оцінки якості покриття смуги розбігу для БПЛА літакового типу та, в залежності від їхніх технічних характеристик, встановленні значення показників рівності. Також на основі експериментально отриманих результатів порівняння характеристик алгоритмів комплексування інформації від МЕМС-датчиків, обрано та реалізовано алгоритм фільтра Калмана для побудови гіростабілізованих платформ.

Генеральний директор
ТОВ «ЮА ТЕХНОЛОДЖІ»



О.М. Руденко

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
АНТОНОВ[®]

вул. Академіка Туполева, 1, м.Київ,
03062 Україна
Факс: 38(044) 454-79-66
Тел: 38(044) 454-31-49
E-mail: info@antonov.com
Код ЄДРПОУ 14307529



COMPANY
ANTONOV[®]

vul. Akademika Tupoleva, 1, Kyiv,
03062 Ukraine
Fax: 38(044) 454-79-66
Phone: 38(044) 454-31-49
E-mail: info@antonov.com

03.02.2021 733/1255-21
ДП "АНТОНОВ"



Д О В І Д К А

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи здобувача
наукового ступеня кандидата технічних наук
Смолича Дениса Вікторовича

Зазначеним підтверджуємо, що результати наукових досліджень, отримані в ході виконання дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Смолича Дениса Вікторовича за темою «Оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів», успішно пройшли апробацію та впроваджується на Державному підприємстві «Антонов».

В ході апробації були проведені спільні експериментальні моделювання методу оцінки рівності поздовжнього профілю покриття ЗПС та методу діагностування поперечних ухилів. Проводяться попередні випробування розробленої вимірювальної платформи.

Заст. головного конструктора
експериментально-дослідних робіт
Державного підприємства «Антонов»



[Signature]
О.Ю. Курганський

ЛІЗ
* 009606 *

[Signature]



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Національного авіаційного
університету з навчальної роботи

А.В. Полухін

2021 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційної роботи

Ми, що нижче підписалися, т.в.о. декана Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Гумен М.Б., заступник декана Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Кривоносенко О.П., завідувач кафедрою авіоніки Павлова С.В. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Смолича Дениса Вікторовича «Оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів» використовується у навчальному процесі Національного авіаційного університету, Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій.

Вид результату, що впроваджено:

1. Алгоритм дослідження впливу параметрів діагностичного процесу на достовірність допускового контролю працездатності авіоніки.
2. Імітаційна модель процесу допускового контролю оцінки впливу експлуатаційного допуску параметричної похибки вимірювання діагностичного параметра на ймовірності прийняття правильних та хибних рішень.
3. Застосування імітаційної моделі при дослідженні ефективності алгоритму з n -кратною фільтрацією ситуації «хибна відмова» при допусковому контролі параметрів.

Форма впровадження:

Три лабораторні роботи з дисципліни «Технічне діагностування авіоніки».

Ефект від впровадження:

1. Підвищення якості навчання та поглиблення рівня знань при вирішенні питань оцінки достовірності контролю технічного стану бортового обладнання як необхідної умови безпеки польоту.
2. Інтенсифікація навчального процесу та об'єднання системного розуміння розгалужених окремих дисциплін навчального процесу в єдину концепцію авіатранспортної галузі.

Т.в.о. декана ФАЕТ

М.Б. Гумен

Заступник декана ФАЕТ

О.П. Кривоносенко

Завідувач
кафедрою авіоніки

С.В. Павлова

відкрите акціонерне товариство

“Меридіан”

ім. С.П. Корольова

Місце знаходження юридичної особи:
Україна, 03124, м. Київ, б-р Вацлава Гавела, 8
факс +38 (044) 408-44-00, 454-13-56
тел. +38 (044) 408-59-11, 408-85-18
e-mail: kancelyaria12@merydian.kiev.ua



УкрОборонПром

open joint-stock company

“Meridian”

n. S.P. Korolyov

Boulevard Vaclav Havel, 8, Kyiv, 03124, Ukraine
fax +38 (044) 408-44-00, 454-13-56
tel. +38 (044) 408-59-11, 408-85-18
e-mail: kancelyaria12@merydian.kiev.ua

№

12/55 від 29.01.2021р

від

на №

ДОВІДКА

про апробацію та впровадження

наукових результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня кандидата
технічних наук Смолича Дениса Вікторовича

Зазначеним підтверджуємо, що результати наукових досліджень, отримані в ході виконання дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Смолича Дениса Вікторовича за темою «Оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів», успішно пройшли апробацію та впроваджуються у Науково-технічному центрі ВАТ «Меридіан» ім. С.П. Корольова.

В ході апробації були проведені спільні експериментальні моделювання та попередні випробування розроблених методів оцінки рівності покриття смуг розбігу для БПЛА.

Довідка видана для подання в спеціалізовану вчену раду К 26.062.12.

Директор науково-технічного центру
ВАТ «МЕРИДІАН» ім. С.П. Корольова,

член-кореспондент Академії інженерних наук України



Прияжнюк О.А.

«29». 01 .2021 р.
МП

ДОДАТОК Г
ПАТЕНТИ

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

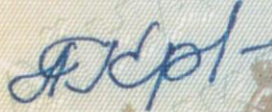
№ 98226

ВИМІРЮВАЧ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙ
АЕРОДРОМУ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **27.04.2015**.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

 А.Г. Жарінова



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 103211

ВИМІРЮВАЧ РІВНОСТІ ТА УХИЛІВ ПОВЕРХОНЬ
КОНСТРУКЦІЙ АЕРОДРОМУ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.12.2015.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

А.Г. Жарінова



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 106862

**КОМПЛЕКСНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ
ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙ АЕРОДРОМУ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.05.2016**.

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України

А.А.Малиш



ДОДАТОК Г
СВІДОЦТВА ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 38841

Комп'ютерна програма "Комплексування інформації отриманої від MEMS акселерометрів та гіроскопів для визначення кутового положення літака в просторі на основі оптимального рекурсивного фільтра Калмана"

(вид, назва твору)

Автор(и) Кіресв Максим Еріданович, Смолич Денис Вікторович, Мельніков Дмитро Євгенійович, Черноус Тетяна Миколаївна, Самокиша Тамара Володимирівна, Волков Олександр Євгенович, Волошенюк Дмитро Олександрович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

25.06.2011

Голова Державного департаменту інтелектуальної власності

М.В.Паладій



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 49339

Комп'ютерна програма "Автоматизованого робота-платформи діючого модуля для визначення поздовжніх і поперечних ухилів та рівності поверхні аеродромних покриттів"

(вид, назва твору)

Автор(и) Скрипець Андрій Васильович, Краснов Володимир Миколайович, Мельніков Дмитро Євгенійович, Волков Олександр Євгенович, Волошенюк Дмитро Олександрович, Смолич Денис Вікторович, Кіресв Максим Еріданович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

27.05.2013



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня