

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЛЕБЕДИНСЬКИЙ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 004.9+654.94

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО  
КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З НЕСТАЦІОНАРНИМИ  
СИГНАЛАМИ**

122 – Комп'ютерні науки

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



А.В. Лебединський

Науковий керівник **Полярус Олександр Васильович**, доктор технічних наук,  
професор

*Усі приклади дисертації ідентичні з її змістом*  
*Голова спеціалізованої вченої ради ДФ 64.089.016*



*А.Г. Недрозов*

Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Лебединський А.В.* Моделі, методи та інформаційна технологія дистанційного контролю технічних об'єктів з нестаціонарними сигналами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (12 – Інформаційні технології). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Роботу виконано на кафедрі метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Міністерства освіти і науки України.

*Об'єктом дослідження* є процес автоматизованого прийняття рішення про стан мостових споруд на основі нестаціонарних їх прогинів, що отримані при дистанційному вимірюванні.

*Предметом дослідження* є моделі, методи та інформаційна технологія забезпечення автоматизованого прийняття рішень про стан мостових споруд на основі результатів дистанційного вимірювання параметрів нестаціонарних процесів прогинів.

Дисертаційне дослідження присвячене розробці моделей, методів та інформаційної технології дистанційного контролю технічних об'єктів з нестаціонарними вихідними сигналами для автоматизованого прийняття рішення щодо стану цих об'єктів. У даному дослідженні у якості технічних об'єктів використовувались мостові споруди.

В роботі пропонуються моделі, методи та інформаційна технологія дистанційного контролю технічних об'єктів з нестаціонарними сигналами, яка, на відміну від відомих технічних рішень, забезпечує сталість та цінність отриманої інформації у режимі реального часу при аналізі саме нестаціонарних процесів, що підкріплено 5 патентами України, одержаними з участю автора.

Дисертація пов'язана з актуальною світовою проблемою аналізу в реальному часі нестаціонарних процесів, характеристики яких важко передбачити і дуже складно виділяти цінну інформацію у великій множині даних та робити висновки щодо самого процесу.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження та актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами за планами Міністерства освіти та науки України, надано наукову новизну та сформульовано практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел за темою дисертаційної роботи, зокрема комплексному аналізу наявних інформаційних технологій в системах дистанційного контролю технічних об'єктів, в якості яких розглянуто мостові споруди, їх особливості та сфери застосування. Було визначено концепцію дистанційного контролю мостових споруд, що реалізована в дисертації. Проаналізовано основні недоліки існуючих інформаційних технологій дистанційного контролю технічних об'єктів, а саме: складний процес отримання інформації про стан мостових споруд за допомогою контактних методів вимірювання прогинів та коефіцієнта динамічності; необхідність обмеження руху транспорту по мостовій споруді для отримання інформації про її стан; можливість оцінювання інформації про стан мостової споруди тільки в одній точці вимірювання; велика кількість інформації, яку потрібно проаналізувати і виділити саме корисну; використання складних та трудомістких у своїй реалізації методів знаходження інформації про стан споруд при аналізі саме нестаціонарних процесів тощо.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи побудови моделей, методів та інформаційних технологій дистанційного контролю мостових споруд. Проаналізовано сутність наявних моделей прийняття рішень щодо стану мостових споруд, яка полягає у вимірюванні коефіцієнта динамічності шляхом знаходження відношення динамічного прогину мосту посередині

найдовшого прольоту до статичного. Після цього знайдений коефіцієнт порівнюється із деяким пороговим значенням, яке встановлюється для певного типу мостової споруди і при перевищенні даного деякого порогу приймається рішення щодо подальшої експлуатації даної мостової споруди. Було звернено увагу на те, що дану модель прийняття рішень можна застосовувати для однорідних прогинів мостових споруд, коливання яких можна описати стаціонарним процесом. Але якщо коливання мостових споруд є нестаціонарним процесом, то традиційні методи та моделі прийняття рішень не є ефективними і потрібні нові методи, методи визначення інформації щодо стану мостових споруд.

У третьому розділі побудовано моделі, розроблено методи та інформаційна технологія дистанційного контролю мостових споруд. Одним з таких методів є метод збирання інформації про просторові прогини нижньої поверхні мостової споруди з використанням безконтактних методів вимірювання та знаходження інформації про мостову споруду з використанням мініатюрного радіолокатора, що може бути розміщений у будь-якому зручному для оператора місці, та системи вторинних випромінювачів, розміщених на нижній частині поверхні мостової споруди. Перевагою методу над наявними є можливість визначення інформації одразу у декількох точках мостової споруди, а не тільки в одній. Використовуючи даний метод точність отриманої інформації склала 90% при використанні рекомендованих параметрів системи. Запропоновано модель та метод визначення сталості, цінності інформації при дистанційному вимірюванні прогинів нижньої частини мостової споруди та інформаційну технологію прийняття рішень щодо стану мостової споруди в умовах нестаціонарних вхідних впливів. Удосконалено модель оцінювання сталості інформації, що отримана від нестаціонарних процесів, відносно опорного стаціонарного процесу, яка відрізняється обробленням інформації про стаціонарні моди Гільберта-Хуанга, що дозволяє підвищити якість прийняття автоматизованого рішення про стан технічного об'єкту. Після проведених експериментів було

отримано показник сталості від 0.86 до 0.98 для різних видів коливань мостової споруди. Набула подальшого розвитку інформаційна технологія дистанційного контролю технічних об'єктів, яка на відміну від відомих враховує нестационарність вхідних процесів, що забезпечує стабільність інформації для прийняття рішення. Набула подальшого розвитку модель та метод визначення цінності вимірювальної інформації про прогини мостових споруди, яка на відміну від відомих, враховує показники статистичних рішень щодо безпеки споруд, що дозволяє задовольнити суперечливим вимогам щодо безпеки та цінності інформації. Після проведених експериментів було отримано показник цінності інформації, який коливався в межах від  $V = 0.81$  до  $V = 0.95$  у залежності від прикладених до МС динамічних зовнішніх впливів при виборі порогового значення  $V_a = 0.8$ . Вибір порогових прогинів здійснюється з оптимальним врахуванням цих вимог.

У четвертому розділі розглянуто реалізації і впровадження розроблених моделей та методів для інших технічних об'єктів, наприклад, при навігації автономних мобільних роботів на незнайомій місцевості у разі відсутності GPS. По-перше, це система збирання і оброблення інформації на основі використання динамічних просторових каналів виявлення наземних орієнтирів. Зазначені канали створюються штучно при скануванні навколишньої місцевості відеокамерою і стисненні інформації шляхом переведення двомірних зображень в одомірні з метою виявлення наземних орієнтирів на фоні, що схожий за кольоровістю з орієнтирами. По-друге, це система збирання інформації про параметри кольоровості  $R, G, B$ , розкладання залежності останніх від просторової координати кадру зображень у просторі ортогональних мод Гільберта-Хуанга (дана декомпозиція використовується у випадку, коли початковий процес є саме нестационарним) та прийняття рішення про виявлення наземного орієнтиру на основі інформації про статистичний розподіл тільки перших трьох мод Гільберта-Хуанга.

Теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи використано у навчальному процесі кафедри «Мостів, конструкцій та будівельної механіки

ім. В. О. Російського» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету для навчання студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» у лекційних курсах «Інноваційні напрямки технології експлуатації транспортних споруд» та при підготовці лабораторного практикуму. Результати дисертаційної роботи впроваджено при виконанні теми «Розробка інформаційно-вимірювальних систем та систем діагностики статичних і динамічних об'єктів в машинобудівній та дорожньо-будівельній галузях» (номер державної реєстрації № 0120U104317).

*Ключові слова:* інформаційна технологія, дистанційний контроль технічних об'єктів, нестационарні сигнали, мостова споруда, коефіцієнт динамічності, моди Гільберта-Хуанга, автономний мобільний робот, наземний орієнтир.

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати*

1. Полярус О. В., Лебединський А. В. Метод, модель та інформаційна технологія визначення сталості інформації при дистанційному контролі стану технічних об'єктів. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2021. № 92. DOI: 10.32620/oikit.2021.92.12.

*(Особистий внесок здобувача: реалізація методу визначення сталості інформації, створення графічного інтерфейсу користувача)*

2. Результати вимірювань параметрів механічних коливань балки з використанням РЛС міліметрового діапазону / Р. Е. Пащенко та ін. *Технология приборостроения, научно-технический журнал*. 2018. № 2. С. 55-59.

*(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів, обробка отриманих результатів)*

3. Полярус О. В., Лебединський А. В. Дистанційне визначення діелектричної проникності бетонної плити мостової споруди. *Технология приборостроения, научно-технический журнал*. 2019. № 2. С. 62-65.

(Особистий внесок здобувача: реалізація методу визначення діелектричної проникності мостової споруди)

4. Measurement of the Bridge Surface Deflections Using Near-Field Amplitude of Secondary Radiators System / A. V. Lebedynskyi et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, № 6. P. 217-224.

(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів, обробка результатів експериментів, моделювання системи із вторинними випромінювачами, отримання результатів моделювання)

5. Influence of Measurements Uncertainty on Uncertainty of Gilbert-Huang Transform Modes / A. Lebedynskyi et al. *Proceedings of 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019, Sozopol, Bulgaria, 6-8 September, 2019, pp.* 2019. P. 644-647. DOI: 10.1109/caol46282.2019.9019512.

(Особистий внесок здобувача: аналіз впливу невизначеності вимірювань сигналу на невизначеність його мод Гільберта-Хуанга, моделювання залежностей мод при ідентифікації систем, отримання результатів моделювання).

6. Poliarus O. V., Poliakov Y. A., Lebedynskyi A. V. Measurement of Bridges Dynamic Deflections Using Arrays of Secondary Radiators. *IEEE Ukrainian Microwave week (UkrMW)*. 2020. № 1. P. 97-100.

(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів, обробка результатів експериментів, моделювання системи із вторинними випромінювачами, отримання результатів моделювання)

7. Poliarus O., Poliakov Y., Lebedynskyi A. Detection of landmarks by autonomous mobile robots using camera-based sensors in outdoor environments. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, № 10. P. 11443-11450. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3010883.

(Особистий внесок здобувача: проведення розкладання зображень фону та орієнтиру на складові кольоровості, створення графіків залежностей,

визначення законів розподілення ймовірностей, отримання результатів моделювання)

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

8. Poliarus O. V., Lebedynskyi A. V. Method for Determining Information Stability in Information Technologies at Technical Objects. *Computer technology and mechatronics* : proceedings of the third international scientific and methodical conference, Kharkiv, 27-28 May 2021. Kharkiv: KhNAHu, 2021. P. 145-147.

*(Особистий внесок здобувача: доповідав та брав участь у обговоренні результатів, реалізував метод визначення сталості інформації, підготував основну частину тексту)*

9. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Lebedynskyi A. V. Method of determining measurement information value for bridges safety. *Проблеми надзвичайних ситуацій. Матеріали конференції*. : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations», м. Харків, 20-21 травня 2021. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2021. С. 77-78.

*(Особистий внесок здобувача: доповідав та брав участь у обговоренні результатів, реалізував метод визначення цінності інформації, підготував основну частину тексту)*

10. Полярус О. В., Краснов С. М., Лебединський А. В. Метод дистанційного визначення коефіцієнта динамічності мостової споруди вимірювальною інформаційною системою малої вартості. *Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи* : Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи» (МІВТС-2020), г. Харків, 28-29 січня 2020. Харків: Український метрологічний журнал, 2020. С. 110-111.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, промоделював метод визначення коефіцієнта динамічності мостової споруди*



*вимірювальною інформаційною системою малої вартості, підготував основну частину тексту)*

11. Лебединський А. В. Оцінка стаціонарності за допомогою методу зворотного розподілення. *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах* : Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Харків, 4-5 листопада 2019. Харків: ХНАДУ, 2019. С. 173-175. URL: [https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/58643/mod\\_resource/content/1/sbornik\\_konf\\_2019.pdf](https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/58643/mod_resource/content/1/sbornik_konf_2019.pdf). (дата звернення: 19.11.2020).

12. Лебединський А. В. *Застосування перетворення Гільберта-Хуанга в ІТ-технологіях. Комп'ютерні технології і мехатроніка* : Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні технології і мехатроніка», м. Харків, 28-29 Травня 2020. Харків: ХНАДУ, 2020. С. 114-117.

13. Лебединський А. В., Янушкевич С. Д. Оцінка точності апроксимації нестаціонарних сигналів емпіричними модами Гільберта-Хуанга. *Комп'ютерні технології і мехатроніка* : Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні технології і мехатроніка», м. Харків, 30-31 Травня 2019. Харків: ХНАДУ, 2019. С. 109-112.

*(Особистий внесок здобувача: доповідав та брав участь у обговоренні результатів, оцінив точність апроксимації нестаціонарних сигналів емпіричними модами Гільберта-Хуанга, побудував графіки, підготував основну частину тексту)*

14. Lebedynskiy A. V. Hilbert-Huang Transform and its Application. *Студентство. Наука. Іноземна мова* : Збірник наукових праць студентів, аспірантів та молодих науковців, м. Харків, 20-21 Травня 2019. Харків: ХНАДУ, 2019.

15. Лебединський А. В. Подготовка экспериментальных данных колебания модели балки моста к обработке. *Мости, тунелі і дороги: стан,*

*проблеми утримання та перспективи підвищення довговічності* : Всеукраїнська науково-практична Інтернет конференція, м. Харків, 25-26 March 2018. Харків: ХНАДУ, 2018. URL: [https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/49375/mod\\_resource/content/2/СБОРН\\_ИК.pdf](https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/49375/mod_resource/content/2/СБОРН_ИК.pdf). (дата звернення: 25.08.2021).

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

16. Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 124207 Україна. № 201710597; заявл. 01.11.2017; опубл. 26.03.2018.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

17. Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 118730 Україна. № 201710596; заявл. 01.11.2017; опубл. 25.02.2019.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

18. Спосіб дистанційного визначення динамічних прогинів і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 146478 Україна. № 202005999; заявл. 21.09.2020; опубл. 24.02.2021.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

19. Спосіб виявлення циліндроподібних наземних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів: пат. 146486 Україна. № 202006061; заявл. 22.09.2020; опубл. 24.02.2021.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

20. Спосіб виявлення циліндроподібних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів: пат. 146487 Україна. № 202006062; заявл. 22.09.2020; опубл. 24.02.2021.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

## ABSTRACT

*Lebedynskiy A. V.* Models, methods and information technology for remote monitoring technical objects with non-stationary signals. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree in Information Technology, speciality 122 «Computer Science». – Kharkiv National Automobile and Highway University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The work was carried out at the Department of Metrology and Life Safety of Kharkiv National Automobile and Highway University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

*The object of the study* is the process of automated decision-making about the condition of bridge structures on the basis of their non-stationary deflections, obtained by remote measurement.

*The subject of the research* is models, methods and information technology of providing automated decision-making on the condition of bridge structures on the basis of the results of remote measurement of parameters of non-stationary deflection processes.

The PhD thesis is devoted to the development of models, methods and information technology of remote monitoring technical objects with non-stationary output signals for automatic decision-making on the state of these objects. Bridge structures and autonomous mobile robots were used as technical objects in the research.

Models, methods and information technology of remote monitoring technical objects with non-stationary signals have been presented in the thesis. In contrast to well-known technical solutions, our technology provides sustainability and value of obtained data in real-time mode when analysing non-stationary processes. That was substantiated by 5 patents of Ukraine, obtained by the author and his colleagues.

The dissertation is related to the relevant world-wide problem of real-time analysis of non-stationary processes, the characteristics of which are difficult to predict, and it is very difficult to extract valuable information in a large data set and to draw conclusions about the process itself.

In Introduction the choice of the theme of the research and topicality of the thesis have been substantiated, the purpose and objectives have been formulated, the object, subject and methods of the study have been defined, the connection of the work with scientific themes according to the Ministry of Education and Science of Ukraine has been shown, the scientific novelty has been provided and practical significance of the results has been formulated.

The first section is devoted to the literature review on the subject of the dissertation, in particular a comprehensive analysis of existing information technologies in systems for remote monitoring technical objects like bridges and landmarks for autonomous mobile robots, their features and their applications. The main shortcomings of existing information technologies of remote monitoring technical objects have been analysed in particular: the complex process of obtaining data about bridge structure conditions using contact methods of measuring deflections and the dynamic amplification factor; the need to restrict traffic on the bridge to obtain information about its condition; the ability to find data about the bridge structure only at one measurement point; a large amount of information to be

analysed and selected as useful; the use of complex and time-consuming for implementing methods of finding information about the state of structures while analyzing non-stationary processes, etc.

In the second section the theoretical bases of construction of models, methods and information technology of remote control of bridge constructions were considered. The essence of the existing models of decision-making on the condition of bridge structures was considered, which consists in measuring dynamic amplification factor by finding the ratio of the dynamic deflection to the static one of the bridges in the middle of the longest span. After that, the factor that was found, is compared with threshold value, which is set for a certain type of bridge structure and if this certain threshold is exceeded, a decision will be made on the further operation of this bridge structure. Attention was drawn to the fact that this decision-making model can be applied to homogeneous deflections of a bridge structure, the fluctuations of which can be described by a stationary process. But if the fluctuations of the BS are a non-stationary process, then the traditional methods and models of decision-making do not work here and new methods are needed, methods of finding information about the state of the bridge structures.

In the third section, the models have been created and the methods in information technologies for remote monitoring bridge constructions have been developed. One of these methods is the method of collecting information on the spatial deflections of the lower surface of bridge structures using non-contact methods of measuring and finding data about bridge structures using a miniature radar that can be located in any convenient place for the operator and a system of secondary emitters located on the lower part of the bridge structures surface. The advantage of the method over the existing ones is the ability to obtain data at several points of the bridge construction, not only one. The model and information technology for determining constancy, data value by remote measuring deflections of the lower part of the bridge structure and information technology of decision-making on the bridge structures conditions with non-stationary input actions have been offered. The model for estimating the sustainability of information obtained

from non-stationary processes relative to the reference stationary process has been improved. It differs in data processing about the stationary Hilbert-Huang modes, which allow one to improve the quality of automatic decision-making about the state of any technical object. Information technology for remote monitoring technical objects has been further developed, in contrast to the well-known ones it takes into account the non-stationary nature of input processes and ensures the sustainability of data for decision-making. The information technology for determining the value of measuring data about the bridge structure deflections has been further developed, in contrast to the well-known ones it takes into account the indicators of statistical decisions on the safety of structures, which allows meeting conflicting requirements for data safety and value. The choice of threshold deflections is carried out with the best possible subject to these requirements.

The fourth section discusses the implementation of using the developed models, methods and information technology for technical objects, e.g., for navigating autonomous mobile robots in unfamiliar terrain when GPS is not available. Firstly, it is a system for data collecting and processing based on using dynamic spatial channels for detecting landmarks. These channels are created artificially when scanning the surrounding area with a video camera and compressing data by converting two-dimensional images into one-dimensional ones to identify landmarks against a background similar to landmarks in colour. Secondly, it is a system for collecting data about the chromaticity parameters  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , decomposing the dependence of the latter on the spatial coordinate of the image frame in the space of orthogonal Hilbert-Huang modes, and decision-making on the detection of a landmark based on information about the statistical distribution of only the first three Hilbert-Huang modes.

Theoretical and applied results of the thesis have been used in the educational process of the Department of Bridges, Structures and Building Mechanics at KhNAHU for training students (speciality 192 «Construction and Civil Engineering»), in lecture courses «Innovative Directions of Operational Technology of Transport Facilities» and when making preparation for Laboratory Practicum.

The results of the dissertation have been implemented in the project «Development of information-measuring systems and diagnostic systems for static and dynamic objects in the machine-building and road-building industries» (state registration number 0120U104317).

*Keywords:* information technology, remote control of technical objects, non-stationary signals, bridge construction, autonomous mobile robot, landmark.

## LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

*Scientific papers, in which the main scientific results are published:*

1. Poliarus O. V., Lebedynskyi A. V. Metod, model ta informatsiina tekhnolohiia vyznachennia stalosti informatsii pry dystantsiinomu kontroli stanu tekhnichnykh obiektiv. *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii*. 2021. № 92. DOI: 10.32620/oikit.2021.92.12.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: realizatsiia metodu vyznachennia stalosti informatsii, stvorennia hrafichnoho interfeisu korystuvacha)*

2. Rezultaty vymiriuvan parametriv mekhanichnykh kolyvan balky z vykorystanniam RLS milimetrovoho diapazonu / R. E. Pashchenko ta in. *Tekhnolohiia pryborostroenya, nauchno-tekhnycheskyi zhurnal*. 2018. № 2. S. 55-59.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: provedennia eksperymentiv, obrobka otrymanykh rezultativ)*

3. Poliarus O. V., Lebedynskyi A. V. Dystantsiine vyznachennia dielektrychnoi pronyknosti betonnoi plyty mostovoi sporudy. *Tekhnolohiia pryborostroenya, nauchno-tekhnycheskyi zhurnal*. 2019. № 2. C. 62-65

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: realizatsiia metodu vyznachennia dielektrychnoi pronyknosti mostovoi sporudy)*

4. Measurement of the Bridge Surface Deflections Using Near-Field Amplitude of Secondary Radiators System / O. V. Poliarus et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, № 6. P. 217-224.

*(Osobystyi vnesok zdozvachy: provedennia eksperymentiv, obrobka rezultativ eksperymentiv, modeliuвання systemy iz vtorynnymy vprominiuvachamy, otrymannia rezultativ modeliuвання)*

5. Influence of Measurements Uncertainty on Uncertainty of Gilbert-Huang Transform Modes / O. Poliarus et al. *Proceedings of 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019, Sozopol, Bulgaria, 6-8 September, 2019, pp. 2019. P. 644-647. DOI: 10.1109/caol46282.2019.9019512.*

*(Osobystyi vnesok zdozvachy: analiz vplyvu nevyznachenosti vymiriuvan syhnalu na nevyznachenist yoho mod Hilberta-Khuanha, modeliuвання zalezhnosti mod pry identyfikatsii system, otrymannia rezultativ modeliuвання).*

6. Poliarus O. V., Poliakov Y. A., Lebedynskyi A. V. Measurement of Bridges Dynamic Deflections Using Arrays of Secondary Radiators. *IEEE Ukrainian Microwave week (UkrMW)*. 2020. № 1. P. 97-100.

*(Osobystyi vnesok zdozvachy: provedennia eksperymentiv, obrobka rezultativ eksperymentiv, modeliuвання systemy iz vtorynnymy vprominiuvachamy, otrymannia rezultativ modeliuвання)*

7. Poliarus O., Poliakov Y., Lebedynskyi A. Detection of landmarks by autonomous mobile robots using camera-based sensors in outdoor environments. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, № 10. P. 11443-11450. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3010883.

*(Osobystyi vnesok zdozvachy: provedennia rozkladannia zobrazhen fonu ta oriientyru na skladovi kolorovosti, stvorennia hrafikiv zalezhnosti, znakhodzhennia zakoniv rozpodilennia ymovirnosti, otrymannia rezultativ modeliuвання)*

*Published works for approbation purpose:*

8. Poliarus O. V., Lebedynskyi A. V. Method for Determining Information Stability in Information Technologies at Technical Objects. *Computer technology and mechatronics* : proceedings of the third international scientific and methodical conference, Kharkiv, 27-28 May 2021. Kharkiv: KhNAHu, 2021. P. 145-147.



*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: dopovidav ta brav uchast u obhovorenni rezultativ, realizuvav metod vyznachennia stalosti informatsii, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu)*

9. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Lebedynskyi A. V. Method of determining measurement information value for bridges safety. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii. Materialy konferentsii.* : Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problems of Emergency Situations», m. Kharkiv, 20-21 travnia 2021. Kharkiv: Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy, 2021. C. 77-78.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: dopovidav ta brav uchast u obhovorenni rezultativ, realizuvav metod vyznachennia tsinnosti informatsii, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu)*

10. Poliarus O. V., Krasnov S. M., Lebedynskyi A. V. Metod dystantsiinoho vyznachennia koefitsiienta dynamichnosti mostovoi sporudy vymiriuvalnoiu informatsiinoiu systemoiu maloi vartosti. *Metrolohiia, informatsiino-vymiriuvalni tekhnologii ta systemy* : Materialy 7-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnicnoi konferentsii «Metrolohiia, informatsiino-vymiriuvalni tekhnologii ta systemy» (MIVTS-2020), h. Kharkiv, 28-29 sichnia 2020. Kharkiv: Ukrainyskyi metrolohichnyi zhurnal, 2020. C. 110-111.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: brav uchast u obhovorenni rezultativ, promodeliuvav metod vyznachennia koefitsiienta dynamichnosti mostovoi sporudy vymiriuvalnoiu informatsiinoiu systemoiu maloi vartosti, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu)*

11. Lebedynskyi A. V. Otsinka statsionarnosti za dopomohoiu metodu zvorotnoho rozpodilennia. *Metrolohichni aspekty pryiniattia rishen v umovakh roboty na tekhnohenno nebezpechnykh ob'ektakh* : Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, m. Kharkiv, 4-5 lystopada 2019. Kharkiv: KhNADU, 2019. C. 173-175.

URL:

[https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/58643/mod\\_resource/content/1/sbornik\\_konf\\_2019.pdf](https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/58643/mod_resource/content/1/sbornik_konf_2019.pdf). (data zvernennia: 19.11.2020).

12. Lebedynskiy A. V. Zastosuvannya peretvorennia Hilberta-Khuanha v IT-tekhnologiiakh. *Kompiuterni tekhnolohii i mekhatronika* : Zbirnyk naukovykh prats za materialamy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Kompiuterni tekhnolohii i mekhatronika», m. Kharkiv, 28-29 Travnia 2020. Kharkiv: KhNADU, 2020. C. 114-117.

13. Lebedynskiy A. V., Yanushkevych S. D. Otsinka tochnosti aproksymatsii nestatsionarnykh syhnaliv empirychnymy modamy Hilberta-Khuanha. *Kompiuterni tekhnolohii i mekhatronika* : Zbirnyk naukovykh prats za materialamy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Kompiuterni tekhnolohii i mekhatronika», m. Kharkiv, 30-31 Travnia 2019. Kharkiv: KhNADU, 2019. C. 109-112.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: dopovidav ta brav uchast u obhovorenni rezultativ, otsinyv tochnist aproksymatsii nestatsionarnykh syhnaliv empirychnymy modamy Hilberta-Khuanha, pobuduvav hrafiky, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu)*

14. Lebedynskiy A. V. Hilbert-Huang Transform and its Application. *Studentstvo. Nauka. Inozemna mova* : Zbirnyk naukovykh prats studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv, m. Kharkiv, 20-21 Travnia 2019. Kharkiv: KhNADU, 2019.

15. Lebedynskiy A. V. Podhotovka eksperymentalnykh dannykh kolebanyia modely balky mosta k obrabotke. *Mosty, tuneli i dorohy: stan, problemy utrymannia ta perspektyvy pidvyshchennia dovhovichnosti* : Vseukrainska naukovo-praktychna Internet konferentsiia, m. Kharkiv, 25-26 March 2018. Kharkiv: KhNADU, 2018. URL:

[https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/49375/mod\\_resource/content/2/SBORN YK.pdf](https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/49375/mod_resource/content/2/SBORN YK.pdf). (data zvernennia: 25.08.2021).

*Scientific works that additionally represent the scientific results of the dissertation:*

16. Sposib dystantsiinoho vyznachennia koefitsiienta dynamichnosti i formy deformovanoi poverkhni mostovykh sporud abo inshykh velykohabarytnykh

obiektiv: pat. 124207 Ukraina. № 201710597; zaiavl. 01.11.2017; opubl. 26.03.2018.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: brav uchast u obhovorenni rezultativ, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu, proviv modeliuvannia, otrymav i obrobyv rezultaty modeliuvannia)*

17. Sposib dystantsiinoho vyznachennia koefitsiienta dynamichnosti i formy deformovanoi poverkhni mostovykh sporud abo inshykh velykohabarytnykh obiektiv: pat. 118730 Ukraina. № 201710596; zaiavl. 01.11.2017; opubl. 25.02.2019.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: brav uchast u obhovorenni rezultativ, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu, proviv modeliuvannia, otrymav i obrobyv rezultaty modeliuvannia)*

18. Sposib dystantsiinoho vyznachennia dynamichnykh prohyniv i formy deformovanoi poverkhni mostovykh sporud abo inshykh velykohabarytnykh obiektiv: pat. 146478 Ukraina. № 202005999; zaiavl. 21.09.2020; opubl. 24.02.2021.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: brav uchast u obhovorenni rezultativ, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu, proviv modeliuvannia, otrymav i obrobyv rezultaty modeliuvannia)*

19. Sposib vyivlennia tsylindropodibnykh nazemnykh oriientyriv pry navihatsii avtonomnykh mobilnykh robotiv: pat. 146486 Ukraina. № 202006061; zaiavl. 22.09.2020; opubl. 24.02.2021.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: brav uchast u obhovorenni rezultativ, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu, proviv modeliuvannia, otrymav i obrobyv rezultaty modeliuvannia)*

20. Sposib vyivlennia tsylindropodibnykh oriientyriv pry navihatsii avtonomnykh mobilnykh robotiv: pat. 146487 Ukraina. № 202006062; zaiavl. 22.09.2020; opubl. 24.02.2021.

*(Osobystyi vnesok zdobuvacha: brav uchast u obhovorenni rezultativ, pidhotuvav osnovnu chastynu tekstu, proviv modeliuvannia, otry mav i obrobyv rezultaty modeliuvannia)*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	24
ВСТУП .....	25
РОЗДІЛ 1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ МОСТОВИХ СПОРУД.....	31
1.1 Загальна характеристика мостових споруд як джерел інформації .....	31
1.2 Інформаційні технології в системах контролю мостових споруд.....	35
1.3 Концепція дистанційного контролю мостових споруд, що реалізована в дисертації .....	41
1.4 Основні недоліки наявних інформаційних технологій дистанційного контролю мостових споруд.....	45
1.5 Вибір мети та задач дослідження .....	47
Висновки по розділу 1 .....	49
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ МОСТОВИХ СПОРУД.....	51
2.1 Структурна модель інформаційної технології дистанційного контролю стану мостових споруд .....	51
2.2 Модель та метод дистанційного контролю мостових споруд .....	52
2.3 Сутність моделі прийняття рішення про стан мостових споруд .....	56
2.4 Прийняття рішення про стан мостової споруди на основі методу аналізу ієрархій .....	58
Висновки по до розділу 2 .....	60
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ МОСТОВИХ СПОРУД.....	62

3.1 Обґрунтування інформаційної інфраструктури для системи контролю мостових споруд.....	62
3.2 Загальна модель калібрування віртуальної системи для дистанційного вимірювання прогинів в одній точці мостової споруди.....	65
3.3 Новий метод дистанційного збирання інформації в системі контролю стану мостових споруд.....	74
3.4 Інформаційна технологія прийняття рішень про стан мостової споруди при обробленні нестационарних випадкових процесів прогинів.....	86
3.5 Модель та метод визначення сталості інформації при дистанційному вимірюванні прогинів нижньої частини мостової споруди.....	96
3.6 Модель та метод визначення цінності вимірювальної інформації в інтересах безпеки мостових споруд .....	102
Висновки до розділу 3 .....	115
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ .....	117
4.1 Перспективи впровадження запропонованого методу для контролю технічного стану мостових споруд.....	117
4.2 Метод виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами .....	119
4.2.1 Вибір засобів виявлення наземного орієнтиру .....	119
4.2.2 Вибір моделей прийняття рішення.....	120
4.3 Нові методи збирання і оброблення інформації в системі дистанційного виявлення наземних орієнтирів бортовими системами автономних мобільних роботів .....	123
4.3.1 Система збирання і оброблення інформації на основі використання динамічних просторових каналів виявлення наземних орієнтирів .....	123

4.3.2 Система збирання інформації про виявлення наземних орієнтирів на основі її оброблення в функціональному просторі ортогональних мод Гільберта-Хуанга.....	136
4.4 Показники, що характеризують досягнення мети дисертаційної роботи	144
Висновки до розділу 4 .....	147
ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТОК А МЕТОД ДИСТАНЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ ДИЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ НИЖНЬОЇ ПОВЕРХНІ БЕТОННИХ МОСТОВИХ СПОРУД.....	160
ДОДАТОК Б ОТРИМАНІ ПАТЕНТИ .....	166
ДОДАТОК В АКТ О ВПРОВАДЖЕННІ.....	171
ДОДАТОК Г СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	172

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АМР – автономний мобільний робот;  
БД – база даних;  
ВІ – вимірювальна інформація;  
ВІС – вимірювальна інформаційна система;  
Г-Х – Гільберта-Хуанга;  
ЕМХ – електромагнітна хвиля;  
ЕС – експертна система;  
ІС – інформаційна система;  
ІТ – інформаційна технологія;  
МАІ – метод аналізу ієрархій;  
МС – мостова споруда;



## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Сучасний етап розвитку суспільства припускає активне впровадження інформаційних технологій в усі галузі промисловості та інфраструктуру країни з метою забезпечення безпеки функціонування технічних об'єктів. Такими об'єктами, зокрема, є мостові споруди, інформація про стан яких повинна регулярно надходити в системи її оброблення. Отримання цієї інформації здійснюється з допомогою вимірювальних інформаційних систем, що включають контактні датчики або елементи дистанційних вимірювань (радары, лазерні системи тощо). Оцінка технічного стану мостових споруд здійснюється на основі визначення коефіцієнта динамічності як узагальненого параметра, перевищення граничного значення якого є основою для прийняття рішення про дефектний стан мосту. Коефіцієнт динамічності являє собою відношення динамічного до статичного прогинів у визначеній точці нижньої частини мостової споруди під дією стандартного навантаження. Збільшення об'єму вимірювальної інформації за рахунок вимірювання прогинів на всій площині мостової споруди та з урахуванням дискретності їх значень після оброблення істотно розширює динамічну базу даних прогинів, причому цю базу потрібно регулярно оновлювати. Створення в технологічно розвинутих країнах світу smart-мостів, в яких інформація збирається не тільки від засобів вимірювання параметрів мостової споруди, але і від самих автомобілів, що проїжджають через міст, створила проблему використання отриманої інформації. Великий об'єм інформації не завжди є корисним при прийнятті рішення і може навіть знижувати його достовірність. Звідси випливає необхідність використання тільки найбільш цінної інформації, що досягається шляхом оптимальної побудови пристроїв оброблення інформації і впровадження новітніх методів зберігання інформації в базах даних та її використання в інформаційних технологіях. Дистанційне або контактне вимірювання прогинів нижньої частини мостової споруди з метою визначення її коефіцієнта динамічності

вимагає перекриття проїзду транспортних засобів по мостовій споруді на час випробувань, який може досягати десятків хвилин або декількох годин з урахуванням підготовки до вимірювання. На завантажених дорогах це створює великі незручності і приводить до економічної шкоди суб'єктам господарства. Вимірювання прогинів мостової споруди, що виникають під дією нестандартних випадкових навантажень, створює проблему прийняття адекватного рішення щодо стану мостів, оскільки на цей час ще не розроблена прийнятна теорія для розв'язання такої проблеми. Більш того, не існує простих і дешевих методів дистанційного контролю всієї нижньої поверхні мостової споруди. Оскільки випадкове поле прогинів є, як правило, неоднорідним, а випадкові процеси в кожній точці контролю найчастіше є нестаціонарними, то задача прийняття достовірного автоматизованого рішення про стан мостової споруди є надзвичайно складною і її не завжди можна розв'язати, оскільки не вистачає надійних методів, моделей та інформаційних технологій дистанційного контролю мостових споруд. Випадкові поля і процеси прогинів на мостових спорудах не є швидкоплинними і для перевірки зазначених методів, моделей та інформаційних технологій в умовах швидкоплинних процесів потрібно оцінити їх якість стосовно інших технічних об'єктів, зокрема для процесів, що супроводжують навігацію автономних мобільних роботів на незнайомій місцевості у відсутності GPS. Основне завдання навігації таких автономних мобільних роботів є виявлення належного наземного орієнтиру, який можна потім використовувати як точку відліку при автономній навігації робота. Виявлення орієнтиру здійснюється з допомогою декількох активних та пасивних дистанційних систем, що працюють на різних фізичних принципах, причому активні засоби виявлення створюють самі для себе ненавмисні завади, які дуже ускладнюють процес виявлення орієнтиру. При цьому інформаційна система вимушена переробляти дуже великий об'єм інформації, який треба так використовувати, щоб отримати найбільшу ймовірність виявлення орієнтиру в конкретних умовах збирання і оброблення інформації від нестаціонарних сигналів, як і в мостових спорудах.

Отже, істотне збільшення кількості інформації, на основі якої приймається автоматизоване рішення про стан мостових споруд або інших технічних об'єктів, та розвиток smart-технологій в багатьох технологічно передових країнах світу привів до необхідності встановлення відповідності між дуже розвинутими засобами вимірювання параметрів технічних об'єктів та відсталими інформаційними технологіями, що досі використовуються на зазначених технічних об'єктах.

Таким чином, науково-прикладна задача розроблення та організації інформаційних технологій на основі нових моделей та методів дистанційного контролю стану мостових споруд та інших технічних об'єктів, від яких отримують нестационарні сигнали, є актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до тематичних планів наукових досліджень кафедри метрології та безпеки життєдіяльності Харківського національного автомобільно-дорожнього університету у межах науково-дослідної тематики відповідно до завдань держбюджетних тем МОН України: «Розробка інформаційно-вимірювальних систем та систем діагностики статичних і динамічних об'єктів в машинобудівній та дорожньо-будівельній галузях» (ДР № 0120U104317).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення якості прийняття автоматизованого рішення щодо стану мостових споруд на основі розроблених моделей, методів та інформаційної технології дистанційного контролю технічних об'єктів з нестационарними вихідними сигналами.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **завдання:**

1. Проаналізувати сучасний стан інформаційних технологій, що використовуються на мостових спорудах в інтересах прийняття безпекових рішень.

2. Створити математичні моделі процесів, що супроводжують дистанційний контроль мостових споруд.

3. Розробити метод дистанційного збирання вимірювальної інформації від мостових споруд.

4. Удосконалити модель та метод оцінювання сталості інформації в умовах нестаціонарності прогинів мостових споруд.

5. Удосконалити модель та метод визначення цінності інформації, що отримується при дистанційному вимірюванні прогинів мостових споруд.

6. Розвинути інформаційну технологію для автоматизованого прийняття рішень про стан мостових споруд з урахуванням нестаціонарних випадкових процесів їх прогинів.

7. Перевірити ефективність розроблених моделей, методів та інформаційну технологію для технічного об'єкту, для якого потрібний малий час прийняття рішення щодо його стану.

*Об'єктом дослідження* є процес автоматизованого прийняття рішення про стан мостових споруд на основі нестаціонарних їх прогинів, що отримані при дистанційному вимірюванні.

*Предметом дослідження* є моделі, методи та інформаційна технологія забезпечення автоматизованого прийняття рішень про стан мостових споруд на основі результатів дистанційного вимірювання параметрів нестаціонарних процесів прогинів.

**Методи дослідження.** Теоретичною та методологічною основою дисертаційного дослідження є теорія інформації, інформатика, математична статистика, теорія прийняття рішень, електродинаміка, метрологія, теорія виявлення сигналів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що в інтересах прийняття рішень щодо стану мостових споруд:

*вперше:*

– розроблено новий метод дистанційного збирання вимірювальної інформації про прогини нижньої поверхні бетонної мостової споруди, який на

відміну від відомих забезпечує одночасне вимірювання нестационарних прогинів всієї поверхні, що дозволяє підвищити оперативність прийняття рішення про безпеку споруди при невеликих економічних витратах;

*удосконалено:*

– модель та метод оцінювання сталості інформації, що отримана від нестационарних процесів прогинів, відносно опорного стаціонарного процесу, які відрізняються обробленням інформації про стаціонарні моди Гільберта-Хуанга, що дозволяє підвищити якість прийняття автоматизованого рішення про стан мостової споруди;

– модель та метод визначення цінності вимірювальної інформації про прогини мостових споруд, які на відміну від відомих, враховують показники статистичних рішень щодо безпеки споруд, що дозволяє задовольнити суперечливим вимогам з безпеки споруд та цінності інформації;

*набула подальшого розвитку:*

– інформаційна технологія прийняття рішення про стан мостових споруд, яка на відміну від відомих враховує нестационарність процесів прогинів, що забезпечує стабільність інформації для прийняття рішення.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що вдосконалена інформаційна технологія дозволить істотно збільшити об'єм вимірювальної інформації, з якої вибирається найбільш цінна інформація в умовах обробки нестационарних вхідних впливів для прийняття автоматизованого рішення про стан мостових споруд.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи, що представлено до захисту, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз науково-технічної літератури, проведення практичних досліджень, аналіз отриманих результатів. Постановку мети і завдань досліджень, аналіз та обговорення одержаних результатів виконано спільно з науковим керівником професором, д.т.н. Полярусом О. В.

**Апробація результатів дисертації.** Результати наукового пошуку Лебединського А. В. обговорювались на міжнародних науково-практичних

конференціях «Комп'ютерні технології і мехатроніка» в 2019, 2020, 2021 роках, 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи» (МІВТС-2020), 2020 р., «Problems of Emergency Situations», 2021 р.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано у 20 наукових працях, з яких: 3 статті у наукових фахових виданнях України; 4 статті, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science; 8 статей у матеріалах конференцій. За матеріалами дисертації було отримано 5 патентів України, з яких: 4 патенти на корисну модель і 1 патент на винахід.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 176 сторінок, з них: 49 рисунків по тексту; список використаних джерел з 83 найменувань на 8 сторінках; 4 додатка на 17 сторінках.

## РОЗДІЛ 1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ МОСТОВИХ СПОРУД

### 1.1 Загальна характеристика мостових споруд як джерел інформації

Поняття інформації немає сенсу при відсутності зацікавленого одержувача інформації, наприклад людини. Сторонній особі не цікаві процеси, що відбуваються на технічному об'єкті, зокрема, мостовій споруді (МС). При належній організації між об'єктом та одержувачем (користувачем) інформації відбувається інформаційний процес (рис. 1.1).

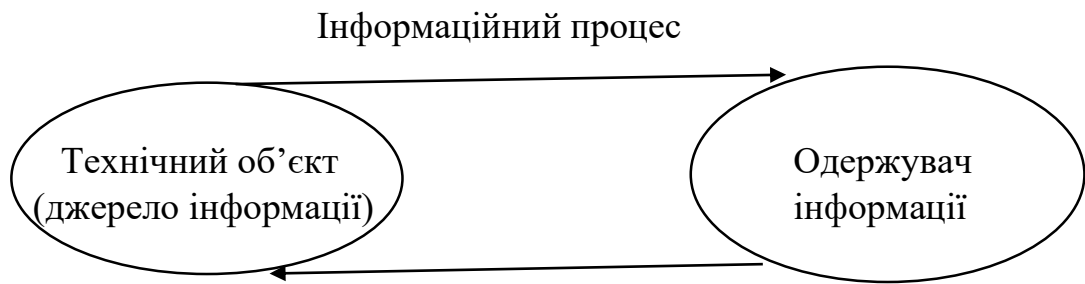


Рисунок 1.1 – Спрощена схема отримання інформації

Організація цього процесу є предметом інформаційних технологій (ІТ). В [1] розглянуто основні поняття інформації, які інтерпретуємо стосовно задач, що розглядаються в дисертації. В роботі основним технічним об'єктом є мостова споруда. Згідно з [2] технічний об'єкт – це будь-який виріб (наприклад, функціональна одиниця або система), який можна розглядати відокремлено. До технічних об'єктів відносяться, зокрема, споруди, що виконують певні функції з перетворення, зберігання або транспортування речовини, енергії чи інформації. Згідно з [3] до мостових споруд відносяться мости, шляхопроводи, віадуки, естакади, галереї, балкони, акведуки. Динамічні процеси, що протікають на МС під дією навантажень, є відносно повільними. Важливо перевірити розроблені в дисертації ІТ для швидкоплинних процесів і тому в четвертому розділі розглядається в якості

технічного об'єкту система автономної навігації мобільного робота (АМР), яка аналізувалась за планом наукових досліджень кафедри. Характер інформації, що приймається від МС та АМР, істотно відрізняється, а методи її оцінки повинні бути близькими, хоча зі своїми особливостями.

МС з часом поступово втрачає свої експлуатаційні властивості і будь-яка інформація про ці втрати є корисною для відповідних організацій. Отже, в дисертації розглядається прагматичний аспект інформації з точки зору її використання для прийняття рішення, а семантичний її аспект не розглядається. Мовою інформації в дисертації є по суті закодовані фізичними процесами результати вимірювань узагальнених чи важливих параметрів технічних об'єктів. Декодування цих процесів розробленими в дисертації методами дозволяє сформулювати множину рішень, а статистичний вибір правильного рішення здійснюється на основі науково обґрунтованих алгоритмів.

Серед різних видів інформації в дисертації аналізується тільки науково-технічна інформація про вибрані об'єкти. Як результат, створюється інформаційна модель об'єкта. Джерелом інформації є технічний об'єкт (найчастіше, МС), а приймачем – апаратура мобільної вимірювальної системи або оператор (людина). Передавачем (кодером) можуть служити датчики чи металеві пластини, які встановлюються на МС, а приймачем – апаратура мобільної вимірювальної системи. Каналом передачі інформації в роботі є частина тропосфери, що знаходиться біля технічного об'єкту. Джерело інформації разом з передавачем створюють множину даних, яка після обробки перетворюється в зрозумілу для споживача інформацію.

Об'єкти та процеси, що розглядаються в дисертації, можуть характеризуватись показниками, що введені Шенноном [4], і на їх основі прийматись рішення, які є важливими для людини і об'єкту. В роботі [5] змістовність інформації пропонується оцінювати як різницю ймовірностей досягнення мети при наявності та відсутності зазначеної інформації. В такій



інтерпретації змістовність близька до цінності інформації, яка детально досліджується в дисертації.

Для отримання надійної інформації необхідно характеристики вимірювально інформаційної системи (ВІС) узгоджувати з відповідними характеристиками процесів, що формуються технічними об'єктами. Такі дослідження, тобто синтез оптимальних систем обробки вимірювальної інформації (ВІ) в інтересах прийняття рішень приведені в третьому та четвертому розділах дисертації. Отже, інформація в такій постановці є відображення множини характеристик технічного об'єкту в множину результатів вимірювання ВІС у вигляді таблиць, графіків тощо як з участю людини (оператора), так і без її участі.

Збирання та реєстрація інформації в ІТ здійснюється з допомогою датчиків (контактних і неконтактних), передача інформації по різним каналам зв'язку реалізується у вигляді зручному для оброблення в комп'ютері. Зберігання інформації (обробленої чи необробленої) здійснюється в різних елементах пам'яті, наприклад на жорстких дисках. Найчастіше повідомлення передається з допомогою сигналу, параметри якого є інтересом для одержувача інформації, наприклад, прогини конструкції в МС.

Реально мостові споруди є не статичними, а динамічними об'єктами. З часом під дією внутрішніх напружень та зовнішніх впливів (вітер, рух транспорту, зсув ґрунту, сейсмічні, температурні, снігові, хвильові впливи тощо) елементи МС коливаються як у вертикальній, так і в горизонтальній площині. Ці коливання несуть діагностичну інформацію про технічний стан МС. На практиці використовується тільки інформація про прогини нижньої частини плити мосту. При цьому експериментально визначається коефіцієнт динамічності [6] як відношення динамічного до статичного прогинів балок мосту в однаковому перерізі, як правило, посередині МС.

Вимірювання значень прогинів проводяться за допомогою контактних і неконтактних інструментальних засобів. Перспективними неконтактними засобами вважають дистанційні вимірювачі прогинів МС (лазерні,

радіолокаційні тощо). Лазерні вимірювачі складаються з джерела, відбивача і приймача світла. Джерелом світла є лазер, а вимірювальний комплекс разом із приймачем відбитого світла включає також систему оброблення і подання інформації. Максимальна дистанція при проведенні вимірювань складає 300 м. Інформація лазерного комплексу подається у вигляді безпосередніх переміщень конструкції в заданій точці. Лазерні системи мають високу чутливість, але водночас високу вартість і обмежену кількість каналів (один або два). Для отримання максимальних лінійних переміщень під дією різного роду навантажень відбиваючий елемент розміщують посередині прогону плити.

Методи оброблення даних, що закладені в системах, мають обмеження на обсяг реєстрованої інформації (не більше 1024 і 2048 точок на канал із заданою частотою дискретизації) з урахуванням використовуваної кількості каналів. Це приводить до обмеження кількості оброблюваних параметрів і значних помилок отриманих результатів. Для реєстрації інформації про коливання, що виникли під час динамічних випробувань мостових конструкцій, широко застосовують системи і технології LabView, LabCard, різноманітні периферійні пристрої, які забезпечують збирання, первинне оброблення інформації і передавання результатів у персональний комп'ютер. Водночас для оброблення інформації застосовують стандартні математичні пакети, такі як Mathcad, Origin тощо, що мають вбудовані математичні додатки з оброблення даних, і, передусім, перетворення Фур'є (швидке перетворення Фур'є). Як пристрої первинного збору і оброблення інформації використовують, наприклад, цифрові осцилографи розробок фірми Hewlett-Packard, які дозволяють передавати цифрові дані в персональний комп'ютер. Існують і складніші системи, що ґрунтуються на сучасних супутникових технологіях. Вони призначені для постійного річного моніторингу мостових конструкцій [7], наприклад систем з використанням GPS модулів [8]. У [9] збір даних відбувається по бездротовому каналу зв'язку, що передається на відстань близько 9 кілометрів. Окреме використання GPS модулів є

можливим, оскільки вони мають високу точність та мобільність, однак такі засоби вимірювань та передачі даних коштують дуже дорого.

У роботі [10] для вимірювання статичних та динамічних прогинів під дією навантаження використані відеокамери з оптичним збільшенням за допомогою телескопу, що забезпечує високу точність, але характеристики цієї системи значно залежать від умов зовнішнього середовища (вологість, туман, температура повітря). Сучасні тенденції розвитку вимірювального обладнання для діагностики складних динамічних об'єктів спрямовані в бік розвитку ефективних неконтактних засобів вимірювань [11], [12].

## 1.2 Інформаційні технології в системах контролю мостових споруд

Згідно з [13] ІТ це технологічний процес, предметом перероблення й результатом якого є інформація. Така технологія може бути інтелектуальною і тоді до неї належать прийоми, способи та методи виконання функцій збирання, зберігання, оброблення, передавання та використання знань [14]. Отже, ІТ як і подібні технології, що використовуються в різних галузях науки і техніки, може істотно впливати на кінцевий результат діяльності або функціонування об'єкта, в якому вона застосовується, але відмінною її рисою від інших технологій є її предмет, в якості якого виступає інформація, тобто відомості про об'єкти, процеси та явища [15]. Основне призначення інформації це прийняття рішення суб'єктом або автоматизованою системою об'єкта на основі належних відомостей [16]. Звідси випливає важливість представлення інформації в математичному вигляді для її обробки в інформаційній системі, що включає систему пошуку, збирання, збереження і оброблення інформації та відповідні технічні, фінансові і людські ресурси, які забезпечують і поширюють інформацію [17]. Без користувача інформації (суб'єкт чи об'єкт) вся інформаційна продукція (інформаційні масиви, бази даних, різні документи, що зроблені на основі інформації, а також інформаційні послуги) не приносить ніякої користі.

Підтримання безпеки МС є найголовнішою задачею для інфраструктури держави. Згідно [18] в Україні більше 28400 МС. Із плином час під дією різноманітних навантажень МС втрачає міцність, його як статичні, так і динамічні характеристики змінюються, з'являються внутрішні напруження в його конструкції. Під дією таких впливів, в елементах конструкції МС з'являються дефекти, наприклад, тріщини, а матеріал (бетон, метал) внаслідок старіння змінює свої структурні властивості. Згідно з [19] близько 14% бетонних МС на дорогах України потребують негайного капітального ремонту або реконструкції, більш ніж 46% мостів не відповідають вимогам сучасних норм, як за габаритом, так і за вантажопідйомністю. В інших країнах, наприклад, в США у звіті Американського товариства інженерів-будівельників показано, що в 2013 році в США було 607380 мостів з середнім віком 42 роки. Річна вартість ремонту та технічного обслуговування мостів складає 12 мільярдів доларів США [20]. В мережі автомобільних доріг Європи існує більше 1 мільйона мостів, середній вік яких також є великим. Виникає задача вибору: підтримувати старий міст в нормальному експлуатаційному стані чи побудувати новий міст. З одного боку, це економічна задача, а з іншого, - задача безпеки. Продовження термінів експлуатації мосту нерозривно пов'язане з безпекою руху транспорту та людей по ньому. Рішення щодо подальшої експлуатації мосту приймається на основі інформації про його стан, яка здобувається ВІС [21]. Детально фундаментальні проблеми безпеки МС з урахуванням результатів вимірювань розглянуто в [22].

Одним із визначень ІТ є [23] «Інформаційна технологія – це система методів, процесів та способів використання обчислювальної техніки і систем зв'язку для створення, збору, передачі, пошуку, оброблення та поширення інформації з метою ефективної організації діяльності людей». Для різних ТО мета ІТ може відрізнятись, однак, складові ІТ завжди є однаковими для всіх ТО (рис. 1.2).

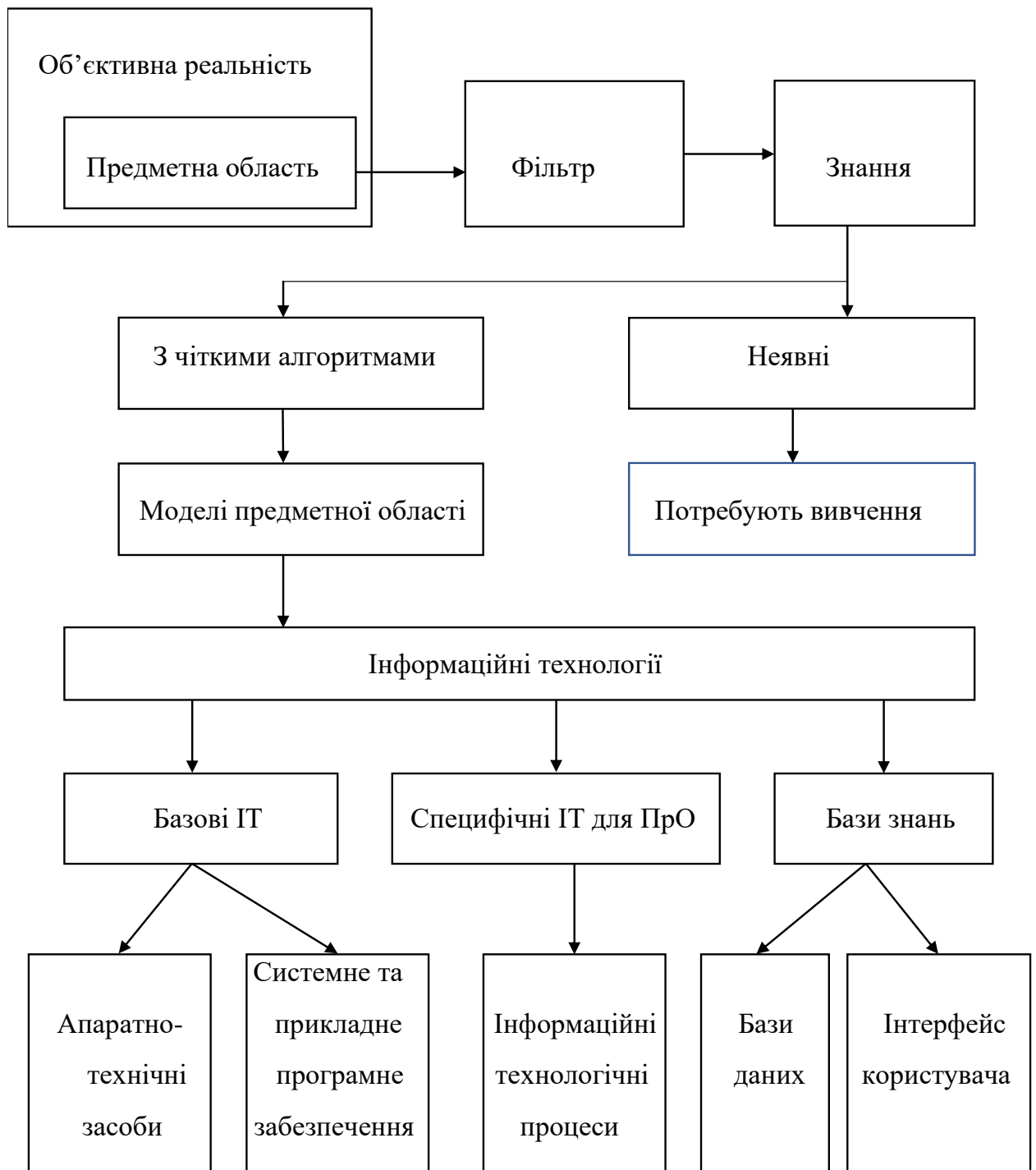


Рисунок 1.2 – Гносеологічна схема ІТ

Вони включають базові ІТ (апаратно-технічні засоби та програмне забезпечення), специфічні ІТ для кожного ТО, що розроблені для визначених технологічних процесів, а також бази знань, які включають бази даних та інтерфейс користувача. Основними для дисертаційних розроблень є специфічні для кожного ТО інформаційні технології, а також бази даних, які

грають важливу роль в будь-якій ІТ. Інтерфейс користувача також може значно відрізнятись для різних ТО.

База даних (БД) є також складовою експертної системи (ЕС) і зосереджує в собі факти, гіпотези та досвід експлуатації подібних ТО. Експертна система виконує значну роль в ІТ при прийнятті рішення про технічний стан ТО. Звичайна інформаційна система (ІС) може не мати ЕС, а інтелектуальна ІС не може обійтись без своєї ЕС. Накопичені дані про прогини МС, а також про параметри сигналів, що отримують від наземного орієнтиру для АМР, можуть використовуватись як звичайною, так і інтелектуальною ІС, особливо в складних ситуаціях.

Окрім глобальних і базових ІТ існують прикладні ІТ, що призначені для розв'язання конкретних задач, якими в дисертації є вироблення рішення щодо стану ТО. Основними функціями ІТ, що використовуються в дисертації, є:

- пошук і збирання інформації;
- аналіз інформації;
- вироблення нової інформації;
- розв'язання оптимізаційних задач.

В дисертаційному дослідженні використовуються ІТ обробки даних і технології підтримки рішення, що відрізняються від традиційних тим, що рішення про стан об'єкта приймаються в автоматизованому режимі інформаційною системою, а не оператором (людиною). Інформаційні технології ЕС та автоматизованого офісу в роботі не розглядаються.

В дисертації для реалізації цілей ІС використовуються всі інформаційні процедури:

- збір, реєстрація і передача даних;
- оброблення даних та інформації;
- збереження і передача інформації;
- використання отриманої і обробленої інформації.

Серед усіх видів забезпечення ІТ в дисертації основними є інформаційне, математичне (програмне), апаратне, технічне і тільки в

описовому вигляді розглядаються організаційне, правове, технологічне і лінгвістичне забезпечення. Питання обробки ВІ в БД розглянуті в роботі на рівні рекомендацій щодо збирання, збереження і використання інформації, а сам процес оброблення даних в БД не розглядається.

Обстеження, моніторинг та діагностика мостових конструкцій дає основний матеріал про поточний технічний стан споруди в режимі експлуатації та дозволяє прийняти рішення щодо необхідності ремонту чи реконструкції. Перші роботи з урахування динамічного впливу рухомих навантажень з'явилися у другій половині ХІХ сторіччя, це було зумовлено появою паровозів, які мали значну масу по відношенню до існуючого гужового транспорту та особливим характером впливу металічних коліс рухомого складу. На початку ХХ сторіччя з появою вантажних автомобілів та бурхливим розвитком автомобільної промисловості перед інженерами-будівельниками стали нові задачі при проектуванні транспортних споруд. Значний вплив від рухомого транспортного потоку сприймають пролітні будови мостових конструкцій, саме тому для попередження появи пошкоджень та руйнувань необхідним стає врахування динамічної дії рухомого транспортного потоку ще на стадії проектування.

На сьогоднішній день існує багато різних ІТ щодо дистанційного контролю мостових споруд. В загальному випадку кожна з них складається із комплексу апаратно-програмних засобів, які включають в себе високоточні датчики, комунікаційну апаратуру, комп'ютерне обладнання, а також програмне забезпечення для управління засобами збору, обробки даних, візуалізації параметрів, що визначаються, аналізу результатів та формування звітів та висновків.

Наприклад, в [24] описана ІТ дистанційного контролю мостових споруд, яка полягає у встановленні інтелектуальних датчиків механічних напружень, що мають вбудований електронний блок із цифровим виходом RS-485. Датчик виконаний у корпусі, захищеним від зовнішніх магнітних полів, вологи, ударів і забезпечує мінімальну інерційність. Система моніторингу зберігає

працездатність у широкому діапазоні температур від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$ . Датчики лінійних переміщень можуть розміщуватися у будь-яких контрольних точках елементів мостових споруд. Інформація з інтелектуальних датчиків потрапляє у загальний блок збору, обробки та видачі інформації, який також закріплюється на балці мосту. Живлення ІС контролю мостових споруд здійснюється від спеціального акумуляторного блоку з електронною системою підзарядки від сонячних батарей та вітрогенераторів. Для встановлення вбудованого програмного забезпечення, налагодження автоматизованих систем моніторингу, калібрування датчиків, забезпечення автоматизації та візуалізації використовується ліцензоване програмне забезпечення ESS-2012 [24]. Основна функція даної програми полягає у забезпеченні перетворення високоточних лінійних механічних переміщень в аналоговий і цифровий сигнали. Також дане програмне забезпечення дозволяє автоматизувати відбір, дублювання, передачу даних безпосередньо з контрольних точок мостових споруд. Окрім цього використовується спеціалізоване програмне забезпечення ST-2012 для калібрування датчиків. Також є підтримка об'єму даних з понад 48 контрольних точок на споруді і його подальше збереження на флеш карту у вигляді файлів, які сумісні із таблицями Microsoft Office Excel.

У [25] описана ІС безперервного дистанційного моніторингу та діагностики мостових споруд за допомогою методу активної вібродіагностики [26] – штучний додаток до конструкції споруди імпульсного або гармонічного вібраційного навантаження з метою порушення коливань споруди і подальшого аналізу контрольованих параметрів, в тому числі динамічних параметрів споруди. Метод пасивної вібродіагностики [27], [28] передбачає запис і аналіз коливань споруди, що викликані випадковими силовими і кінематичними впливами природного і техногенного характеру: руху випадкового потоку транспорту, вплив вітру, води, слабких землетрусів. Метод акустичної емісії ґрунтується на уловлюванні пружних коливань (акустичних хвиль) при виникненні і розвитку тріщини в конструкції. Методи



ультразвукового контролю використовують реєстрацію ультразвукових хвиль при їх проходженні через дефект або відбиття від дефекту. В методі місцевих руйнувань вимірюються зусилля, що необхідні для відколу, відриву або відриву зі сколюванням на тих ділянках, стан яких не впливає на несучу здатність споруди. Існують також інші методи, причому для кожного з них інформаційні технології можуть відрізнитись. В дисертації такі технології ґрунтуються на концепції дистанційного контролю МС.

1.3 Концепція дистанційного контролю мостових споруд, що реалізована в дисертації

Графічне зображення концепції дистанційного контролю МС, який аналізується в дисертації, приведено на рис. 1.3. Далі розглядаються основні складові цієї концепції.

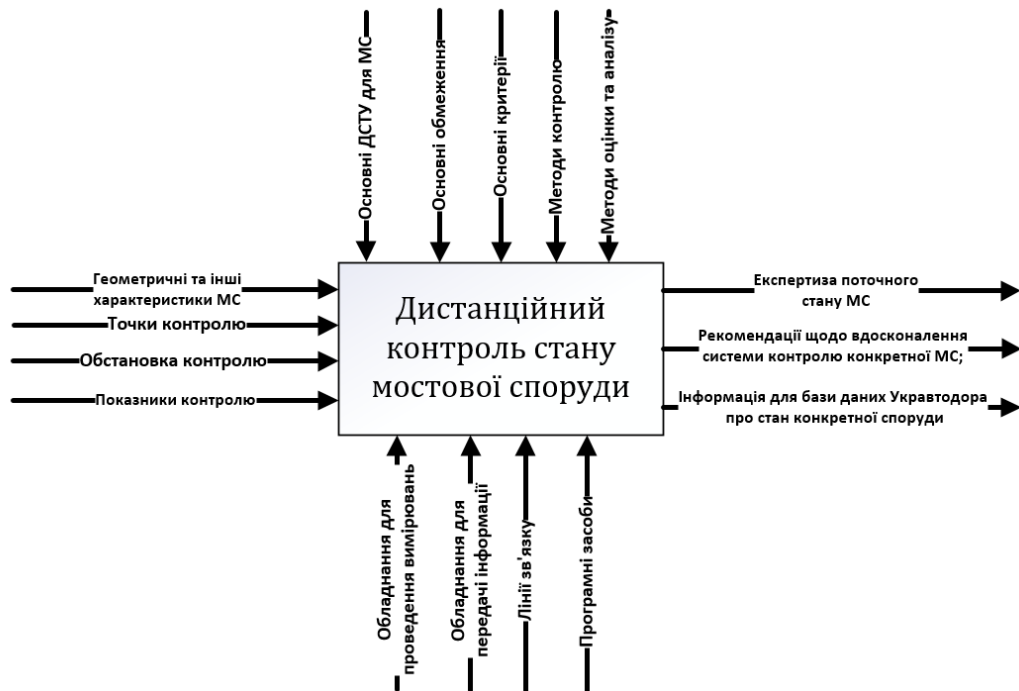


Рисунок 1.3 – Графічне зображення концепції дистанційного контролю стану МС

Контроль стану мостових споруд проводиться під час експлуатації МС. При цьому треба керуватись основними нормативними документами:

1) ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. [Чинний від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с. (Державні будівельні норми України).

2) проект ДСТУ ХХХХ:202Х Настанова з обстеження і випробування мостів та труб. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 202Х. 64 с. (Проект, перша редакція).

3) проект ДСТУ ХХХХ:202Х Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 202Х. 51 с. (Проект, перша редакція).

4) ДБН В.2.3-6:2009 Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування. [Чинний від 2009-11-11]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с. (Державні будівельні норми України).

В цих будівельних нормах розглядаються, в основному, контактні методи дослідження МС, які не відносяться до дистанційних. Сучасні методи дослідження і випробування мостів, які активно розвиваються в технологічно розвинутих країнах світу, в будівельних нормах відсутні внаслідок економічної неготовності їх впровадження на МС України. Зрозуміло, що відсутні також норми, які розроблені в дисертації.

Дистанційний контроль, що розроблений в дисертації, має обмеження щодо типу МС. Він є ефективним для залізобетонних мостів і вимагає, щоб нижня частина МС була бетонною або з іншого слабо провідного для високочастотного струму матеріалу, наприклад, дерева. Короткі МС, довжина яких менше приблизно 10 метрів, недоцільно досліджувати запропонованим методом, оскільки на такій довжині розміщується мало пасивних відбивачів електромагнітних хвиль (ЕМХ). Аналогічно, недоцільно використовувати метод для невисоких МС, наприклад, висотою нижньої балки менше 4-5 метрів, бо з'явиться проблема розміщення відповідної апаратури. Якщо МС за формою є непрямолінійною, то метод можна застосовувати на окремих ділянках мосту. Так можна поступати і при довгих МС довжиною декілька

кілометрів і більше. В цілому, умови застосування методу залежать від співвідношення висоти і довжини споруди і в кожному конкретному випадку можна оцінити його ефективність.

Обстановка, в якій проводиться контроль, повинна враховувати використання активних методів зондування поверхні МС електромагнітними хвилями і оброблення відбитих від поверхні ЕМХ біля споруди. Звідси випливають вимоги:

- наявність вільного простору під МС, що означає відповідні вимоги до геометричних характеристик МС та відсутність об'єктів, що заважають поширенню ЕМХ;

- відсутність потужних завад електромагнітного характеру, які приводять до зниження відношення сигнал-шум;

- відсутність сейсмічних коливань земної поверхні біля МС або низький їх рівень;

- відсутність істотних опадів, що впливають на поширення ЕМХ під МС.

Точками контролю згідно з приведеними будівельними нормами є середина МС, на яку в найбільшій мірі впливають імпульсні навантаження при випробуванні мосту. В дисертації точками контролю є всі точки на нижній поверхні МС, причому їх кількість визначається дослідником. З наукової точки зору кількість таких точок визначається довжиною (та шириною) мосту поділеної на відповідний радіус кореляції динамічних прогинів, який знаходиться з статистичних досліджень. Загальна кількість точок визначається перемноженням кількості точок вздовж ширини і довжини споруди.

Показником контролю є рівень коефіцієнта динамічності МС, що встановлено в ДБН В.2.3-6:2009. Він дорівнює відношенню максимального динамічного прогину середини МС до максимального статичного при імпульсному навантаженні закритого для руху автомобілів мосту. Запропонований в дисертації метод дозволяє визначити коефіцієнт динамічності в багатьох точках одночасно, причому для несправної МС цей коефіцієнт може бути максимальним не обов'язково в центрі нижньої частини

мосту. Це дозволяє забезпечити більшу достовірність контролю без протиріччя з ДБН. Однак, в дисертації запропоновано проведення досліджень динамічних прогинів навіть без перекриття автомобільного руху, що не передбачено в ДБН В.2.3-6:2009 і ніде не проводиться. Це перспективний метод і концепція його застосування приведена в підрозділі 4.1.

Метод контролю стану МС, що розроблено в дисертації, є дистанційним, але на відміну від відомих іноземних методів він не потребує використання високовартісних вимірювальних технологій, висока точність вимірювання прогинів в яких не потрібна для старих зношених мостів. Метод передбачає встановлення під нижньою частиною мостів металевих пластин в місцях, які обґрунтовані в роботі, і зондування їх ЕМХ заданого діапазону. Аналіз інтерференції відбитих хвиль дозволяє визначити прогини МС в кожній точці контролю.

Основним критерієм для прийняття рішення щодо стану МС є перевищення динамічними прогинами порогових значень прогинів мосту в точках контролю. Рішення приймається за статистичними висновками. Як наслідок, визначається ймовірність прийняття правильного рішення щодо стану МС.

Методи оцінки та аналізу, що використовуються в дисертації, є новими порівняно з відомими і пов'язані з особливостями статистичного аналізу нестационарних прогинів (в часі) та неоднорідних прогинів (по простору). Нестационарність прогинів спостерігається в багатьох випадках і являє велику проблему для аналізу. В дисертації запропоновано перехід від аналізу всього сигналу до аналізу мод Гільберта-Хуанга, які є результатом розкладання реалізацій нестационарного прогину на ортогональні моди в адаптивному базисі. Ці моди в більшості випадків є стаціонарними, що істотно спрощує аналіз.

Обладнання для проведення вимірювань прогинів МС, що рекомендоване в дисертації, є новим за принципом побудови і на нього отримані відповідні патенти [29,30,31]. Елементи цього обладнання можуть

бути уніфіковані, тобто на відповідних мостах можуть бути встановлені однакові металеві пластини, а для створення і оброблення сигналів ЕМХ в Україні можуть бути створені десятки однакових мобільних ВІС, вартість яких є сумірною з вартістю автомобіля. Ці системи можуть обслуговувати вибрані для цього українські мости. Обладнання для передачі інформації про прогини та стан МС і лінії зв'язку в дисертації не досліджувались і проблем вибору такого обладнання не існує. Тут необхідно врахувати, що ніяких особливих вимог до швидкості і обсягу передачі та прийому інформації не висувається, тобто може використовуватись відповідне стандартне обладнання.

У дисертаційному дослідженні були використані наступні програмні засоби: Microsoft Excel, MATLAB, Mathcad, Origin та ін. У перспективі при моделюванні різноманітних навантажень на МС можна використовувати такі пакети, як COMSOL та ANSYS, які дозволяють наочно побачити саму модель МС, а також визначити усі вектори сили, що діють на визначену точку на ньому у визначений період часу.

Експертиза поточного стану МС повинна проводитись на основі прийнятого автоматизованого рішення про стан МС, що приймається розробленою в дисертації ВІС, відомостей про стан мосту за попередні періоди експлуатації, відомостей про якісь події, що впливають на технічний стан МС, та інших факторів, які стосуються конкретного мосту. Безумовно, в експертній системі враховуються попередні експертні висновки щодо стану аналогічних МС. Досвід, який отримують при обробленні результатів вимірювань динамічних прогинів, повинен бути використаний для розроблення рекомендацій щодо вдосконалення системи контролю конкретної МС. Інформація про технічний стан конкретної МС повинна надсилатись до бази даних Укравтодора.

1.4 Основні недоліки наявних інформаційних технологій дистанційного контролю мостових споруд

Для отримання діагностичної інформації на мостових спорудах до цього часу в Україні широко використовуються контактні методи вимірювання або, навіть, просто технічний огляд. Як правило, перед проведенням вимірювань дорогу на міст перекривають, а на нього заїжджає вантажний автомобіль з стандартизованою вагою. Вимірювання прогину МС проводиться в одній точці. Звісно, що ІТ є дуже простою в науковому сенсі. Запропоновані в дисертації дистанційні методи вимірювання головних діагностичних параметрів МС дозволяють виміряти прогини в багатьох точках мосту одночасно і є універсальними для більшості бетонних споруд. Мости перед вимірюванням перекривати не потрібно. Результати вимірювань в цифровому вигляді утворюють базу даних прогинів МС під дією різноманітних навантажень, яка є основою для розроблення інтелектуальних вимірювальних інформаційних та діагностичних систем. Елементи подібних систем вже створені в деяких технологічно розвинутих країнах світу. Дистанційне вимірювання прогинів МС одночасно в багатьох точках приводить до істотного розширення обсягу ВІ, що ускладнює прийняття правильних рішень щодо безпеки функціонування МС. На відміну від наявних мостових технологій, в яких вимірювання прогину МС відбувається під дією стандартного навантаження статичного і динамічного типу, в дисертації запропоновано використання в якості навантаження сукупності рухомих транспортних засобів, що перебувають на МС. Такі засоби є причиною випадкових прогинів на нижній частині мосту, які в багатьох випадках являють собою нестационарний випадковий процес, а це приводить до того, що точність інформації змінюється з часом, а разом з нею може змінюватись правильність прийнятих рішень. Ця проблема не завжди є критичною для МС, оскільки рішення, що приймаються, не потребують високої оперативності. Крім того, можливе прийняття безпекових рішень на основі вимірювань прогинів стаціонарного процесу, який при окремих обставинах може проявлятися на МС. В дисертації розроблені моделі і методи дистанційного

збирання інформації про нестационарні прогини МС, на основі яких приймаються рішення щодо стану мосту. Стационарні процеси є окремим випадком, в якому умови для прийняття рішення спрощуються. Методи збирання та оброблення інформації для smart-мостів в дисертаційній роботі не розглядаються.

Розробка нових методів отримання вимірювальної інформації істотно розширила об'єм баз даних, який з урахуванням дискретизації значень вимірюваних параметрів ще зростає на порядки. Отримані дані потребують періодичного оновлення з урахуванням багатьох важливих факторів, що потребує розробки новітніх методів зберігання інформації в БД та її використання в інформаційних технологіях.

Отже, основними недоліками наявних ІТ контролю технічних об'єктів, що аналізуються в дисертації, є:

- а) обмежена область охоплення інформаційними технологіями таких об'єктів, наприклад, проведення вимірювань тільки в одній точці МС;
- б) незначна кількість ІТ на МС, в яких приймається автоматизоване рішення щодо стану технічного об'єкту без участі людини;
- в) змінювання точності інформації в умовах отримання нестационарних випадкових процесів, реалізації яких описують параметри МС, що є важливими для прийняття рішення;
- г) відсутні методи оптимізації динамічних баз даних для технічних об'єктів, що аналізуються в роботі.

### 1.5 Вибір мети та задач дослідження

Мета і задачі дослідження безпосередньо впливають з недоліків наявних ІТ при контролі МС. Впровадження сучасних ІТ в інтересах контролю стану МС в Україні на даний час не має сенсу внаслідок простоти методів контролю і отриманням при цьому невеликої кількості інформації. Збільшення кількості точок контролю на МС безумовно посилить актуальність ІТ, але головним тут є підвищення якості прийняття автоматизованого рішення про

стан МС, що зв'язано з безпекою експлуатації мостів та використанням при цьому мінімально необхідної цінної інформації. В реальній ситуації треба враховувати необхідність оброблення нестационарних випадкових процесів прогинів МС, а існуючі методи оброблення подібної інформації є складними і громіздкими та ще й залежать від професійної підготовки людини, що відповідальна за проведення контролю. Звідси випливає завдання спрощення методів оброблення інформації про нестационарні процеси без зниження якості прийняття рішення про технічний стан МС та розроблення методу оцінки сталості інформації для зазначених процесів. Оптимізація динамічних баз даних є також важливим завданням в перспективних інтелектуальних мостових спорудах, а на сучасному етапі розвитку вона не є обов'язковою, оскільки в практиці експлуатації МС до високої швидкості оброблення інформації та прийняття рішення не висувається жорсткі вимоги. В четвертому розділі дисертації розглядаються можливості застосування розробленої в перших трьох розділах ІТ для іншого технічного об'єкта, де висока швидкість отримання цінної інформації для прийняття рішення є необхідною.

Отже, метою дослідження є підвищення якості прийняття автоматизованого рішення щодо стану мостових споруд на основі розроблених моделей, методів та ІТ дистанційного контролю технічних об'єктів з нестационарними вихідними сигналами.

Звідси випливають основні **завдання** дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан інформаційних технологій, що використовуються на мостових спорудах в інтересах прийняття безпекових рішень.
2. Створити математичні моделі процесів, що супроводжують дистанційний контроль мостових споруд.
3. Розробити метод дистанційного збирання вимірювальної інформації від мостових споруд.



4. Удосконалити модель та метод оцінювання сталості інформації в умовах нестаціонарності прогинів мостових споруд.

5. Удосконалити модель та метод визначення цінності інформації, що отримується при дистанційному вимірюванні прогинів мостових споруд.

6. Розвинути інформаційну технологію для автоматизованого прийняття рішень про стан мостових споруд з урахуванням нестаціонарних випадкових процесів їх прогинів.

7. Перевірити ефективність розроблених моделей, методів та інформаційну технологію для технічного об'єкту, для якого потрібний малий час прийняття рішення щодо його стану.

### Висновки по розділу 1

1. Збільшення кількості інформації, на основі якої приймаються рішення щодо стану технічних об'єктів, обумовлене зростанням кількості контактних і неконтактних датчиків на об'єктах, а також впровадженням «smart-технологій» на мостових спорудах в багатьох технологічно розвинутих країнах світу.

2. Оцінювання стану багатьох технічних об'єктів спрощується при наявності ефективних ІТ, що розроблені для такої задачі. Узагальненим параметром, величина якого при стандартному навантаженні визначає стан МС, є коефіцієнт динамічності, що зв'язаний з прогином. Основною проблемою при розв'язанні задач прийняття рішення щодо стану МС є нестаціонарність процесів прогинів, які отримують при дистанційному вимірюванні.

3. В розділі представлена концепція дистанційного контролю мостових споруд, яка враховує сукупність основних факторів, що впливають на якість прийнятих рішень про стан мостів, і описує в узагальненому вигляді методи, моделі та інформаційну технологію, які використовуються в дисертації.

4. Основні недоліки сучасних ІТ на мостових спорудах в Україні викликані неповним охопленням інформації про стан споруд, що обумовлено вимірюванням прогинів в одній точці, прийняттям неавтоматизованих рішень, що в значній мірі залежить від досвіду фахівця, а також неврахуванням або неповним врахуванням нестаціонарності контрольованих процесів.

5. Зазначені недоліки ІТ обумовлюють мету дослідження, яка складається в підвищенні якості прийняття автоматизованого рішення щодо стану мостових споруд на основі розроблених моделей, методів та ІТ дистанційного контролю технічних об'єктів з нестаціонарними вихідними сигналами.

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ МОСТОВИХ СПОРУД

### 2.1 Структурна модель інформаційної технології дистанційного контролю стану мостових споруд

Цю структурну модель розглянемо в декількох підрозділах. Як видно з рис. 2.1, вона включає декілька блоків:

- виявлення джерел інформації;
- вибір мети та її декомпозиція на підцілі;
- вибір та обґрунтування методів і моделей збирання інформації;
- вибір та обґрунтування методів і моделей прийняття рішення;
- вибір та обґрунтування моделей контролю;
- створення інформаційно-довідкового забезпечення;
- оцінка результатів.

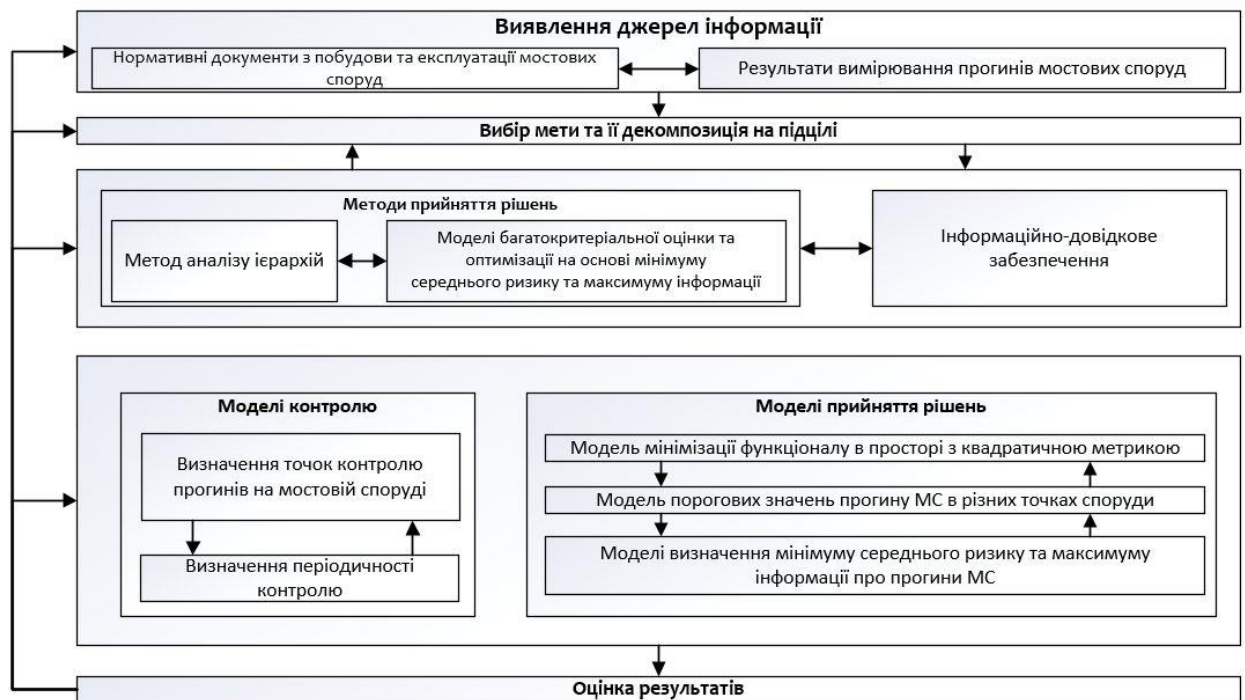


Рисунок 2.1 – Структурна модель ІТ дистанційного контролю стану мостових споруд

Для якісної реалізації ІТ потрібно мати надійні джерела інформації. В динаміці МС така інформація закодована і зосереджена у сигналах, що описують прогини. В дисертаційній роботі проводиться аналіз прогинів, що отримуються при їх дистанційному вимірюванні. Оскільки контроль стану МС проводиться періодично, то з часом накопичується великий обсяг результатів вимірювання по конкретній споруді. Вони складають основу бази даних цієї МС і використовуються в якості апріорних даних для розроблених методів як частина інформаційно-довідкового забезпечення. Сюди ж можуть бути внесені результати вимірювань прогинів більш поширеними контактними методами. Крім того, до бази даних можуть бути внесені результати вимірювання прогинів аналогічних МС. Джерелом інформації повинні бути також нормативні документи, що розроблені в Україні профільними організаціями і приведені в підрозділі 1.3. Комплексне оброблення інформації від зазначених джерел виходить за межі дисертаційного дослідження.

Вибір мети дослідження проведено в підрозділі 1.5, а підцілі, що зображені на рис. 2.1, є в сутності задачами дослідження. В дисертації в окремих випадках здійснюється їх розбиття на окремі (часткові) задачі. Все це дозволяє досягти основної мети роботи. Розглянемо теоретичні засади, на яких ґрунтуються методи і моделі, що розроблені в дисертації.

## 2.2 Модель та метод дистанційного контролю мостових споруд

В дисертації модель дистанційного контролю створена з використанням результатів вимірювання прогинів у вибраних точках нижньої поверхні МС. На початковому етапі вимірювань кількість контрольних точок повинна бути великою, однак при цьому передається також великий обсяг інформації, хоча зі збільшенням кількості інформації якість прийняття рішення про стан МС не завжди збільшується. Звідси випливає необхідність зменшення цієї кількості. Це приводить до потреби врахування статистичних зв'язків між прогинами в

різних точках МС, які оцінюються радіусами кореляції флуктуацій цих прогинів. Структурна схема моделі контролю приведена на рис. 2.2.

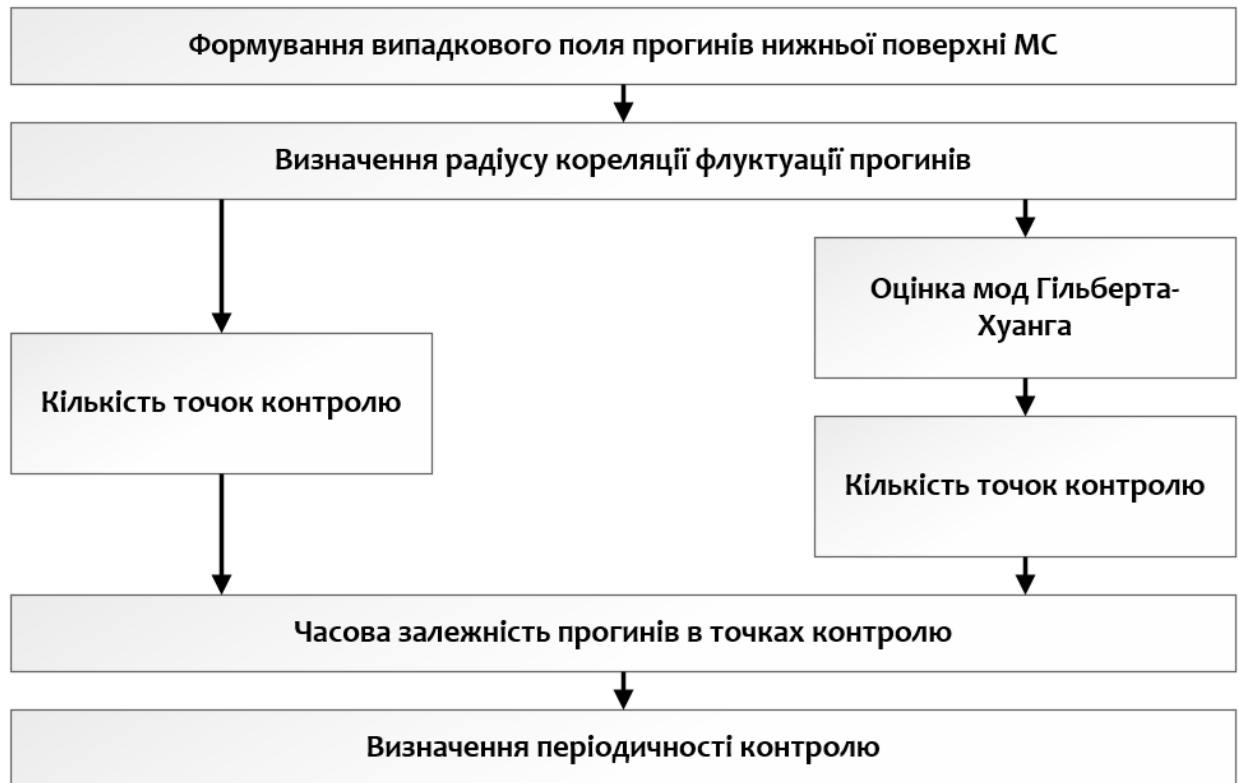


Рисунок 2.2 – Структура моделі контролю мостових споруд

Формування випадкового поля прогинів здійснюється на основі попередньо встановленої дискретної решітки пасивних відбивачів у вигляді металевих пластин резонансних розмірів по відношенню до довжини ЕМХ. Такий підхід реалізується на основі розробленого в дисертації методу збирання інформації про прогини МС. Фізична сутність методу є такою. Решітку відбивачів треба опромінити ЕМХ, що генерується, наприклад, міні радаром. Відбиті хвилі (сигнали) від багатьох пластин створюють інтерференційне поле в усій області простору під нижньою поверхнею МС. Необхідно виміряти амплітуду і фазу цього поля на зручній відстані від МС з допомогою простих приймачів, наприклад, з використанням приймальної решітки. Якщо встановлені пластини почнуть переміщуватись у вертикальній площині разом з плитою МС під час її прогинів, то амплітуди і фази цього поля

почнуть змінюватись і, як наслідок, стають функціями прогинів споруди. Якщо яким-небудь способом компенсувати змінені амплітуди і фази до стану, в якому вони були до прогину МС, то різниця між значеннями цих амплітуд до і після прогину є багатомірною функцією невідомих поки що прогинів МС в різних точках. Ця функція є основою для складання функціоналу, що являє собою відстань в функціональному просторі між двома станами зазначеного амплітудно-фазового розподілу у випадковому полі. Детально функціонал описано в третьому розділі. В ідеалі значення функціоналу після оптимізації повинно дорівнювати нулю, однак на практиці внаслідок неточності вимірювання, наявності шумів та інших факторів нульового значення досягнути не вдається і тому в дисертації запропонована мінімізація функціоналу методом глобального випадкового пошуку з наступним визначенням прогинів в кожній контрольній точці. При цьому можуть виникнути хибні рішення, для виключення яких використовуються апріорні значення прогинів в точках, які отримані раніше при вимірюваннях, причому проведених будь-яким способом, в тому числі і контактним з допомогою датчиків переміщень. Кількість пластин, з одного боку, повинна бути великою для створення високоенергетичного інтерференційного поля, яке дозволяє забезпечити підвищити точність визначення прогинів МС. З іншого боку, зі збільшенням цієї кількості підвищується ймовірність виникнення хибних екстремумів, що зменшує зазначену точність. Структурна схема методу приведена на рис. 2.3.

Формування випадкового поля прогинів означає створення вибірки просторових залежностей реалізацій прогинів, яка після статистичної обробки дозволяє визначити радіус кореляції флуктуацій прогинів  $\rho$ . Тоді при  $\rho \geq \rho_{кр}$ , де  $\rho_{кр}$  – критичне значення радіусу кореляції, мінімальна кількість точок контролю складає  $n_k = \frac{L}{\rho}$ , де  $L$  – лінійний розмір решітки пасивних випромінювачів.

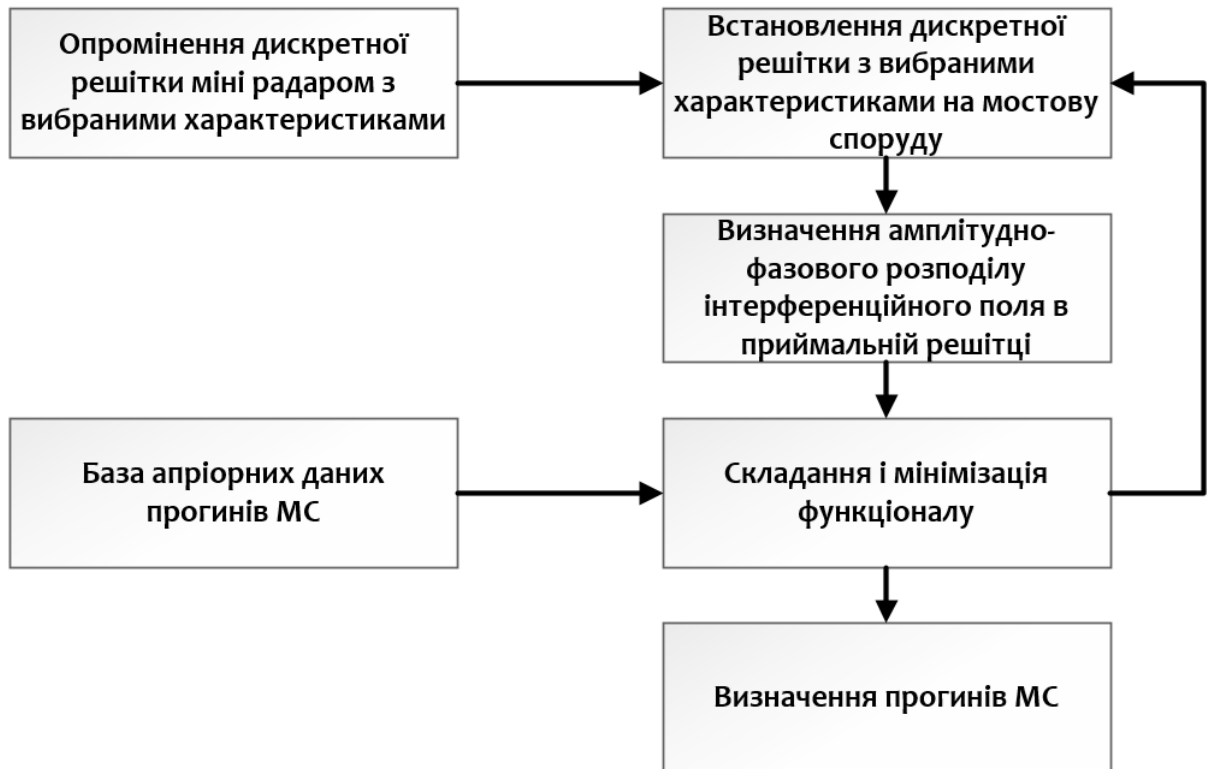


Рисунок 2.3 – Структурна схема методу збирання інформації про прогини МС

Критичне значення  $\rho_{кр}$  вибирається перед дослідженням, виходячи з практичних потреб. Якщо, наприклад,  $\rho \approx L$  (випадок високої кореляції прогинів по простору), то маємо всього одну контрольну точку, тобто так як передбачено в ДБН. У цьому випадку немає сенсу використовувати запропонований метод, зокрема, для коротких мостів. В дисертації розглядається випадок нестационарних і неоднорідних процесів, для яких радіус кореляції може бути значно меншим довжини решітки. У цьому випадку кількість контрольних точок  $n_k$  зростає. Можна було б в якості точок контролю вибрати всі точки, в яких розміщені пластини, але тоді буде відбуватись оброблення надлишкової інформації, яка для прийняття рішення не потрібна. Для зменшення кількості точок контролю при малих радіусах кореляції флуктуацій прогинів МС може проводитись розкладання реалізацій випадкового процесу прогинів в адаптивному базисі і отримання мод Гільберта-Хуанга, які, як показано в третьому розділі, є, як правило,

стаціонарними (однорідними) з більшим радіусом кореляції. Після отримання статистичної вибірки прогинів в точках контролю здійснюється порівняння середніх значень цих прогинів з тими, що отримані в попередні моменти часу. Це забезпечує основу для прогнозування прогинів на майбутні періоди часу, тобто визначення періодичності контролю. Загальних математичних виразів для описаних залежностей не можна представити, оскільки вони є різними для різних типів мостів і різних умов експлуатації.

### 2.3 Сутність моделі прийняття рішення про стан мостових споруд

Згідно з ДБН [19] для оцінки технічного стану МС необхідно використовувати коефіцієнт динамічності як відношення динамічного прогину мосту до статичного при дії стандартного навантаження у вигляді вантажного автомобіля з наперед відомою масою. Такий підхід є справедливим і у випадку використання запропонованого в дисертації методу, але, на відміну від загальноприйнятого критерію, прогин вимірюється в багатьох точках нижньої частини МС. Якщо скористатись традиційним підходом, то потрібно проводити вимірювання статичного і динамічного прогинів в кожній точці контролю і тоді запропонований метод є непривабливим для практики. У зв'язку з цим пропонується здійснювати навантаження в центрі мосту, а вимірювання динамічних прогинів проводити у визначених точках контролю. Прийняття рішення про несправність МС приймається в статистичному змісті при перевищенні коефіцієнтом динамічності (динамічним прогином) наперед установленого (порогового) значення. Нехай для прогину центральної точки мосту це значення дорівнює  $y_0$ . Тоді порогове значення в найпростішій інтерпретації в  $k$ -тій точці контролю відносно центру мосту (де  $k = 0$ ) становить  $y_{0k} = \left(\frac{L_0}{2} - k \cdot \Delta l\right) \frac{2y_0}{L_0}$ , де  $L_0$  – довжина МС, а  $\Delta l$  – відстань між точками контролю, причому  $2k\Delta l \leq L_0$ . Порогове значення  $y_0$  визначається в процесі проведених досліджень.



Необхідно знайти закони розподілу прогинів при відсутності стрибків  $\Delta u$  прогинів та при їх наявності і тоді можна оцінити ймовірність несправного стану МС. Закони розподілу прогинів знайти нереально шляхом проведення традиційних випробувань мостів з стандартним навантаженням в одній точці. Однак, якщо запропоновані в дисертаційній роботі дослідження проводити з відкритим для проїзду транспорту мостом, то необхідна статистика набирається відносно просто, хоча це потребує додаткових теоретичних та експериментальних робіт для інтерпретації результатів.

Описана модель є справедливою для однорідних полів та стаціонарних процесів. Якщо випадкове поле прогинів є неоднорідне, а випадковий процес – нестаціонарний, отримання законів розподілу прогинів стає проблемним питанням. В дисертації запропоновано проводити статистичний аналіз не з реалізаціями прогинів неоднорідного поля або нестаціонарного процесу, а з розкладаннями цих реалізацій прогинів в адаптивному ортогональному базисі Гільберта-Хуанга (Г-Х), що приводить до необхідності переходу від одноканального до багатоканального аналізу, де кожний канал містить одну моду Гільберта-Хуанга, кількість яких в проведених дослідженнях не перевищувало 10. Як показали проведені в дисертації дослідження, в більшості випадків ці моди є однорідними та стаціонарними. Далі за необхідною вибіркою отримують закони розподілу складової прогину (моди) в кожному каналі і визначають ймовірність несправності мосту при перевищенні порогу для конкретної моди. Вибір цього порогу здійснюють при цілеспрямованому попередньому дослідженні конкретної МС. Перехід до багатоканальної обробки приводить до збільшення кількості інформації, яку необхідно аналізувати. Це є платою за перехід від оброблення нестаціонарних процесів та неоднорідних полів до оброблення стаціонарних процесів і однорідних полів. Структура моделі прийняття рішення про стан МС приведена на рис. 2.4.

Рішення про технічний стан споруди приймається на основі поширеного в математичній статистиці методу мінімуму середнього ризику, приклад

застосування якого приведено в підрозділі 3.6. Однак цей метод зовсім не враховує цінності інформації і тому переробляється багато надлишкової інформації. В дисертації прийнято компромісний метод рішення.

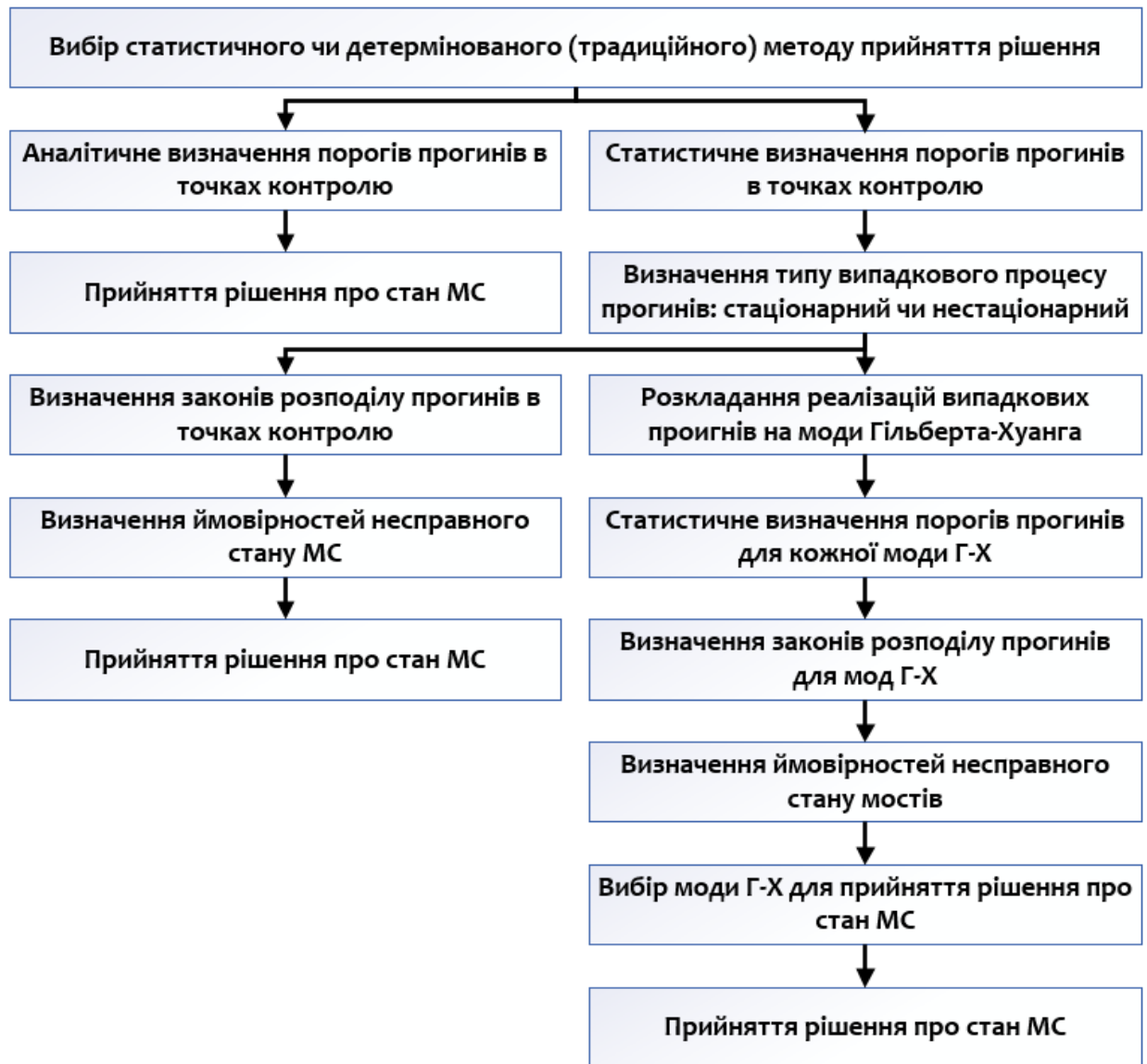


Рисунок 2.4 – Структура моделі прийняття рішення про стан МС

2.4 Прийняття рішення про стан мостової споруди на основі методу аналізу ієрархій

Прийняття рішення вимагає додержання специфічної термінології. В дисертації воно означає вибір одного з двох варіантів вирішення проблеми: за безпековим та інформаційним критеріями

Згідно з методом аналізу ієрархій (МАІ) вибирається основна мета – прийняття ефективного рішення про технічний стан МС. В дисертації рішення приймається за двома критеріями: за критерієм мінімуму середнього ризику та критерієм максимуму цінності інформації. Це типова задача подолання невизначеності цілей. Існують різні способи розв’язання цієї задачі і в дисертації прийнято спосіб зведення багатокритеріальної (двохкритеріальної) задачі до однокритеріальної – метод лінійної згортки, згідно з яким максимізується показник

$$F(y_0) = \sum_{i=1}^2 c_i \cdot f_i(y_0), \quad (2.1)$$

де  $f_1(y_0) = 1 - R(y_0)$  – нормований показник для методу мінімуму середнього ризику, де  $R(y_0)$  – нормоване мінімальне значення середнього ризику, а  $f_2(y_0) = V(y_0)$  – нормоване значення цінності інформації. Розрахунок максимального значення  $F(y_0)$  здійснюється в третьому розділі після попереднього отримання залежностей  $f_i(y_0)$ . Після визначення максимуму  $F_i(y_0)$  знаходиться порогове значення  $y_0$ .

Важливим етапом МАІ є визначення вагових коефіцієнтів  $c_i$  в формулі (2.1). В даній задачі всього два критерія – безпековий і інформаційний. Введемо для прикладу наступну шкалу:

1 – критерії рівнозначні; 3 – безпековий критерій має більшу значимість, ніж інформаційний; 5 – безпековий критерій має істотно більшу значимість, ніж інформаційний; 7 – безпековий критерій має набагато більшу значимість, ніж інформаційний; 9 – безпековий критерій має абсолютно більшу значимість, ніж інформаційний. Якщо, наприклад, безпековий критерій має пріоритет 5 над інформаційним критерієм, то останній критерій порівняно з першим має пріоритет 0,2, тобто  $\frac{1}{5}$ . При розв’язанні задачі припускається, що функції  $f_i(y_0)$  ( $i = 1, 2$ ) є некорельованими, хоча реально кореляція в окремих

випадках все ж може бути, оскільки збільшення кількості інформації впливає на рівень безпеки.

З практичної точки зору, спочатку треба оцінити співвідношення критеріїв. Для ситуації, що існує тепер в Україні, безумовний пріоритет має безпековий критерій. По мірі розвитку та впровадження ІТ пріоритет інформаційного критерію буде зростати, а пріоритет безпекового критерію знижуватись. Рівнозначність критеріїв ( $c_i = 0,5$ ) може бути досягнуто для нових МС з впровадженням smart – технологій, коли здійснюється оброблення інформації про навколишню обстановку, що впливає на функціонування МС.

## Висновки по до розділу 2

1. Структурна модель ІТ дистанційного контролю мостових споруд включає виявлення джерел інформації, вибір мети та декомпозиція її на підцілі, вибір та обґрунтування методів, моделей збирання інформації, прийняття рішення і моделей контролю, створення інформаційно-довідкового забезпечення і оцінка результатів.

2. Структура моделі дистанційного контролю мостових споруд включає формування випадкового поля прогинів нижньої поверхні МС, визначення радіусу кореляції флуктуацій випадкових прогинів, розв'язання точок контролю при стаціонарних та нестаціонарних процесів прогинів, отримання статистики часових залежностей прогинів і оцінка періодичності контролю.

3. Структурна схема методу збирання інформації про прогини поверхні МС полягає у попередньому встановленні дискретної решітки з резонансними пасивними випромінювачами, їх опромінення ЕМХ у встановленого діапазону, визначення амплітудно-фазового розподілу в найпростішій системі приймальних елементів, складання і мінімізацію функціоналу, розв'язання багатомірної оптимізаційної задачі і отримання шуканих прогинів з прийнятною точністю.

4. Структура моделі прийняття рішення про стан МС включає як детермінований, так і статистичний метод визначення прогинів і їх порогових значень, а в останньому випадку використання різних моделей при стаціонарному та нестаціонарному випадкових процесах прогинів.

5. Для прийняття рішення про стан МС доцільно використовувати МАІ з урахуванням як безпекових, так і інформаційних показників, що визначаються відповідно до вимог методу мінімуму ризику та цінності інформації.

## РОЗДІЛ 3 МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ МОСТОВИХ СПОРУД

### 3.1 Обґрунтування інформаційної інфраструктури для системи контролю мостових споруд

Системи управління великими МС створені у різних країнах світу, які вирішують як завдання моніторингу мостів в інтересах безпеки, так і завдання логістики. Основою сучасних систем управління є ІТ, які використовують бази даних та результати вимірювань. Навіть окремі великі МС мають розгалужену мережу контактних датчиків, що постачають у ВІС мосту інформацію про значення різних параметрів, які описують стан МС. Головним недоліком контактних методів вимірювання є їх висока вартість та тривалість виконання робіт.

На сьогоднішній день методи дистанційного вимірювання параметрів МС впроваджуються у розвинутих країнах світу (США, Китай, Японія та ін.). Робота йде у різних напрямках. По-перше, в напрямку використання радарних малогабаритних систем [22] міліметрового та оптичного діапазонів ЕМХ для оцінки деформацій та прогинів елементів МС. Для цього використовуються, зокрема, фазові інтерферометри з великою розрізнявальною здатністю по дальності. Зазначені системи вимірюють динамічні характеристики мостових споруд в локальних точках. По-друге, в напрямку застосування оптико-механічних систем технічного зору [32], [33] з наступною обробкою зображень за розробленими алгоритмами, що дозволяє здійснювати аналіз динаміки конструкцій МС в розподілених областях. Ці методи не визначають важливий для практики коефіцієнт динамічності споруд. По-третє, в напрямку застосування алгоритмів обробки GPS-даних з фільтрацією Р. Калмана для отримання оцінок коефіцієнту динамічності МС [34]. Активно розвиваються технології обслуговування мостів з урахуванням безпеки [35]. Авторами [36] розроблені методи дистанційного оцінювання коефіцієнта динамічності МС,

який є узагальненим параметром, що характеризує стан споруди. Оцінка коефіцієнту динамічності передбачає вимірювання прогину МС.

Виявляється, що динамічні прогини мостових споруд містять багато діагностичної інформації про стан МС. Виникає необхідність у виявленні закономірностей між характером поведінки прогинів у просторі та часі і станом конкретної МС. Якщо в мостовій конструкції є, наприклад, тріщини або розрив арматури в бетоні, то характер коливань елементів конструкції зміниться, але загальної рекомендації для всіх мостів у більшості випадків буде дати важко. Звідси, виникає необхідність побудови бази даних характерних параметрів коливань МС і відслідковування цієї бази в процесі експлуатації, що дасть в перспективі проводити цілеспрямовану діагностику мостів.

За останні роки в світі розроблені технології нового покоління, зокрема інтелектуальні мостові споруди [37]. Це нові технології будівництва та обслуговування мостів з використанням інтелектуальних ІТ, таких як хмарні технології [38], Інтернет речей, віртуальні технології. Огляд новітніх технологій приведено в [39].

Традиційні контактні та неконтактні (дистанційні) методи дозволяють визначити локальний коефіцієнт динамічності МС в точці мосту, яка визначена нормативними документами. При такому підході дефекти МС, що знаходяться у віддалених місцях від цієї точки, часто не впливають на зазначений КД, який може відповідати вимогам, хоча технічний стан МС вже є незадовільним з точки зору вимог безпеки. Отже, виникає необхідність вимірювання КД на всій поверхні споруди, тобто визначення глобального КД, хоча такого поняття не існує. Автор брав участь в розробці методів дистанційного визначення прогинів МС, що змінюються з часом, тобто динамічних прогинів [40]. Ці методи передбачають встановлення на нижній поверхні МС пасивних металевих відбивачів (пластин) і аналізу розподілу напруженості електромагнітного поля на будь-якій зручній для оператора відстані від зазначеної поверхні. Таким чином, цей метод дає можливість

оцінити динамічні прогини МС в місцях розміщення пасивних випромінювачів, що істотно покращує можливості для проведення діагностики стану всієї поверхні МС. Його доцільно застосовувати для наявних мостів, що не обладнані сучасними ВІС. В мостах, що проектуються або будуються, безпосередньо на їхню поверхню можуть встановлюватись відповідні новітні датчики, що обладнані елементами ІТ. В останні роки програми моделювання мостової інтегрованої інформації виконуються на спільній платформі [41]. Отже, ВІС, які обслуговують визначену МС, отримують велику кількість даних, які потрібно обробляти в реальному масштабі часу. Це викликає необхідність створення ефективних алгоритмів обробки даних з використанням технології «data mining». Похибки вимірювання та деякі інші причини знижують достовірність даних і тоді необхідно на основі таких даних прийняти важливі для безпеки рішення. Звідси, з'являється доцільність використання меншої кількості даних, які мають найбільшу цінність з точки зору теорії інформації.

Інформаційна структура для оцінки технічного стану МС не може бути зображена без прив'язки до існуючих систем. В Україні технічний стан мостових споруд оцінюється традиційними методами: технічним оглядом з застосуванням локального руйнівного контролю та неруйнівним методом шляхом вимірювання коефіцієнта динамічності в одній точці (на малій локальній площі). Як результат, інформаційні технології є примітивними, оскільки сучасні інформаційні технології для таких методів не потрібні. Дослідження, що проведені в дисертації, рекомендують проведення одночасних дистанційних вимірювань по всій площі нижньої частини мосту, внаслідок чого обсяг інформації про нестационарні прогини МС істотно зростає і змінюється з часом. Це накладає специфічні вимоги щодо збирання такої інформації та її збереження і використання в динамічних базах даних. В сучасних мостових спорудах технологічно розвинутих країн використовуються вмонтовані в структуру мосту прості та інтелектуальні датчики і мобільні дистанційні ВС, які разом з датчиками, встановленими на



автомобілях, створюють дуже великий обсяг інформації, аналіз якої без сучасних ІТ неможливий. Такі технології разом з інформаційними системами є коштовними. В дисертації запропоновані відносно дешеві методи збирання та використання інформації про прогини МС в інтересах їх безпеки, які можуть широко застосовуватись на українських мостах.

У загальному випадку інформаційна структура оцінки стану МС зображена на рис. 3.1.

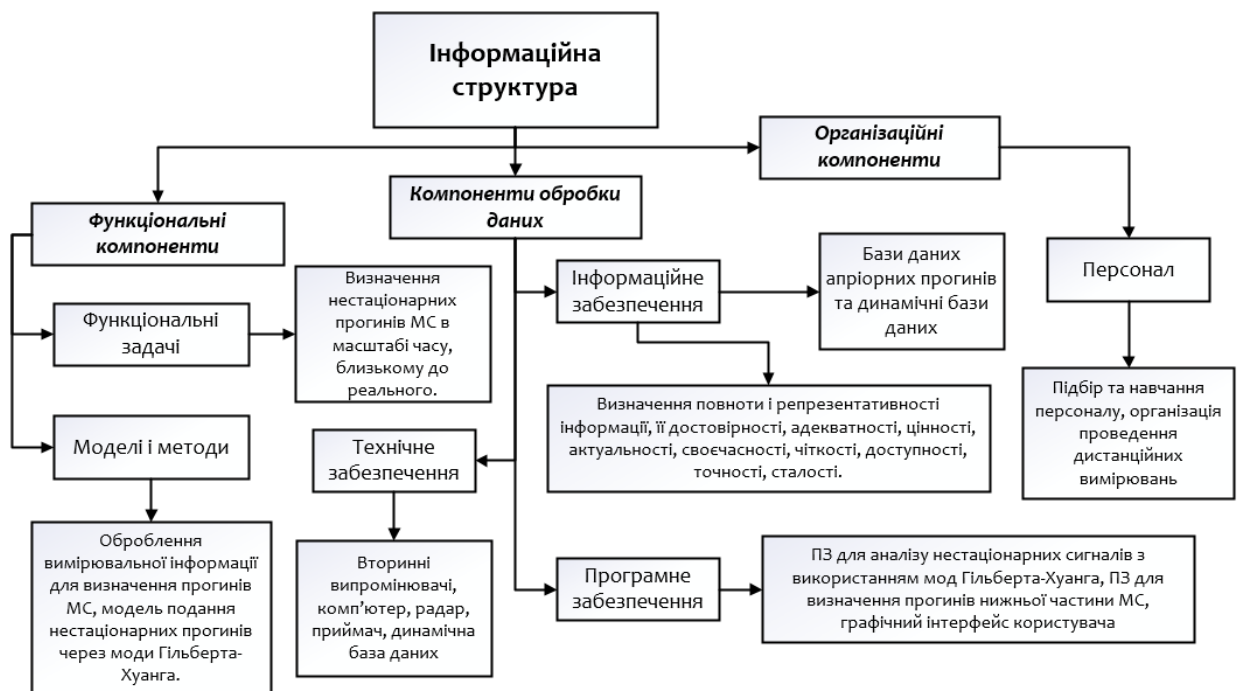


Рисунок 3.1 – Інформаційна структура для оцінки стану МС

В наступних підрозділах елементи цієї схеми розглядаються більш детально.

### 3.2 Загальна модель калібрування віртуальної системи для дистанційного вимірювання прогинів в одній точці мостової споруди

Аналіз стану МС може істотно спроститися, якщо буде отримана її математична модель. Побудована з допомогою тільки теоретичних методів модель буде неадекватною. Навіть для однакових за геометричними характеристиками мостів вона буде різною, оскільки оточуюче середовище, як

правило, відрізняється. Математичну модель прогинів МС доцільно отримати на основі високоточних вимірювань. Сучасні дистанційні методи здатні забезпечити вимірювання прогинів з високою точністю, але ціна вимірювального обладнання (десятки тисяч євро) є неприпустимо високою для дорожніх господарств України. Існують, однак, відносно дешеві дистанційні вимірювальні засоби, які доцільно застосувати в роботі. До таких засобів можна, наприклад, віднести міні радар вартістю близько 100 доларів, але з його допомогою неможливо точно виміряти прогин, оскільки він вимірює доплерівську частоту відбитого від мосту сигналу, яка неявним чином має зв'язок з прогином. Для встановлення цього зв'язку один і той же прогин МС вимірювався високоточним механічним прогиноміром і синхронізованим з ним відбитим сигналом радара. Така операція еквівалентна калібруванню віртуальної системи дистанційного вимірювання прогинів МС, тобто такої системи, яка реально не існує, але дозволяє перетворювати доплерівські зсуви частоти в прогини МС.

В результаті проведення експериментів на фізичній моделі МС, що являє собою розміщену на опорах бетонну плиту довжиною 6 м [42], отримані наступні множини:

1) множина сигналів  $\{l_i(t)\}_{i=1}^N$ , які описують прогини об'єкту, що отримана при використанні високоточних механічних датчиків (прогиномірів);

2) множина сигналів  $\{F_{d_i}(t)\}_{i=1}^N$ , що описують доплерівський зсув частоти луна-сигналу від поверхні мосту, що коливається.

В одному  $i$ -тому експерименті в один і той же момент часу вимірюється два сигнали: прогин  $l_i(t)$  та доплерівський зсув частоти  $F_{d_i}(t)$ . Доплерівський радар вимірює  $F_{d_i}(t)$ , а далі надсилає цей сигнал на невідому наперед віртуальну систему (рис. 3.2), на виході якої необхідно отримати

залежність  $l_i(t)$ . Для цього потрібно провести ідентифікацію цієї системи, тобто отримати її модель.

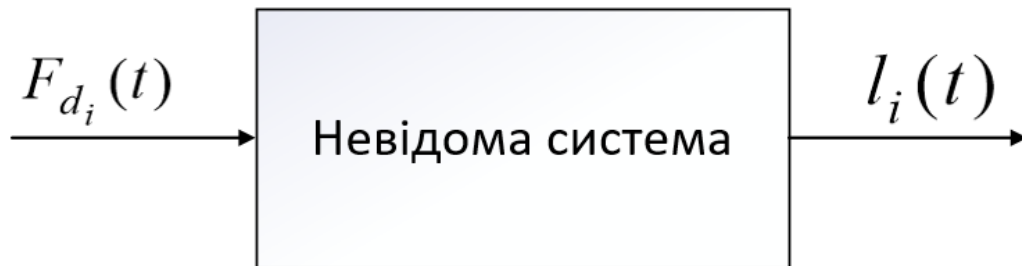


Рисунок 3.2 – Пояснення загального підходу до ідентифікації віртуальної системи для дистанційного вимірювання прогину

В цілому, потрібно по виду залежності  $F_{d_i}(t)$  отримати оптимальну оцінку прогину  $l_i(t)$ , що можна трактувати як калібрування. В дисертаційній роботі невідома система (рис. 3.2) розглядалась як віртуальна (модельна), хоча вона може бути побудована як реальна з використанням електронних схем. У віртуальній системі на вхід моделі подається вимірний радаром сигнал доплерівського зсуву частоти  $F_{d_i}(t)$  і завдяки алгоритму перетворення, який визначається при ідентифікації і калібруванні системи, розраховується потрібний сигнал  $l_i(t)$ . В реальній системі на вхід електронного пристрою, що побудований на основі зазначеної моделі, подається  $F_{d_i}(t)$ , а на виході визначається  $l_i(t)$ . Невідома система може описуватись, наприклад, моделями Вінера і Гаммерштейна, які неможливо реалізувати практично в конкретному пристрої, оскільки функції нелінійності та інерційності в цих моделях рознесені по різним блокам, що на практиці забезпечити неможливо. Для розв'язання задачі ідентифікації використовуємо множини  $\{F_{d_i}(t)\}_{i=1}^N$  та  $\{l_i(t)\}_{i=1}^N$ , де  $N$  – максимальна кількість експериментів (рис. 3.3).

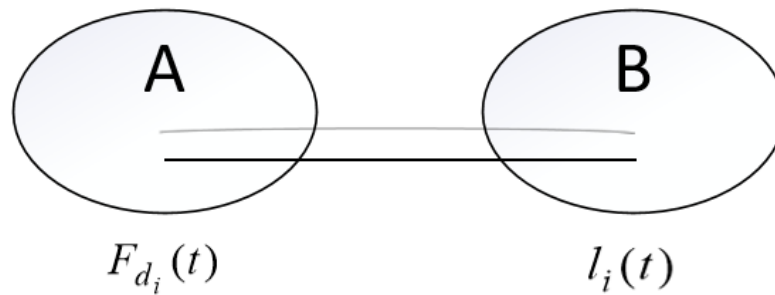


Рисунок 3.3 – Бієктивне відображення множини сигналів доплерівських зсувів частоти  $A$  в множини сигналів прогинів  $B$

На рисунку 3.3 приведена ілюстрація бієктивного (взаємно однозначного) відображення множини  $A$ , в якій точками є функції  $F_{d_i}(t)$ , в множини  $B$  з точками  $l_i(t)$ . При відображенні  $g: A \rightarrow B$  кожний елемент множини  $B$  має лише один прообраз. Отже, функцією невідомої системи є виконання відображення  $g$ . Вплив випадкових факторів на точки  $F_{d_i}(t)$  приводить до появи не одного, а багатьох сигналів  $F_{d_i}(t)$ , які створюють множини випадкових точок  $A_i$  ( $A_i \subset A$ ). Аналогічно множини випадкових точок  $B_i \subset B$  охоплюють точки  $l_i(t)$ . Будемо вважати, що множини  $A_i$  та  $B_i$  розбивають відповідно множини  $A$  та  $B$  на класи, що не перетинаються. Це спрощує розв'язання задачі ідентифікації. Якщо  $g: A \rightarrow B$  і для будь-якого сигналу  $l_i(t) \in B$  виконується рівняння  $g(F_{d_i}(t)) = l_i(t)$ , то будемо мати тільки одне рішення. В цьому випадку згідно з визначеннями функціонального аналізу [43] відображення  $g$  називається сюр'єкцією. Для задачі, що розглядається, виділяються впорядковані пари функцій  $(F_{d_i}(t), l_i(t))$ , які можна віднести до множини  $R$  всіх впорядкованих пар  $(i = \overline{1, N})$ . Отже, якщо  $(F_{d_i}(t), l_i(t)) \in R$ , то кажуть, що  $F_{d_i}(t)$  і  $l_i(t)$  зв'язані відношенням  $\varphi = \varphi_R$  і згідно з правилами функціонального аналізу це позначають як  $F_{d_i}(t) \varphi l_i(t)$ , де  $\varphi$  – відношення еквівалентності, яке розбиває множини  $A_i$  та  $B_i$  на класи,

що не перетинаються, зокрема, за відношенням  $\varphi$  точки множин  $F_{d_i}(t)$  та  $l_i(t)$  належать до одного класу. На практиці це означає, що кожному класу властиві свої особливості експерименту, що проводився для вимірювання цих сигналів. Наприклад, до різних класів можна віднести сигнали, які отримані для різних динамічних навантажень об'єкта. Навпаки, якщо в серії експериментів умови були незмінні, то всі результати вимірювань належать до одного класу. В цих обставинах можна оцінювати невизначеність вимірювань сигналів за типом А і знаходити модель невідомої системи (рис. 3.3) за результатами ідентифікації. Це перший підхід до ідентифікації системи. Отримана в такому випадку модель усереднює результати вимірювань і є придатною для тих умов, в яких проводились експерименти. Другий підхід припускає створення більш універсальної моделі системи (рис. 3.3), функціонування якої ґрунтується на фізичних явищах і характеристиках, що істотно не змінюються для різних умов експерименту. Тут, однак, виникає задача оцінки обмежень, при яких справедлива така модель системи.

Існує параметрична і непараметрична ідентифікація систем. Параметрична ідентифікація систем припускає створення моделі, в якій невідомі параметри визначаються в процесі ідентифікації. Наперед невідомо, яка повинна бути модель: лінійна чи нелінійна, залежна чи незалежна від часу. Доцільно вибрати найбільш загальну модель невідомої системи, зокрема, нелінійну інерційну модель. Якщо вона виявиться лінійною, то маємо окремий випадок ідентифікації віртуальної системи (рис. 3.4).

Методи ідентифікації нелінійних інерційних систем представлені в [44] і можуть бути використані при створенні моделі або реального пристрою, що перетворює доплерівські зсуви частоти в прогини МС. Ідентифікація віртуальної системи забезпечує отримання моделі цієї системи (фактично функції перетворення), що еквівалентно її калібруванню.

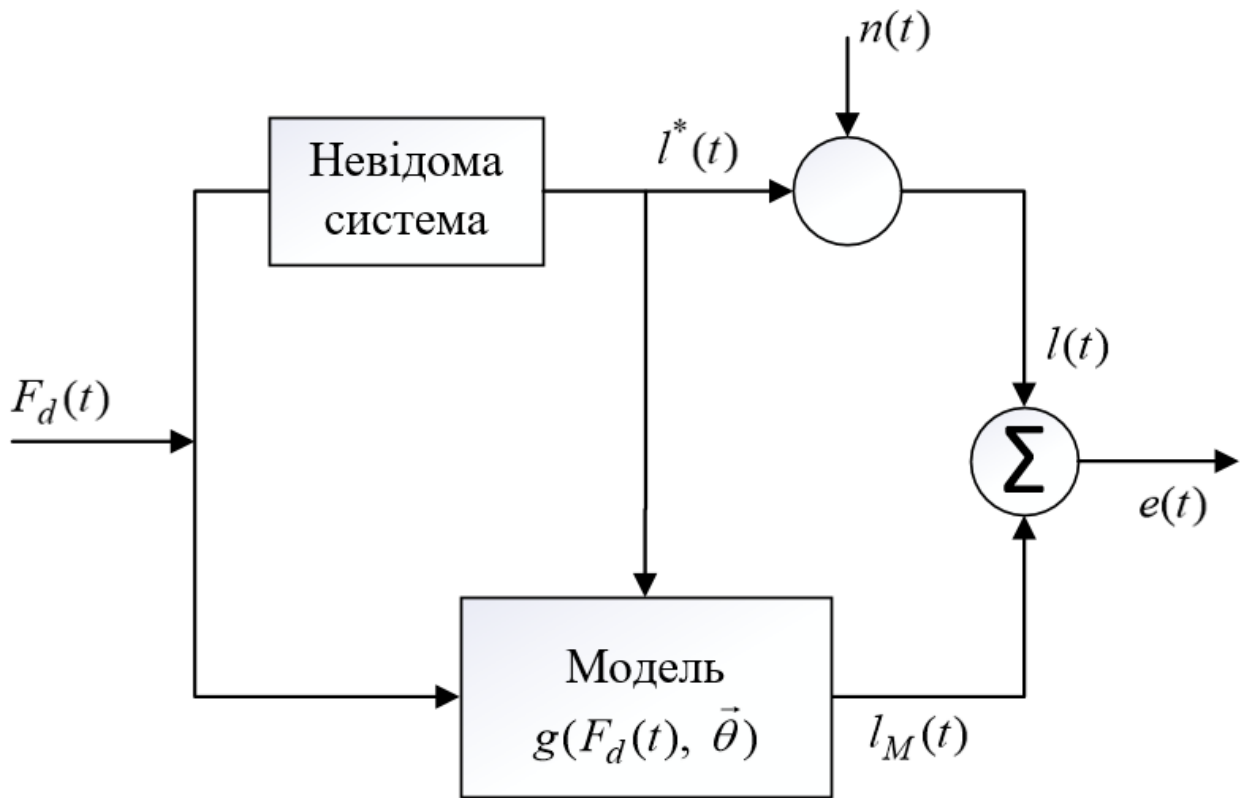


Рисунок 3.4 – Схема ідентифікації віртуальної системи для дистанційного оцінювання прогинів МС в одній точці

Структурна схема загальної моделі калібрування віртуальної системи для дистанційного визначення прогинів в одній точці МС приведена на рис. 3.5. Після закінчення процесу збирання інформації про  $F_{d_i}(t)$  і  $l_i(t)$  записується зв'язок між цими вже відомими після вимірювання функціями у вигляді математичної моделі з невідомими складовими, визначення яких означає завершення процесу ідентифікації віртуальної системи. Тут з'являються три альтернативи для опису зазначеного зв'язку. По-перше, віртуальну систему (або фільтр) вважаємо в загальному випадку нелінійною інерційною і описуємо у вигляді моделей Гаммерштейна або Вінера, в яких функції нелінійності та інерційності розділені, що можливо тільки віртуально. Нелінійність системи описується, наприклад, поліномом степені два або вище, а інерційність – через інтеграл згортки, в якому імпульсна характеристика

безпосередньо описує цю властивість. Сам сигнал  $F_{d_i}(t)$  розкладається у фіксованому ортогональному базисі, наприклад, Карунена-Лоева.

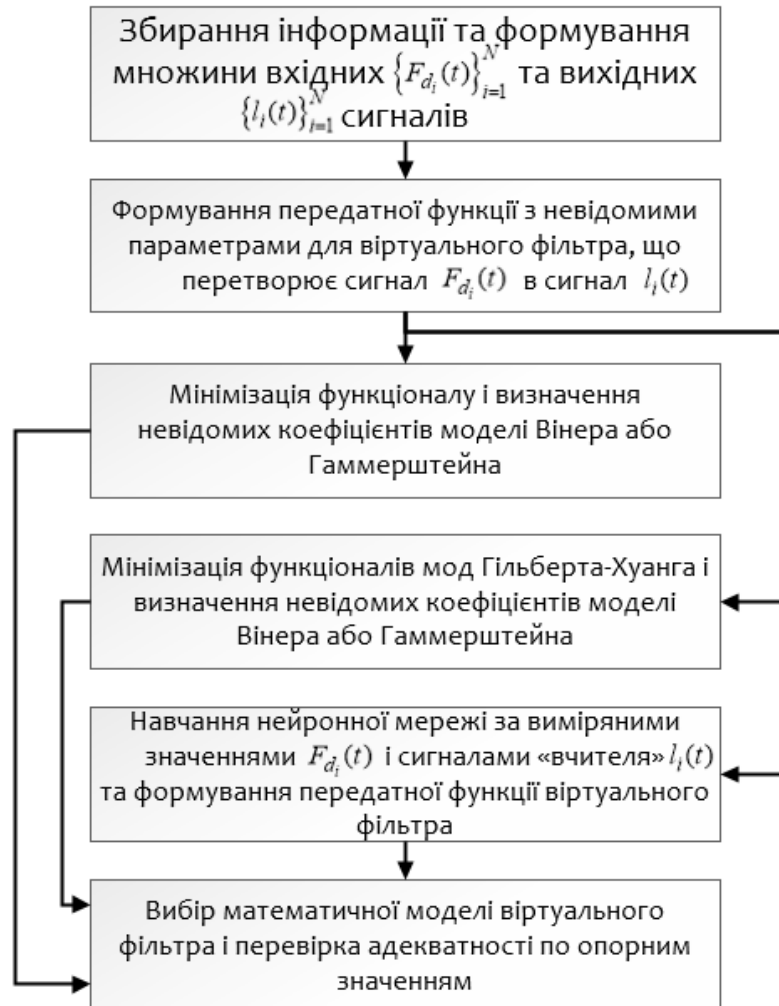


Рисунок 3.5 – Структурна схема загальної моделі калібрування віртуальної системи для дистанційного визначення прогинів в одній точці МС

По-друге, знову віртуальну систему вважаємо нелінійною та інерційною і проводимо розкладання не тільки відомої функції  $F_{d_i}(t)$ , але також і відомої функції  $l_i(t)$  в адаптивному базисі Гільберта-Хуанга. Аналогічно першому методу встановлюємо зв'язок, але не між цими функціями, а між однаковими за номером модами Гільберта-Хуанга цих функцій з використанням зазначених моделей Вінера і Гаммерштейна. Всі операції виконуються для

кожної реалізації випадкових процесів і потім їх потрібно статистично об'єднати. У першому випадку маємо неадаптивну до виду сигналів одноканальну систему, а у другому – адаптивну багатоканальну. В обох випадках здійснюється мінімізація функціоналу (або функціоналів в багатоканальній системі), який залежить від невідомих величин, з допомогою яких описують перетворення сигналу  $F_{d_i}(t)$  в сигнал  $l_i(t)$ . Однозначно другий метод є складнішим, але в деяких ситуаціях зв'язок між модами зазначених сигналів може виявитись лінійним інерційним, що значно спростить математичні перетворення і зменшить комп'ютерний час оброблення інформації.

По-третє, для отримання універсальної моделі зв'язку між  $F_{d_i}(t)$  та  $l_i(t)$  можна скористатись нейронною мережею. Множина вхідних сигналів  $\{F_{d_i}(t)\}_{i=1}^N$  служить для навчання мережі з учителем. Відповідями «вчителя» є відповідні сигнали  $\{l_i(t)\}_{i=1}^N$ . Головним недоліком цієї моделі є її ефективність для тих умов, в яких проводилось навчання. Звідси, зрозуміло, що потреба перенавчання мережі буде часто виникати в реальних умовах експлуатації МС. Приклад складання функціоналу для ідентифікації віртуальної системи описано далі.

Невідома система перетворює сигнал  $F_d(t)$  в прогин  $l^*(t)$ , до якого додається білий гауссівський шум  $n(t)$ . Прогин  $l^*(t)$  вважаємо результатом вимірювання прогину механічним датчиком. В конкретному випадку це функція  $l_i(t)$ , до якої додається шум. Сигнал  $l(t)$  порівнюється з вихідним сигналом моделі  $l_M(t)$ . Якщо модель вибрана правильно, то різниця  $e(t) = l(t) - l_M(t)$  є близькою до нуля. Мінімізація  $|e(t)|$  або  $e^2(t)$  досягається шляхом вибору оптимального вектору параметрів моделі  $\vec{\theta}$ . Для цього створюється функціонал (число), який (формула (3.1)) є пропорційним квадрату похибки  $e^2(t)$ , тобто



$$J(\vec{\theta}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} (l(t) - l_M(t))^2 dt. \quad (3.1)$$

Для моделі Гаммерштейна (3.2)

$$l_M(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [a_0 + a_1 F_d(t) + a_2 F_d^2(t) + \dots + a_{m-1} F_d^{m-1}(t)] h(t - \tau) d\tau \quad (3.2)$$

де  $h(t)$  – імпульсна характеристика інерційного блоку, яка може визначатись для інерційності першого порядку за формулою (3.3)

$$h(t) = \frac{A}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}}, \quad (3.3)$$

де  $A$  – амплітудний коефіцієнт,  $\tau_0$  – постійна часу інерційного блоку моделі Гаммерштейна. Вектор невідомих коефіцієнтів у цьому випадку знаходиться за формулою (3.4)

$$\vec{\theta} = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_{m-1}, \tau_0, A). \quad (3.4)$$

Отже, в процесі глобальної мінімізації функціоналу (3.5)

$$J(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{m-1}, \tau_0, A) = \int_{-\infty}^{\infty} (l(t) - l_M(t))^2 dt \quad (3.5)$$

Визначаються невідомі коефіцієнти нелінійного блоку  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{m-1}$  та параметри імпульсної характеристики інерційного блоку  $\tau_0, A$ . Для моделі Вінера (формули (3.6) та (3.7))

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_d(t) h(t - \tau) d\tau \quad (3.6)$$

$$l_M(t) = a_0 + a_1 z(t) + a_2 z^2(t) + \dots + a_{m-1} z^{m-1}(t). \quad (3.7)$$

Після отримання моделі  $g(F_d(t), \vec{\theta})$  для однієї пари реалізацій  $(F_{d_i}(t), l_i(t))$  отримуємо моделі системи для інших пар. Якщо моделі для різних пар істотно відрізняються, то це свідчить про відмінність фізичних явищ, що супроводжують кожний експеримент. В цьому випадку неможливо отримати достовірну загальну модель системи. Фактично можуть існувати тільки окремі моделі системи, які мають обмежену область застосування.

### 3.3 Новий метод дистанційного збирання інформації в системі контролю стану мостових споруд

Прогини поверхні МС можуть визначатись дистанційними методами, наприклад, лазерними інтерферометрами, але вартість подібних систем є великою, а вимірювання повинен проводити персонал високої кваліфікації. В дисертації запропоновані дуже прості і дешеві методи оцінки прогинів МС, точність яких задовольняє вимогам щодо оцінки стану мостових споруд.

Динамічні та геометричні характеристики поверхонь різних мостових споруд змінюються в залежності від різноманітних факторів. Нижня частина поверхонь мостових об'єктів під впливом різноманітних навантажень буде коливатись, а самі коливання і форма поверхні, що змінюється містять дуже цінну діагностичну інформацію. Отримання цієї інформації може бути здійснена за допомогою пристроїв та датчиків контактного типу [45], [46], що становлять невід'ємну частину ВІС.

Змінювання форми нижньої поверхні об'єктів може бути виміряне із допомогою різноманітних методів, які поділяються на контактні і безконтактні. Контактні методи є досить привабливими в умовах простої практичної реалізації, але на високих МС можливість їх використання суттєво ускладнюється. Є чимало наукових статей, у яких описуються неконтактні методи визначення деформації та форми поверхні. Серед них можна виділити оптичні методи [47] [48] [49]. В статті [47] кривизна тонких плівок може бути визначена із використанням когерентного зондування і оцінки градієнта поля.

В [48] виміри шорсткості поверхні проводяться за допомогою оптичної системи.

В роботі [49] використовується метод лазерного сканування для визначення хвилястості поверхні. Встановлені на поверхні споруди фільтри акустичних хвиль описані в статті [50] і вони дозволяють виміряти кривизну цієї поверхні. У праці [51] за допомогою метода рентгенівської томографії оцінюються тривимірні зображення різних об'єктів. Декілька методів вимірювання кривизни ґрунтуються на аналізі зображень поверхонь [52], [53]. Всі вище перераховані методи включають у себе вимірювання мікрокривизни і мікронерівностей поверхні, тому в них не були розглянуті методи оцінювання форми досить великих технічних об'єктів, до яких належать мостові споруди. Використання оптичних методів на великих відстанях є складним, оскільки на оптичне випромінювання великий вплив чинить середовище їх поширення (тропосфера). Тому в дисертації розроблено систему дистанційного збирання інформації про просторовий коефіцієнт динамічності і форму деформованої поверхні мостових споруд з використанням довжин ЕМХ більше міліметра.

Її сутність полягає в тому, що на нижній поверхні мосту розміщують систему  $N$  ідентичних еквідистантно (тобто на однакових відстанях) розміщених металевих пластин, термін служби яких є сумірним з терміном експлуатації МС. Ця система пластин опромінюється первинною ЕМХ визначеного діапазону і в металевих елементах (пластинах) наводить струми високої частоти (одиниці – десятки ГГц). Внаслідок цього кожний елемент (пластина) перетворюється у вторинний випромінювач, а всі елементи в сукупності створюють лінійну антенну решітку (рис. 3.6), що формує у просторі сумарне електромагнітне поле цих випромінювачів.

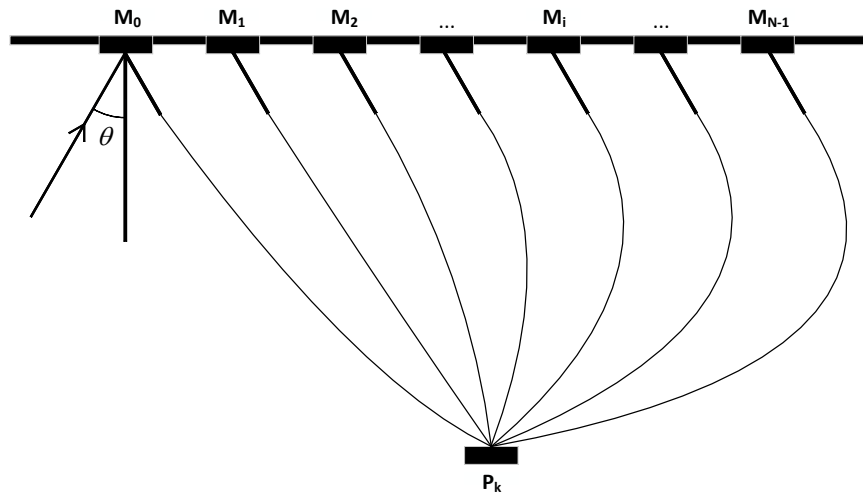


Рисунок 3.6 – Схема опромінення ЕМХ металевих пластин

Лінійна система приймальних елементів (рис. 3.6) розташовується на будь-якій зручній для вимірювання відстані від системи вторинних випромінювачів. Хвилі від всіх вторинних випромінювачів надходять до кожного елемента, що приймає ЕМХ. Таким чином, утворюється залежність комплексної амплітуди поля від просторової координати, тобто вздовж системи приймальних елементів (вісь X).

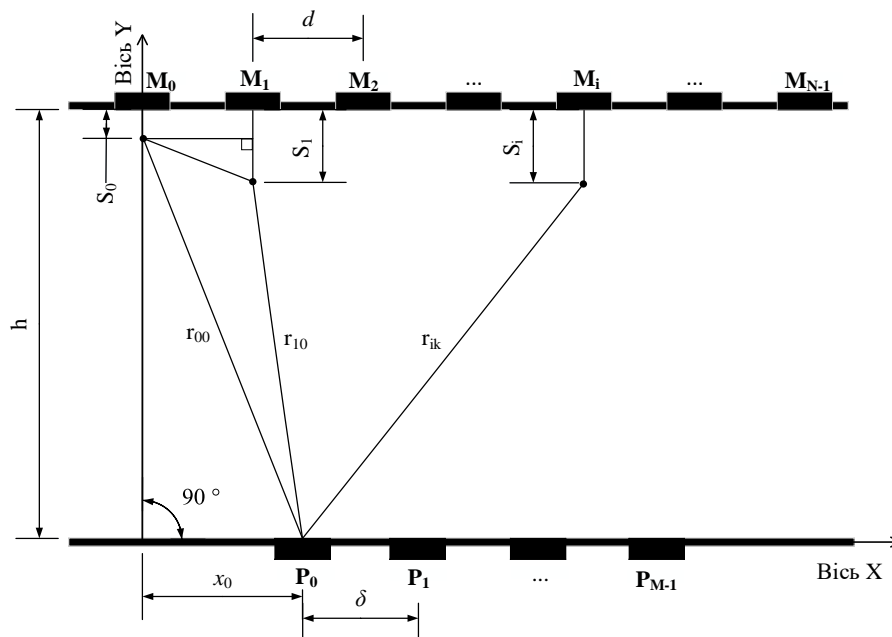


Рисунок 3.7 – Геометрія розміщення антенної решітки вторинних випромінювачів та приймальної антенної решітки

Визначення відстані  $r_{ik}$ , тобто відстані між  $i$ -тим випромінювачем та  $k$ -тим приймальним елементом, в якому складаються поля усіх первинних випромінювачів, здійснюється згідно з рис. 3.7. Вторинні випромінювачі сконцентровані в точках  $M_0, M_1, M_2, \dots$ , а приймальні елементи розміщені у точках  $P_0, P_1, P_2, \dots$ . Точки  $P_k$  знаходяться на  $r_{ik}$  відстані від точок  $M_i$ , причому  $r_{ik} < r_{fz}$ , де  $r_{fz}$  – відстань до дальньої зони антенної решітки з випромінювачами, що розміщені в точках  $M_i$ .

Можна вважати, що діаграми спрямованості випромінювачів, що знаходяться в точках  $M_i$ , мають досить широку і майже однакову діаграму спрямованості (ДС), тобто у напрямку точок  $P_k$  з усіх випромінювачів  $M_i$  випромінюються хвилі, які створюють однакове за амплітудою електромагнітне поле. Внаслідок досить великої відстані між приймальними елементами ефектами взаємного впливу між ними можна знехтувати. Повне поле в точці  $P_k$  є сума полів від усіх  $i$ -тих випромінювачів, число яких  $M$ . Амплітуда електричного поля може бути розрахована за формулами, які описані в різноманітній літературі, наприклад, в [54], [55]. Комплексна амплітуда напруженості електричного поля на вході кожного приймального елемента складає

$$\dot{E}_k = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\dot{A}_i}{r_{ik}} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_{ik}}, \quad (3.8)$$

де  $i$  та  $k$  – номер випромінювача та номер приймального елемента;

$N$  – число вторинних випромінювачів;

$\lambda$  – довжина ЕМХ;

$$\dot{A}_i = A_i e^{j\phi_i};$$

$A_i, \phi_i$  – амплітуда та фаза поля відповідно для  $i$ -го випромінювача (в подальшому для простоти приймаємо  $\phi_i = 0$ ).

Відстань  $r_{ik}$  можна визначити за допомогою методів геометрії з використанням рис. 3.7 за формулою (3.9):

$$r_{ik} = \sqrt{(h - S_0)^2 + (x_0 + \delta \cdot k)^2 + (d \cdot i)^2 + (S_i - S_0)^2 - 2\Lambda_{ik} \cdot \Upsilon_{ik}}, \quad (3.9)$$

де  $\Lambda_{ik} = \sqrt{(h - S_0)^2 + (x_0 + k \cdot \delta)^2} \sqrt{(d \cdot i)^2 + (S_i - S_0)^2}$ ;

$$\Upsilon_{ik} = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{x_0 + k \cdot \delta}{h - S_0}\right) - \arctan\left(\frac{S_i - S_0}{d \cdot i}\right)\right);$$

$h$  – відстань між нижньою поверхнею мосту та решіткою приймальних елементів;

$S_i$  – величина прогину поверхні мосту в точках розміщення випромінювачів;

$x_0$  – відстань між початком координат та першим приймальним елементом  $P_1$ ;

$\delta$  – відстані між приймальними елементами;

$d$  – відстані між випромінювачами.

Для посилення інтерференційних ефектів візьмемо у подальшому відстані  $\delta$  та  $d$  однаковими. Усі розміри та відстані в формулах (3.8) і (3.9) вважаються відомими, оскільки задаються дослідником до початку проведення вимірювань.

Даний метод полягає у вимірюванні амплітуди електромагнітного поля на виходах приймальної решітки у випадку, коли поверхня мосту є плоскою або має відхилення від площини, що заздалегідь виміряні різними способами на ненавантаженої МС. Виміри можуть проводитися на будь-якій відстані  $h$ . В результаті на виході приймальної решітки маємо залежність  $E_1(z_k)$ , де  $z_k$  – координата  $k$ -го приймального елемента. Амплітуда поля  $A_i$  вторинного випромінювача в формулі (3.8) у тих самих умовах опромінювання металевих пластин на мосту може вважатись однаковою. Амплітуду можна винести з-під

знаку суми в формулі (3.8), а далі це співвідношення нормується. Отже, далі будемо використовувати нормовані виміряні амплітуди електромагнітного поля. Незалежно від потужності електромагнітного випромінювання, що діє на металеві пластини, які перетворюються у вторинні випромінювачі, форма залежності  $E_1(z_k)$  не буде залежати від зазначеної потужності і тому, щоб не враховувати останню, є доцільним використовувати нормовані розподіли амплітуди поля. Тому амплітуду напруженості поля на виході приймальної решітки можна записати у вигляді (формула 3.10):

$$\dot{E}_1(z_k) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\dot{A}_i}{r_{ik}^o} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_{ik}^o} \approx \frac{\dot{A}_{io}}{r_o} \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_{ik}^o}, \quad (3.10)$$

де  $\dot{A}_{io}$  та  $r_o$  – середні значення амплітуди поля та відстані між елементами приймальної та передавальної решіток. Нехай відстань між елементами двох решіток для ненавантаженого мосту  $r_{ik}^o = 30$  м. Після створення навантаження на міст, останній прогинається максимум на один-два десятка міліметрів і, наприклад,  $r_{ik} = 30.01$  м. Зрозуміло, що  $\frac{1}{r_{ik}^o} \approx \frac{1}{r_{ik}}$ , що дає право позбутися всього амплітудного множника і після нормування (формула (3.11))

$$\dot{E}_{1n}(z_k) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_{ik}^o}. \quad (3.11)$$

Під дією навантаження форма мосту змінюється і з'являються деякі прогини  $S_i$  нижньої поверхні МС. Розподіл амплітуди поля вздовж приймальної решітки може змінитись істотно, наприклад, стати рівним  $E_2(z_k)$ , оскільки вимірювання здійснюються у ближній зоні передавальної решітки. Дивлячись на те, що відтань  $h$  до нижньої частини мосту не змінилась, причиною зміни розподілу поля на виходах приймальної решітки є наявність

прогинів  $S_i$  в точках розміщення вторинних випромінювачів. Якщо прогини  $S_i$  зменшити до нуля, то нормований розподіл

$$\dot{E}_{2n}(z_k) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_{ik}}. \quad (3.12)$$

перетвориться в нормований розподіл  $E_{1n}(z_k)$ . Цей ефект використовується для визначення прогинів поверхні  $S_i$ . Зрозуміло, що формули (3.11) і (3.12) відрізняються тільки відстанями  $r_{ik}^o$  та  $r_{ik}$ , які після компенсації прогинів стають рівними. Для цього складається функціонал

$$J(s_0, s_1, \dots, s_{N-1}) = \sum_{i=0}^{N-1} |E_{1n}(z_k) - E_{2n}(z_k)| \Rightarrow \min \quad (3.13)$$

який мінімізується методами глобального випадкового пошуку, наприклад, з використанням генетичного алгоритму.

На рис. 3.8, 3.9 зображені приклади залежностей  $E_{1n}(z_k)$  (суцільна лінія) та  $E_{2n}(z_k)$  (пунктирна лінія) для різних відстаней між решітками та різних довжин ЕМХ. Рис. 3.8 ілюструє графіки для відстані між приймальною решіткою та нижньою частиною МС, яка дорівнює 10 м, і довжини хвилі 20 см, а рис. 3.9 – для відстані 50 м і довжини хвилі 2 см. Математичне завдання генетичного алгоритму складається у керованій деформації пунктирних ліній з метою досягнення ними суцільних ліній, що досягається при мінімізації (3.13). При цьому одразу визначаються усі прогини  $S_i$ .

На рис. 3.10 показано залежності нормованих амплітуд поля від лінійної координати, яка характеризує просторове положення усіх приймальних елементів для різних відстаней від нижньої частини МС. Було з'ясовано, що графіки істотно відрізняються при різних відстанях, оскільки на близьких відстанях від споруди інтерференційна картина полів від випромінюючих елементів є неусталеною



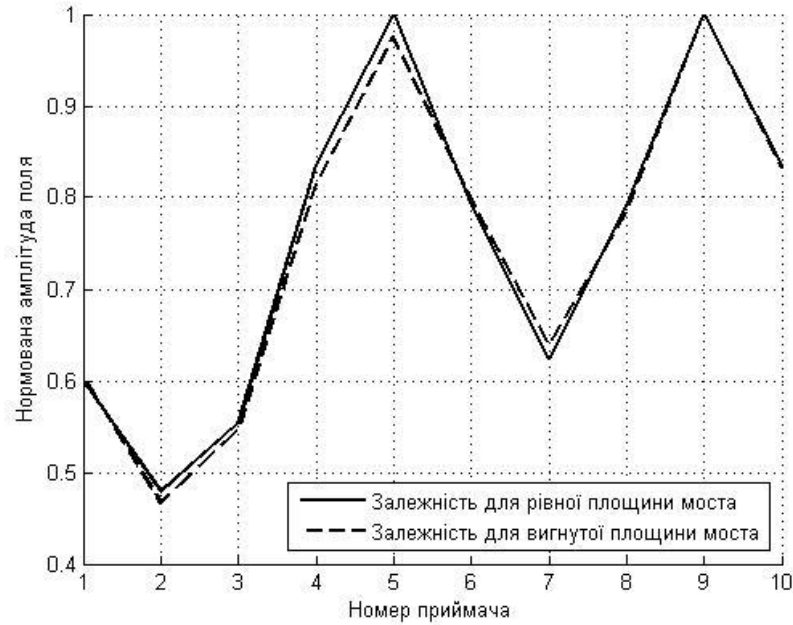


Рисунок 3.8 – Приклади залежності  $E_{1n}(z_k)$  (суцільна лінія) та  $E_{2n}(z_k)$  (пунктирна лінія) для відстані між решітками 10 м та при довжині ЕМХ 20 см

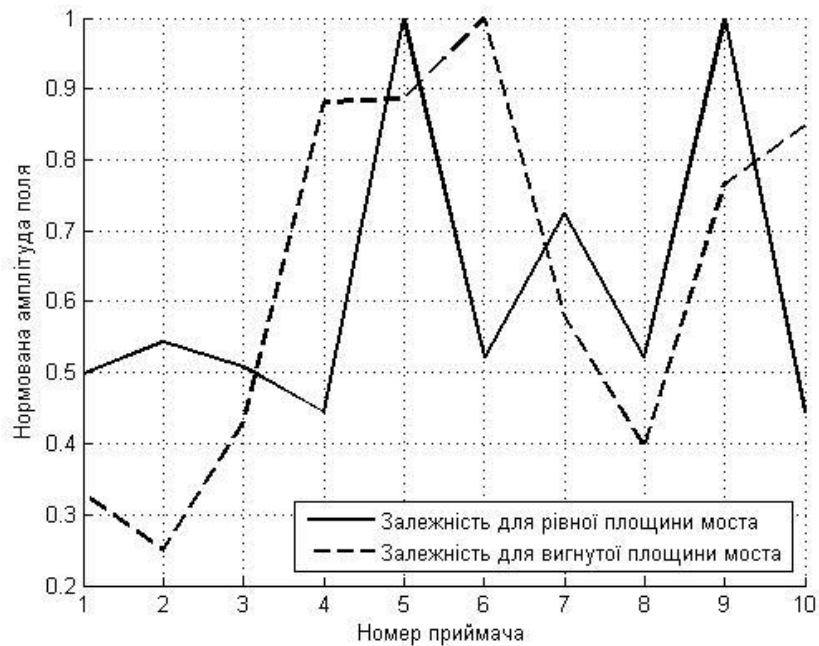


Рисунок 3.9 – Приклади залежності  $E_{1n}(z_k)$  (суцільна лінія) та  $E_{2n}(z_k)$  (пунктирна лінія) для відстані між решітками 50 м та при довжині ЕМХ 2 см

Якщо буде відбуватись наближення до границі дальньої зони дані залежності будуть відрізнятись одна від другої менше. Значною перевагою даного способу вимірювання коливань МС є те, що застосування для різної дальності до МС (і також для дальньої зони) відбувається за однаковою методикою.

Ефективність вищезгаданого способу була оцінена за точністю визначення прогину МС в кожній точці, де розміщений випромінюючий елемент. Точність найчастіше визначається похибкою вимірювання, тобто різницею між результатом вимірювання та істинним значенням параметру, яке на практиці дає еталон. В якості еталону в представленому способі використовується абсолютно точне значення прогинів в різних точках МС, які вибираються при моделюванні.

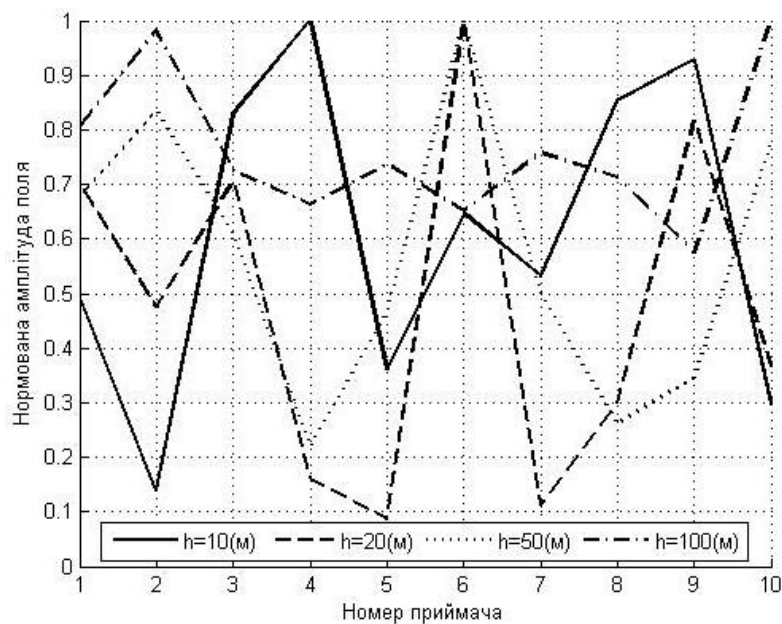


Рисунок 3.10 – Залежності нормованих амплітуд поля від лінійної координати, що характеризує просторове положення кожного приймального елемента для різних відстаней від нижньої частини МС

Після виконання усіх операцій визначаються всі прогини і точність розрахунків оцінюється різницями між отриманими даними та заданими раніше в кожній точці, де розміщується передавальний елемент. Ця різниця

нормується відносно максимального значення прогину поверхні, що задавалась при моделюванні і виражається у відсотках.

На рис. 3.11 показані залежності похибки визначення прогинів поверхні від кількості приймальних елементів при різних довжинах ЕМХ, що використовувались. Рис. 3.11 свідчить, що для кожної окремої ситуації може існувати деяка оптимальна кількість приймачів і довжини ЕМХ, при яких похибки визначення прогинів будуть найменшими, зокрема такими, що не перевищують 10 %. Дана цифра також характеризує точність інформації про прогини. На рис. 3.12 виділена залежність похибки вимірювання прогинів поверхні від довжини ЕМХ, з якої випливають рекомендації щодо вибору цієї довжини. Специфіка використання методу випадкового пошуку глобального екстремуму, що реалізований в дисертації у вигляді генетичного алгоритму, викликає стрибкоподібні різкі залежності на графіках. При малих довжинах хвиль збільшується кількість максимумів електромагнітного поля і ускладнюється характер амплітуди цього поля в ближній зоні передавальної решітки. При цьому збільшується кількість екстремумів функціоналу, що мінімізується. При великій кількості екстремумів алгоритм може замість глобального екстремуму знайти локальний, що приводить до похибки визначення прогину поверхні. Якщо довжина хвилі збільшується, кількість екстремумів зменшується, але ефективність вторинного випромінення погіршується, оскільки розміри вторинного випромінювача стають меншими довжини хвилі і в цих випадках точність визначення прогинів зменшується. Отже, існує деякий діапазон довжин хвиль, при яких точність визначення прогинів є найбільшою. У даному випадку це дециметровий діапазон хвиль, в якому довжина хвилі повинна бути близькою до 20 см.

Точність інформації прямо залежить від точності вимірювання, зокрема, при належному виборі довжини хвилі та геометрії антенних решіток можна оцінити розподіл прогинів вздовж МС з похибками, що не перевищують 10 %. Пошук глобального мінімуму функціоналу (3.13) з допомогою генетичного алгоритму є причиною запізнення передачі динамічної інформації про

прогини нижньої поверхні МС. Результати моделювання на комп'ютері показують, що час затримки інформації складає десятки секунд, що для ІТ, які забезпечують прийняття рішення про стан МС, є допустимим значенням. В [56] автором доведено, що можна обійтися без оптимізації функціоналу (3.13), але тут доведеться вирішувати проблему багатозначності тригонометричних функцій та розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь.

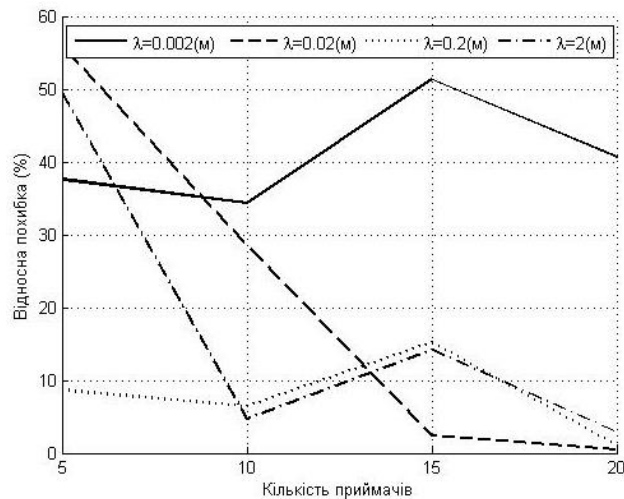


Рисунок 3.11 – Залежності відносної похибки визначення прогинів нижньої поверхні МС від кількості приймальних елементів при різних довжинах ЕМХ

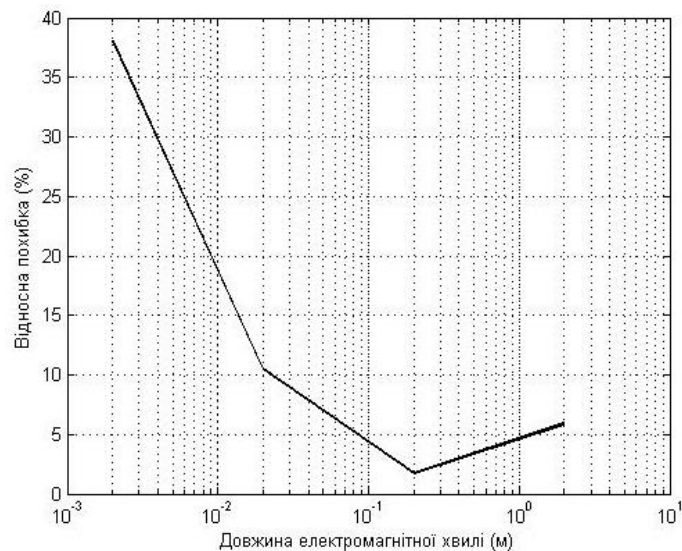


Рисунок 3.12 – Залежність відносної похибки вимірювання прогинів нижньої поверхні МС від довжини ЕМХ

Приведені раніше аргументи повністю відповідають фізичному змісту явищ, що розглядаються, і неодноразово перевірялись теоретично та

експериментально, однак раніше подібного застосування відомих фізичних ефектів не було.

Схема системи збирання і оброблення інформації про просторові прогини нижньої поверхні мостових споруд зображена на рис. 3.13.



Рисунок 3.13 – Схема системи збирання і оброблення інформації про просторові прогини нижньої поверхні мостових споруд

Просторові прогини при випадковому навантаженні МС створюють неоднорідне поле прогинів, а в кожній окремій точці буде спостерігатись у загальному випадку нестационарний процес. Метод не є чутливим до виду реалізацій цього процесу. Збирання статистичної інформації для формування законів розподілу прогинів повинно здійснюватися неперервно, поки не буде отримана необхідна вибірка.

Отже, в дисертації розроблено новий метод дистанційного збирання ВІ про прогини нижньої поверхні бетонної МС, який на відміну від відомих забезпечує одночасне вимірювання нестационарних прогинів всієї поверхні, що дозволяє підвищити оперативність прийняття рішення про безпеку споруди при невеликих економічних витратах. Це становить **перший** пункт наукової новизни.

Найбільшу вартість в цьому методі мають роботи з встановлення металевих пластин на нижню частину бетонної МС, але ця операція виконується тільки один раз і при належному виборі металу ці пластини будуть існувати до кінця терміну експлуатації МС. Вартість радіотехнічних елементів для розробленого методу є невисокою (сотні доларів) і, до того ж, одна мобільна ВС може обслуговувати багато МС в Україні, тобто їх кількість на всю країну не повинна бути високою. Сама операція визначення прогинів МС при встановлених пластинах і підготовленій до роботи мобільної вимірювальної системи складає декілька хвилин разом з часом обробки інформації. У випадку необхідності прийняття статистичних рішень про стан МС час отримання інформації визначається часом набору статистики і залежить від типу мосту, умов його експлуатації та наявності апріорної інформації про прогини.

Описаний метод та його різновиди запатентовано і отримано патент на винахід [30] та патент на корисну модель [29]. Крім того, теоретичні положення методу опубліковано в [40].

Недоліком представленого методу є нехтування відбитими від бетонної поверхні МС хвилями, які хоча мають істотно меншу амплітуду поля, ніж хвилі, що відбиті від резонансних металевих пластинок, але можуть вплинути на точність інформації про прогини нижньої поверхні мосту. Для врахування цього впливу необхідно мати інформацію про діелектричну проникність бетонної МС. Автором розроблено метод дистанційного оцінювання діелектричної проникності нижньої поверхні бетонних мостових споруд, який описано у додатку А.

### 3.4 Інформаційна технологія прийняття рішень про стан мостової споруди при обробленні нестационарних випадкових процесів прогинів

Основним призначенням багатьох інформаційних систем є забезпечення цінною інформацією тих систем, які здатні приймати рішення на керування

технічним об'єктом (ТО) або про працездатність такого об'єкту у різноманітних режимах роботи (діагностичні рішення). На сьогоднішній момент різні інтелектуальні інформаційні технології є дуже частим явищем майже у всьому світі. Такими ІТ є способи, методи, моделі, які виконують різноманітні функції [14], такі як: обробка, зберігання, передача та використання інформації. Чимало розвинених країн світу, таких як Китай, Південна Корея, Японія та ін. впроваджують сучасні ІТ, які називаються «розумні» мости [57], що мають інтерфейс між реальною МС та її цифровою копією. Інформація про МС збирається із великої кількості датчиків, які розташовані по всій довжині мосту. Як правило, такі датчики є бездротовими та вже є вбудованими у саму МС. Подібна технологія була реалізована у Південній Кореї [57]. Зрозуміло, що під час експлуатації мостів отримання інформації щодо різних параметрів МС погіршується із плином часу. Тому з'являється необхідність у використанні дистанційних методів отримання інформації про МС [40]. Такі датчики збирають інформацію не тільки про характеристики мосту, але й про проїжджаючий мости автотранспорт. У результаті споживач отримує дуже велику кількість інформації, яку треба обробити та зробити багато висновків щодо, зокрема, стану МС. Прийняття рішень в таких умовах є дуже складною задачею. У випадку, коли вхідні процеси є нестаціонарними, тобто їх статистичні характеристики є змінними на визначеному часовому проміжку, прийняття правильного і адекватного рішення перетворюється у велику проблему. В багатьох випадках, коли вимірюються прогини МС, які виникають при проїзді автотранспорту, такі процеси є нестаціонарними. Традиційні підходи для прийняття рішення щодо стану МС в даних умовах не діють, тому треба використовувати нестандартні підходи до обробки таких нестаціонарних процесів і створювати відповідні інформаційні технології.

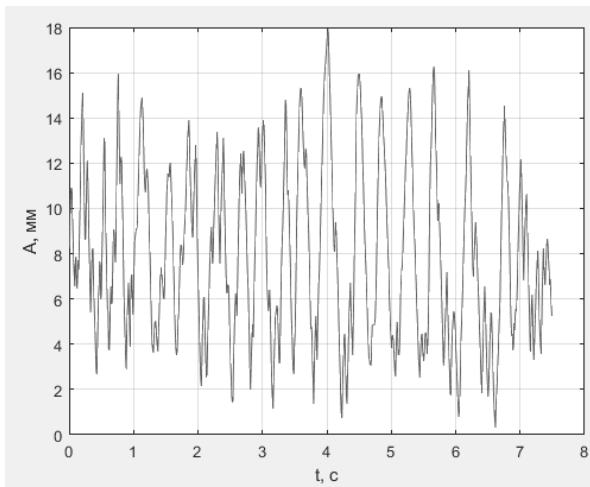
Для того, щоб прийняти рішення щодо стану МС потрібно визначити деякий критерій, наприклад, перевищення наперед встановленого значення динамічного прогину (порогу) МС під дією стандартного навантаження.

Взагалі, такий поріг повинен бути функцією просторової координати МС. В [40] автором у співавторстві було розроблено метод дистанційного вимірювання прогинів МС в багатьох точках одночасно. В одній точці МС залежність прогину від часу  $\xi(t)$  є у більшості випадках нестационарним процесом і його реалізації можуть мати у собі «стрибки» прогинів, які можуть перевищувати вищезгаданий поріг. Оскільки дуже важко передбачити подальший характер змінювання реалізацій нестационарного сигналу, то одразу ж виникає питання перетворення нестационарного сигналу в стаціонарний при збереженні характерних ознак, за якими приймається рішення про стан МС

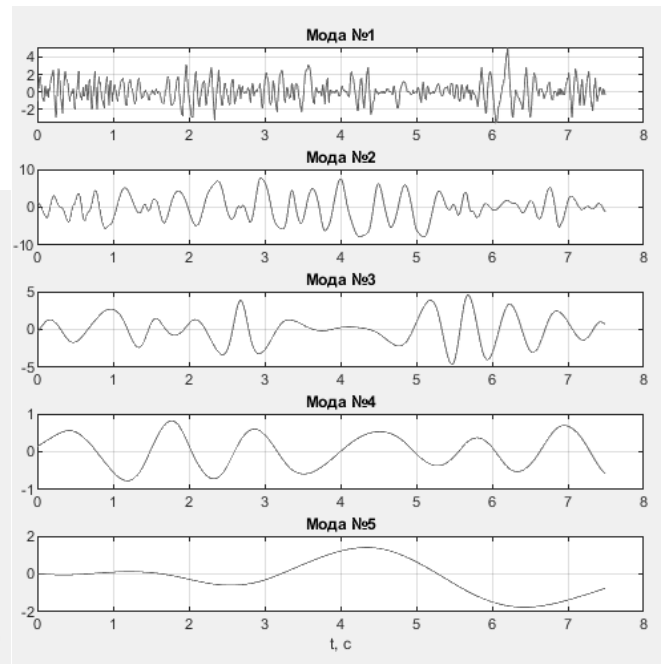
Дослідження автора у [58] показали, що використання перетворення Гільберта-Хуанга є прийнятним для нестационарних випадкових процесів та для неоднорідних випадкових полів. У [59] описані аспекти отримання мод Гільберта-Хуанга. Найголовнішою перевагою такого розкладання сигналу на моди Гільберта-Хуанга є адаптивність та універсальність його використання до будь-якого практично важливого процесу і, крім того, ці моди є ортогональними. Розкладання реалізацій функції  $\xi(t)$  на моди може призвести до зникнення стрибків амплітуди прогинів, що є головною ознакою наявності дефекту МС. На рис. 3.14 і рис. 3.15 приведені результати декомпозиції реалізацій прогинів МС на моди Г-Х, що відносяться до різних видів навантаження фізичної моделі МС. Ця фізична модель являла собою залізобетонну плиту довжиною 6 м, поставлену на опорах.

Постійна складова при використанні перетворення Г-Х віднімається від значень прогинів мод і тоді у такому випадку значення амплітуд можуть бути від'ємними, але для завдання знаходження різких стрибків амплітуди прогинів це не є дуже важливим. Дані моди були отримані при різних умовах експлуатації МС. Аналіз мод показує, що виявлення стрибків прогинів МС повинно відбуватися в перших модах Г-Х.



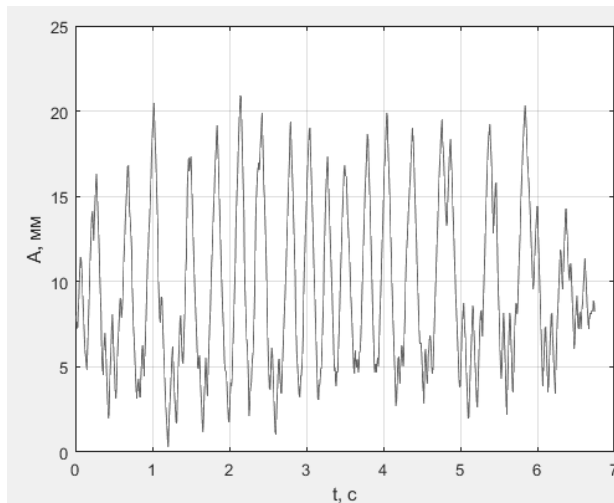


(a)

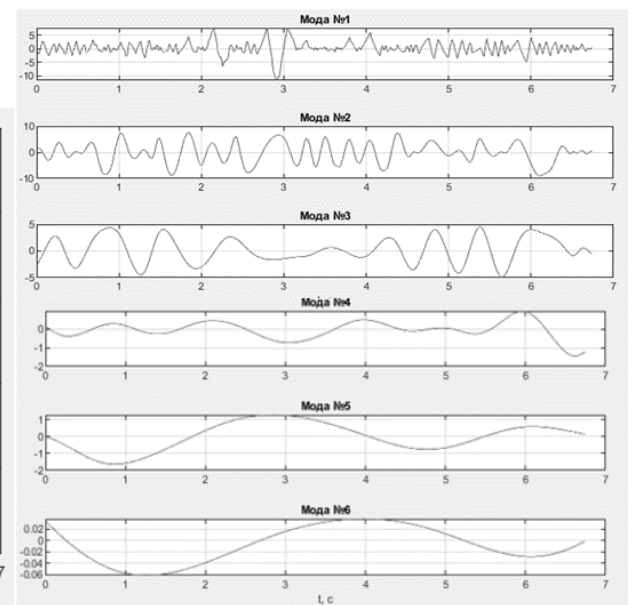


(б)

Рисунок 3.14 – Приклад декомпозиції (б) однієї з реалізацій (а) прогинів в одній точці МС на моди Г-Х при першому виді динамічного навантаження



(a)



(б)

Рисунок 3.15 – Приклад декомпозиції (б) однієї з реалізацій (а) прогинів в одній точці МС на моди Г-Х при другому виді динамічного навантаження

При розкладанні реалізацій прогинів кількість мод складала 4-6. В модах з номером більше трьох стрибки, як правило, не виявлялися. Вони спостерігалися на обох рисунках у всіх трьох перших модах. Подібні стрибки можна спостерігати на всіх реалізаціях прогинів для різних експериментів. У першій моді на рис. 3.14 і рис 3.15 може існувати не тільки один стрибок амплітуди прогинів, який обумовлений дефектами МС, але й стрибок, який викликаний іншими причинами. Останній можна ідентифікувати як такий, що збільшує ймовірність хибної тривоги. Позбавитися від хибних стрибків амплітуди можна наступними методами:

- 1) перевіркою наявності стрибків у перших двох чи навіть трьох модах Г-Х в один і той же момент часу;
- 2) використанням методу усереднення шумового розподілу прогинів;
- 3) комплексним застосуванням інших методів виявлення прогинів, які ґрунтуються на різноманітних фізичних принципах.

Таким чином, запропонований метод ґрунтується на переході від одноканальної до багатоканальної системи шляхом розкладання реалізації процесу прогину МС на моди Г-Х. В кожному каналі здійснюється обробка однієї з мод Г-Х. Для прийняття рішення про стан МС, як, правило, достатньо трьох мод. У випадку, коли, наприклад, якась з перших трьох мод виявляється нестационарною, то її також можна розкласти таким же чином. Моделювання показує, що подвійне розкладання гарантує стаціонарність досліджуваних процесів по модам.

Подібний аналіз можна зробити для просторового розподілу прогину. У першій моді може бути декілька стрибків у випадку, коли МС має декілька дефектів в точках контролю. З рис. 3.14 і рис. 3.15 випливає, що найбільш ефективним критерієм для виявлення дефекту МС є діапазон  $\Delta u$  значень прогинів вздовж вертикальної координати розподілу  $\xi(t)$  в першій та другій модах перетворення Гільберта-Хуанга. Оскільки значення параметрів прогину в першій моді можуть бути від'ємними, то  $\Delta u$  визначається, як максимальне значення різниці між позитивним і від'ємним значеннями прогину реалізації

випадкового процесу. На рис. 3.16 показані закони розподілу  $\Delta u$  для фону для перших трьох мод. З рис. 3.16 випливає, що дисперсія флуктуацій прогинів для третьої моди значно більша, ніж для першої та другої мод.

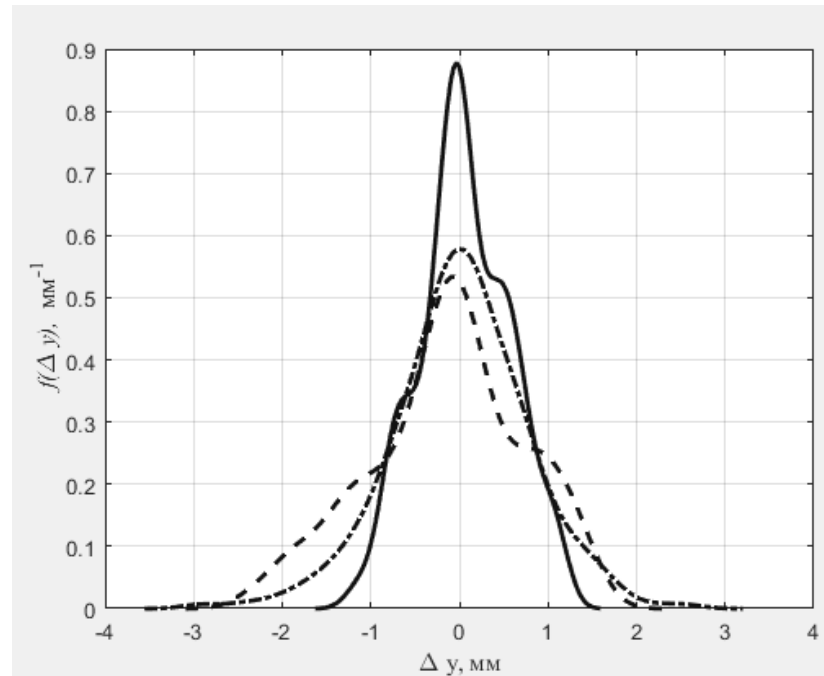


Рисунок 3.16 – Графік розподілу щільності ймовірності прогинів у вибраній точці МС для першої (суцільна лінія), другої (штрихова лінія) та третьої (штрих пунктирна лінія) мод

У якості критерія виявлення дефекту МС в дисертації вибрано поріг, перевищення якого означає, що МС має дефект у вибраній точці вимірювання. У випадках, коли випадковий процес має велику дисперсію, проста флуктуація може бути переплутана з дефектом МС. Дане явище називається хибним виявленням дефекту. Вибране значення порогового рівня дуже сильно впливає на ймовірність правильного виявлення дефекту. Дані значення можуть значно відрізнитися один від одного залежно від окремого виду МС. Відповідно до статистичного критерію Граббса [59] при рівні значущості 0.01 перевищення порогу прогинів означає, що є стрибок, який обумовлений невідомим дефектом МС.

Для визначення ймовірності виявлення дефекту  $D$  та хибної тривоги  $F$  встановлюється поріг стрибка  $\Delta y_0$  для прийняття рішення. У цьому випадку бажано використовувати формули (3.14)-(3.15), що є загальноприйнятими в математичній статистиці, а також в радіолокації [60]:

$$D = \int_{\Delta y_0}^{\infty} W_{c\phi}(\Delta y) d\Delta y, \quad (3.14)$$

$$F = \int_{\Delta y_0}^{\infty} W_{\phi}(\Delta y) d\Delta y, \quad (3.15)$$

де  $W_{\phi}(\Delta y)$  – закон розподілу прогинів при відсутності стрибків (фон);

$W_{c\phi}(\Delta y)$  – закон розподілу прогинів разом зі стрибками і фоном.

Для різних значень ймовірності хибної тривоги  $F$  криві ймовірності виявлення дефекту МС представлені на рис. 3.17. Вздовж горизонтальної координати відкладається відношення  $q$  середнього значення прогинів (стрибки прогину плюс фон)  $\Delta y_0$  до середнього значення модулю фону. Суцільна лінія відповідає  $F = 0.01$ , пунктирна лінія –  $F = 0.05$  і штрихпунктирна лінія –  $F = 0.1$ . Можливе забезпечення необхідних значень ймовірності виявлення дефекту МС  $D$  та хибної тривоги  $F$  при виборі порогового рівня  $\Delta y_0$  для певного типу фону. Ось чому проблема налаштування адаптивного порогу  $\Delta y_0$  є важливою та актуальною.

З рис. 3.17 можна зробити висновок, що для отримання однакових значень ймовірності виявлення дефектів потрібні невисокі відношення  $q$  середнього значення прогинів (стрибки плюс фон) до середнього значення фону. В залежності від типу мосту воно складає приблизно 1.1 ... 1.8.

Отримані криві виявлення стосуються чітко визначених ситуацій і їх узагальнення дає практичні рекомендації. Зрозуміло, що для кожного фону криві виявлення дефектів будуть різними, але використання даного способу збільшує ймовірність виявлення дефектів у багатьох випадках. Можливість забезпечення заданого рівня ймовірності виявлення дефекту МС при

фіксованому рівні ймовірності хибної тривоги при прийомі нестационарних сигналів є головною перевагою даного способу.

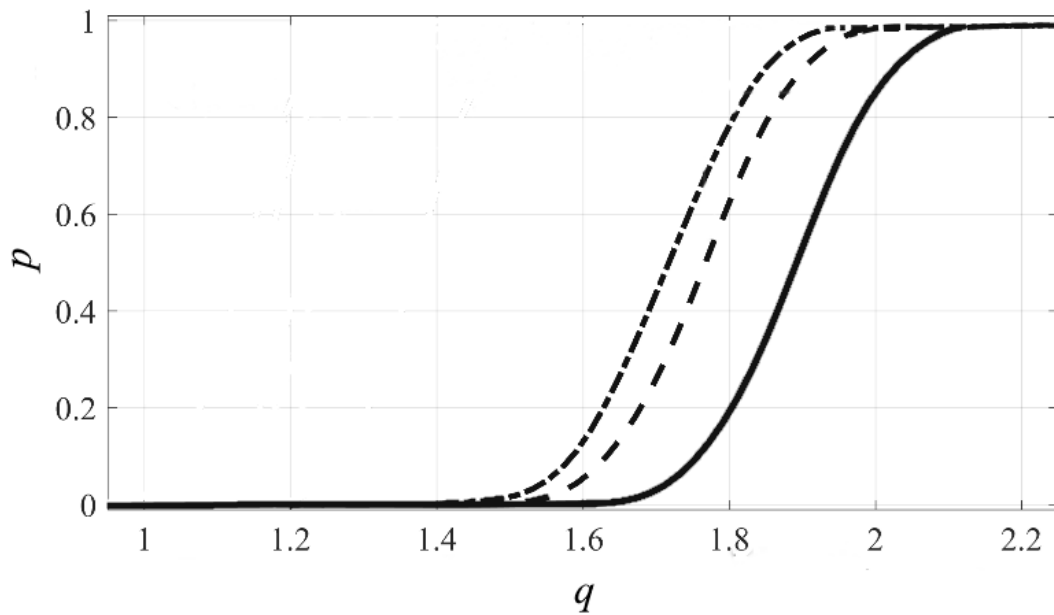


Рисунок 3.17 – Криві ймовірності виявлення дефекту МС при різних значеннях ймовірності хибної тривоги  $F$ :  $F = 0.01$  – суцільна лінія;  $F = 0.05$  – пунктирна лінія;  $F = 0.1$  – штрих-пунктирна лінія

У випадку, коли прогин є достатньо великим за амплітудою і значно відрізняється від фонових значень, ймовірність визначення такого дефекту наближається до «1». У випадку, коли відсутні відмінності між прогинами (які обумовлені дефектом та типовими значеннями прогинів) ймовірність виявлення дефекту МС наближається до нуля. У даному випадку повинні бути використані методи виявлення дефектів, що ґрунтуються на інших фізичних принципах. Автором було зроблено висновок, що в більшості випадків досягається належна ефективність даного способу, тобто задана ймовірність виявлення дефекту МС при незмінній ймовірності хибної тривоги.

Аналогічний підхід був використаний в четвертому розділі при виявленні наземних орієнтирів для автономних мобільних роботів [61].

Для даної ІТ автором побудовано графічний інтерфейс користувача (рис. 3.18), який реалізує наступні задачі:

1. Розкладає вибраний користувачем початковий сигнал (реалізацію нестационарного процесу) на моди і виводить перші три моди на екран.
2. Оцінює стаціонарність перших трьох мод.

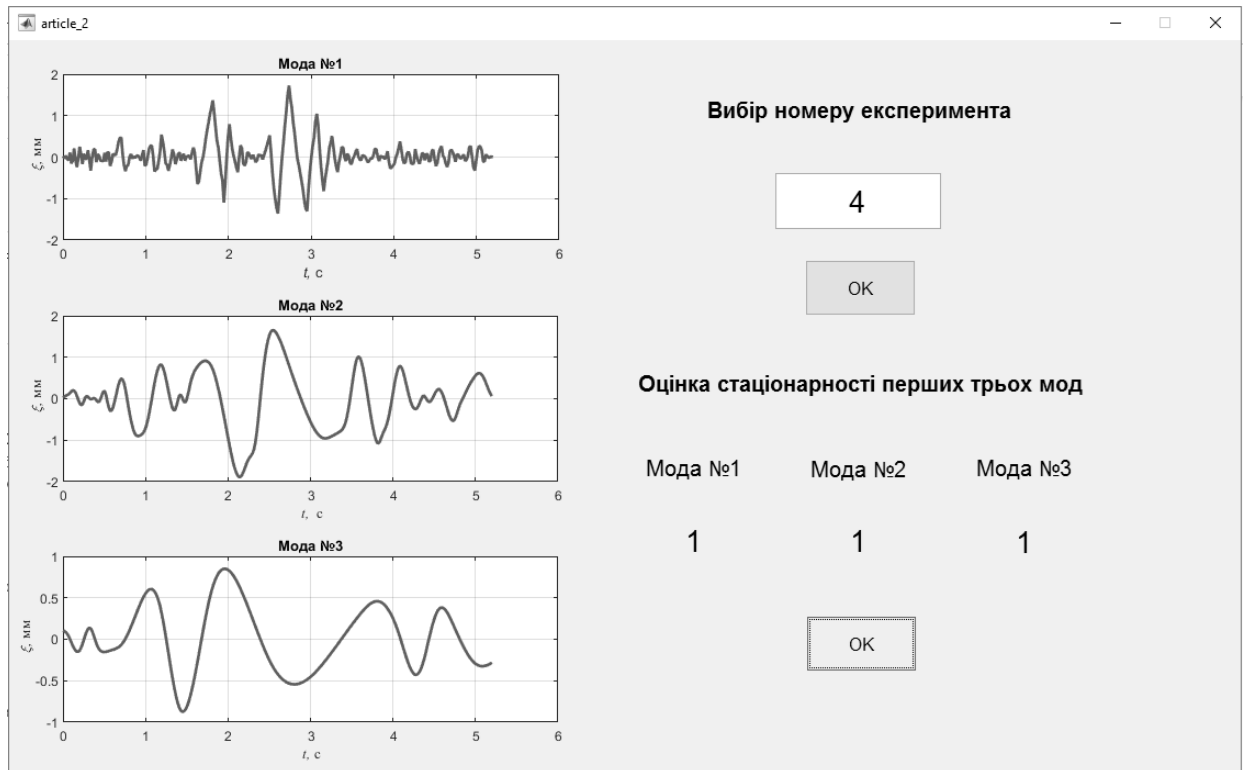


Рисунок 3.18 – Графічний інтерфейс користувача для оцінки стаціонарності перших трьох мод нестационарного процесу

Ліворуч розміщуються графіки перших трьох мод для реалізації нестационарного процесу. У якості параметру, що досліджувався, вибрано прогин мосту. Праворуч знаходиться поле для введення користувачем номеру експерименту, статистичні дані для якого отримано раніше. Внизу розташовані три поля, які показують булеву змінну «1» чи «0» (при натисканні кнопки «ОК»), що свідчить про стаціонарність чи нестационарність певної моди відповідно.

Отже, в підрозділі 3.4 приведено метод, модель та ІТ прийняття рішень про стан МС в умовах нестационарних входних впливів, що зводиться до розкладання реалізацій нестационарного процесу на моди Гільберта-Хуанга. У випадку наявності таких процесів, що виникали при виконанні

експериментальних досліджень фізичної моделі МС, кількість мод становила близько шести, більшість з яких задовольняла критеріям стаціонарності. Хоча деякі перші моди і залишались нестаціонарними, повторне застосування до них перетворення Гільберта-Хуанга робила їх стаціонарними. Основною проблемою методу можна вважати збільшення числа каналів обробки інформації, але виключення нестаціонарності дає можливість застосування багатьох відомих методів без обмежень в кожному каналі. Прийняття рішення щодо стану технічного об'єкту здійснюється на основі відомих статистичних критеріїв по першим трьом модам Гільберта-Хуанга. Отже, в підрозділі набула подальшого розвитку ІТ прийняття рішення про стан мостових споруд (рис. 3.19), яка на відміну від відомих враховує нестаціонарність вхідних процесів прогинів, що забезпечує стабільність інформації для прийняття рішення. Це становить **четвертий** пункт наукової новизни.



Рисунок 3.19 – Схема ІТ прийняття рішень про стан МС при обробленні нестаціонарних випадкових процесів прогинів (нотація IDEF0)

### 3.5 Модель та метод визначення сталості інформації при дистанційному вимірюванні прогинів нижньої частини мостової споруди

На сьогоднішній день ВІ, яку отримують від різних технічних об'єктів, як правило, є цінною для аналізу їх стану. У більшості випадків вхідні і вихідні процеси для МС описуються нестационарними процесами, що породжують несталу інформацію. В дисертації запропоновано метод та модель визначення чисельного показника, що описує сталість інформації в умовах нестационарності процесів прогинів МС. Інформація про прогини знімається з виходу системи дистанційного визначення прогинів нижньої частини МС.

Технічний стан МС може бути оцінений за значенням коефіцієнту динамічності [19], який визначається, як відношення динамічного та статичного прогинів нижньої частини МС в деякій одній точці споруди. Оцінка технічного стану МС є дуже складною процедурою у випадку оброблення нестационарних процесів прогинів. Найкращі умови для оцінки стану МС досягаються при сталій інформації. Тому для оцінки сталості в дисертації створена модель сталості інформації. Подібні моделі існують в різних галузях, наприклад, у [62] та [63] у сфері соціально-економічних процесів, де досліджується аспекти стійкості в управлінні інформаційними технологіями.

В [64] розглядається стійка інформація, що складається з двох частин: інформації для сталого розвитку та розвитку стійкої інформації. Згідно з [65] стійкість означає здатність зберігати і виявляти свої характеристики та властивості протягом тривалого періоду часу. Опишемо метод визначення сталості інформації.

Інформація визначається через ентропію у загальному випадку за формулою [4]:

$$H = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log_2 p(x) dx, \quad (3.16)$$

де  $p(x)$  – закон розподілу (щільність ймовірностей) неперервної величини  $x$ .



Різницю між апіорною та апостеріорною ентропіями можна визначати, як кількість інформації  $I$ . Нехай у результаті вимірювань параметру  $x$  було отримано сукупність сигналів, що характеризують випадковий процес прогинів МС  $\xi(t)$ . Статистична обробка проходить у більшості випадів на інтервалі стаціонарності. У випадку нестаціонарного процесу існує можливість створити гістограму для  $x$  і потім апроксимувати функцією  $p_{ns}(x)$  із деякою довірчою ймовірністю. Для стаціонарного процесу доречно показник сталості  $S$  прирівняти до «1». У випадку порушення стаціонарності цей показник зменшує своє значення аж до «0». Відповідно з вищезгаданим кількісний показник сталості інформації можна вирахувати за формулою

$$S = 1 - \frac{\Delta I}{I}, \quad (3.17)$$

де  $I$  – кількість інформації для нестаціонарного випадку;

$\Delta I$  – максимальна зміна кількості інформації  $I$  в нестаціонарних умовах.

Будемо вважати, що  $\Delta I < I$ , тому що в іншому випадку втрачається фізичний зміст сталості інформації  $S$ . Якщо найбільше значення показника сталості інформації  $S$  досягається при  $\Delta I=0$ , то  $S=1$ . В дисертації запропонована формула (3.18), за допомогою якої можна обчислити показник сталості інформації при раніше визначених щільності ймовірностей  $p_s(x)$  прогину  $x$  в стаціонарному випадку і щільності ймовірностей  $p_{ns}(x)$  прогину  $x$  у нестаціонарному випадку.

$$S = 1 - \frac{\Delta I}{I} = 1 - \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p_{ns}(x) \log_2 p_{ns}(x) dx - \int_{-\infty}^{\infty} p_s(x) \log_2 p_s(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} p_{ns}(x) \log_2 p_{ns}(x) dx} \right| \quad (3.18)$$

Отже, формула (3.18) дозволяє оцінити сталість нестационарних процесів відносно опорного стаціонарного. Показник сталості інформації залежить від різноманітних законів розподілу прогинів стаціонарних та нестационарних процесів. Якщо у якості параметру  $x$  використовується прогин МС, щільність ймовірностей можна описати законом Гаусса. Нестационарні процеси характеризуються змінними статистичними характеристиками, такими як дисперсія та математичне очікування і є випадковими функціями часу. Тренд, що обумовлений часовою залежністю математичного очікування, можна усунути. У даному випадку доцільно дослідити вплив нестационарного процесу на показник сталості інформації  $S$ , коли обидва значення математичного очікування, як для стаціонарного, так і для нестационарного процесів дорівнюють один одному. В дослідженнях середні значення (математичні очікування) прогинів дорівнювали 40 мм. У випадку нестационарного процесу середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  знаходилося у межах 20 мм. На рис. 3.20 показана залежність сталості інформації від  $\sigma$  при невеликих коливаннях прогинів стаціонарного процесу. З рис. 3.20 можна зробити висновок, що при збільшенні  $\sigma$  для нестационарного процесу при малих відхиленнях стаціонарних прогинів значення сталості інформації зменшується на 40 %.

При збільшенні дисперсії коливань прогинів сталість інформації  $S$  зменшується. З цього можна зробити висновок, що дисперсія початкового стаціонарного процесу істотно впливає на сталість інформації. Такий феномен обумовлений тим, що сталість  $S$  процесу із постійними характеристиками на усьому часовому проміжку буде дорівнювати одиниці, оскільки інформаційна стійкість процесів є доволі високою [66].

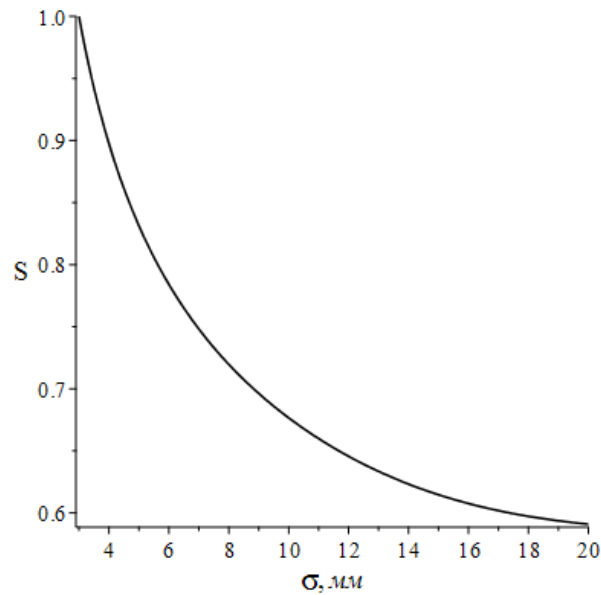


Рисунок 3.20 – Залежність сталості інформації від  $\sigma$  прогину МС при невеликих відхиленнях стаціонарних прогинів

Тому модель оцінки сталості інформації було розглянуто із перспективи її застосування для оцінки стану мостових споруд, а не з перспективи її існування. Сталість самих алгоритмів ІС автором в дисертації не розглядалась.

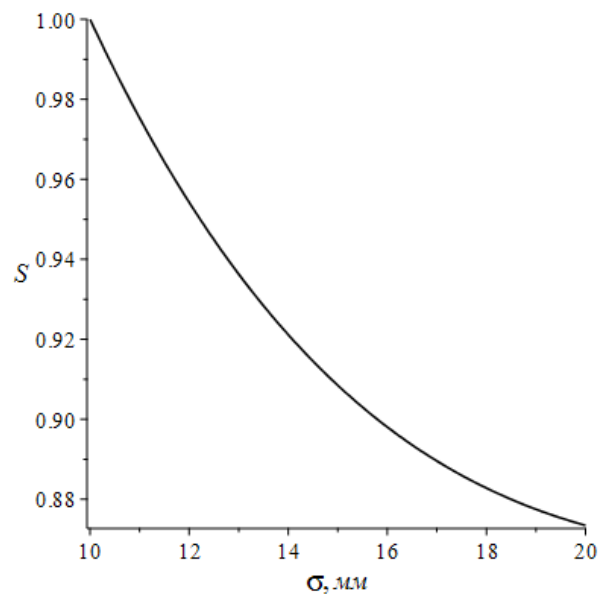


Рисунок 3.21 – Залежність сталості інформації від  $\sigma$  прогину при великих флуктуаціях стаціонарних прогинів

У випадку, коли  $S$  є невисокою, запропоновано розкладання реалізацій нестационарних процесів на моди Г-Х. Даний метод був описаний у попередніх підрозділах. Після застосування даного методу  $S$  істотно зростає, але тут йде порівняння не з реалізацією стаціонарного процесу, а з реалізацією моди даного процесу.

Для того щоб оцінити сталість інформації  $S$ , автором було створено метод (рис. 3.22), який ґрунтується на наступних етапах:

- 1) визначаються параметри стаціонарного процесу, а саме, дисперсії;
- 2) обчислюється щільність ймовірностей прогинів для стаціонарного і нестационарного процесів (у випадку достатнього об'єму вибірки);
- 3) розраховується кількість інформації джерела повідомлень через ентропію за формулою (3.16);
- 4) оцінюється сталість інформації (формула (3.18));
- 5) у випадку, коли було отримано низьке значення  $S$ , даний метод використовується для відповідних мод Г-Х.

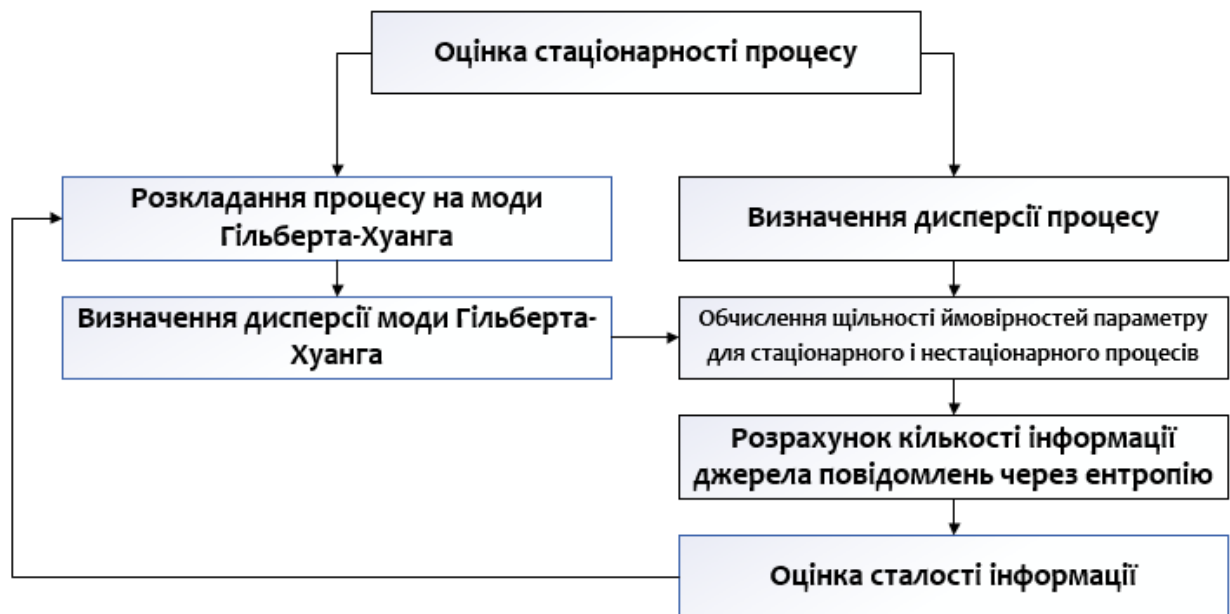


Рисунок 3.22 – Структурна схема методу оцінки сталості інформації про прогини МС

Для даного методу було створено графічний інтерфейс, що показаний на рис. 3.23 на мові програмування C++. Цей інтерфейс дозволяє вирахувати показник сталості інформації  $S$  згідно формули (3.18). Праворуч можна побачити місце для введення користувачем номеру експерименту, що потребує аналізу. Крива щільності розподілу прогинів МС за результатами статистичної обробки багатьох реалізацій стаціонарного та нестаціонарного процесів розміщений ліворуч. У нижній частині графіку при натисканні кнопки «Вибрати номер експ» виводиться чисельне значення показника сталості інформації  $S$ .

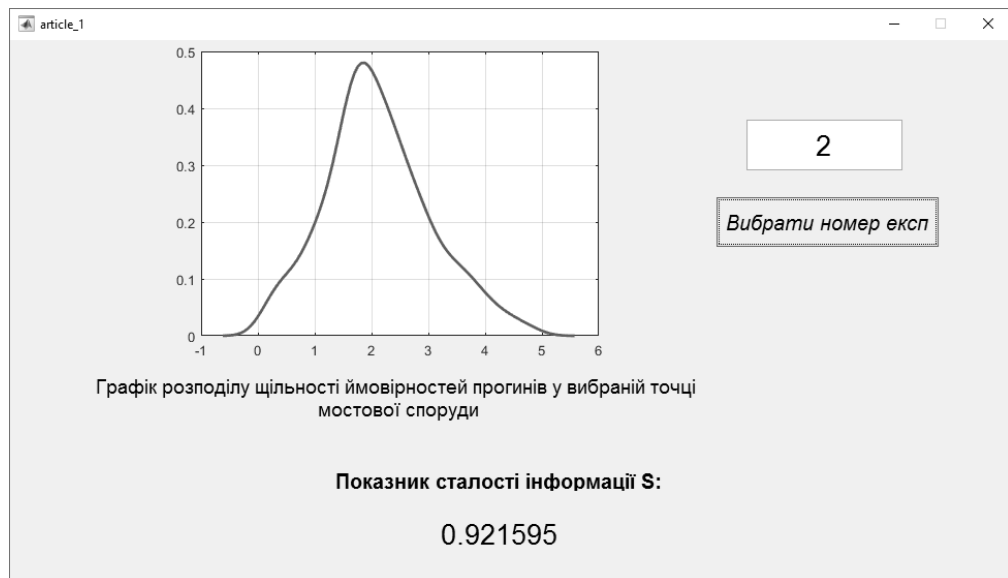


Рисунок 3.23 – Графічний інтерфейс користувача для оцінки сталості інформації

Аналіз результатів моделювання показує, що з урахуванням апріорних стаціонарних даних кількісне значення показника сталості інформації  $S$  для МС коливалося у межах від 0.9 до 0.98. Для прийняття рішення щодо сталості інформації необхідно встановити поріг сталості, наприклад, 0,9. Його рівень залежить від типу мостів та багатьох інших чинників і впливає на показники безпеки експлуатації МС, оскільки в умовах високих значень сталості інформації випадковий процес прогинів наближається до стаціонарного зі стабільними законами розподілу цих прогинів, що забезпечує високу якість

прийнятих безпекових рішень. Детально питання вибору чисельних значень порогу в роботі не розглядалось, а основна увага приділена моделі і методу визначення показника сталості інформації в умовах нестаціонарності вхідних і вихідних процесів.

Отже, в підрозділі 3.5 удосконалено модель та метод оцінювання сталості інформації, що отримана від нестаціонарних процесів, відносно опорного стаціонарного процесу, яка відрізняється обробленням інформації про стаціонарні моди Гільберта-Хуанга, що дозволяє підвищити якість прийняття автоматизованого рішення про стан МС. Це складає **другий** пункт наукової новизни.

### 3.6 Модель та метод визначення цінності вимірювальної інформації в інтересах безпеки мостових споруд

В багатьох розвинутих країнах світу створені системи управління МС, які одночасно виконують моніторинг мостів в інтересах безпеки, а також логістичні функції. На сьогоднішній день основою новітніх систем управління є ІТ, які мають у своєму складі БД та результати вимірювань певних параметрів.

Виявляється, що динамічні прогини мостових споруд містять багато діагностичної інформації про стан МС. Виникає необхідність у виявленні закономірностей між характером поведінки прогинів у просторі та часі і станом конкретної МС. Якщо в мостовій конструкції є, наприклад, тріщини або розрив арматури в бетоні, то характер коливань елементів конструкції зміниться, але загальних рекомендацій для всіх мостів у більшості випадків дати важко. Звідси, виникає необхідність побудови бази даних характерних параметрів коливань МС і відслідковування цієї бази в процесі експлуатації, що забезпечить в перспективі проведення цілеспрямованої діагностики мостів.

Автором було розроблено метод дистанційного визначення прогинів МС, які змінюються з плином часу, тобто динамічних прогинів [40]. Цей метод

можна використовувати для вже існуючих МС, які не обладнані новітніми ВІС. Для МС, які знаходяться на стадіях будівництва чи проектування, планують встановлення на мости сучасних датчиків, які обладнані елементами ВІС або інтелектуальними ВІС. Моделювання мостової інтегрованої інформації на сьогоднішній момент відбувається на спільних платформах [41]. ВІС отримують велику кількість даних, яку потрібно обробляти в реальному масштабі часу і саме це створює необхідність застосування новітніх алгоритмів обробки даних. Зрозуміло, що під час вимірювань виникають різноманітні похибки, які впливають на отримані дані і знижують достовірність отриманої інформації. Тому є гостра необхідність виділення саме цінної інформації. В [67] обґрунтовані різні підходи до визначення цінності вимірювальної інформації. Економічні аспекти цінності інформації розглянуті в [68] і цінність інформації визначається тут як одна з найважливіших складових безпеки функціонування МС. «Максимальна користь, яку інформації забезпечує, зводиться до мінімізації середніх втрат  $R_0(H_x)$ » – саме так описується цінність інформації (3.19) у праці [69].

$$H_x = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log_2 p(x) dx \quad (3.19)$$

$H_x$  (невизначеність) до вимірювання прогину  $x$  залежить від виду априорного розподілу щільності ймовірностей  $p_{pr}(x)$ , а після його вимірювання – апостеріорним розподілом  $p_{ps}(x)$ . Наприклад, пунктирною лінією на рис. 3.24 показано нормальний розподіл  $p_{pr}(x)$ , а суцільною лінією – такий же розподіл для  $p_{ps}(x)$ .

Після отримання результатів вимірювання отримується деяка інформація  $I$  і у цьому випадку мінімальні середні втрати визначаються за формулою (3.20) [69]

$$\Delta R_0 = R_0(H_x) - R_0(H_x - I). \quad (3.20)$$

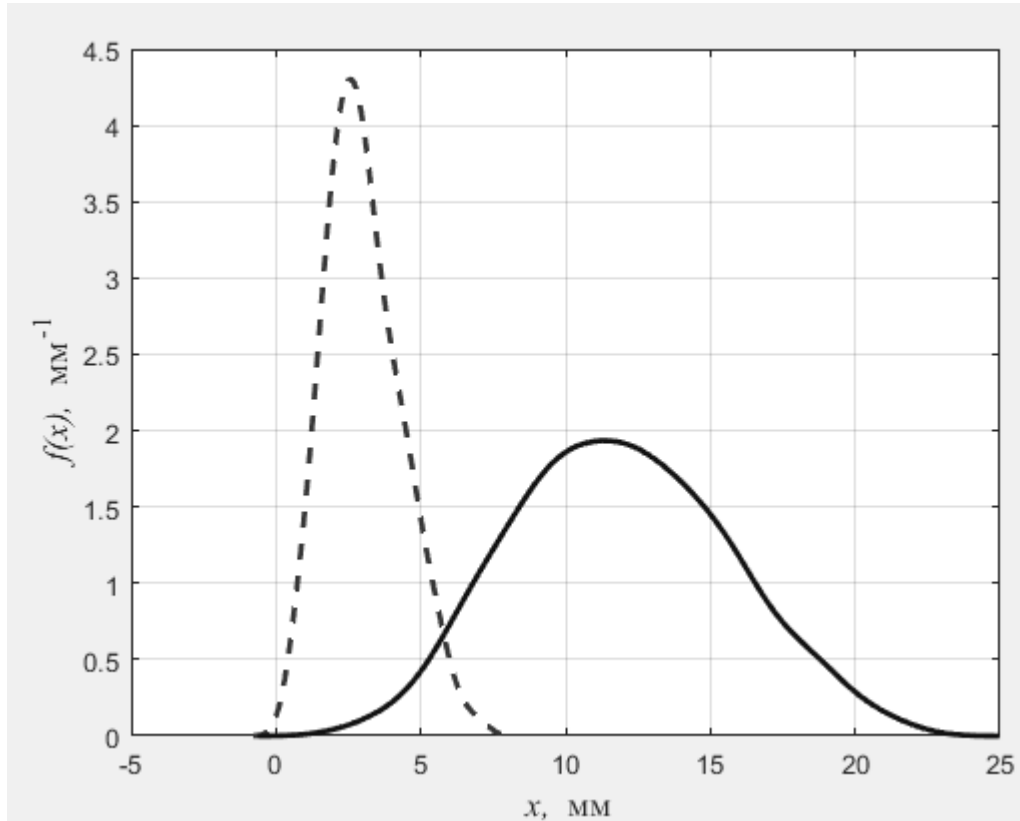


Рисунок 3.24 – Приклад апіорного (суцільна крива) та апостеріорного (штрихова крива) розподілів щільності ймовірностей прогинів  $x$  МС

Взагалі оцінка (3.20) є дуже складною задачею, оскільки використовуються термодинамічні потенціали. Згідно [69]: «залежність мінімального середнього штрафу  $R_0(H_x)$  є близькою до квадратичної залежності» типу

$$R_0(H_x) = \mu H_x^2. \quad (3.21)$$

Коефіцієнт  $\mu$  в конкретній задачі має розмірність  $[bit^{-1}]$ . Даний коефіцієнт визначається для зручності розрахунків, бо ми не звертаємо увагу на величину мінімальних середніх втрат  $\Delta R_0$  (згідно [69] – «кількісна міра



цінності інформації»), а звертаємо увагу на заходи максимізації  $\Delta R_0$ . Вибір квадратичної залежності є допустимим, але не визначальним.

Наприклад, можна використовувати інші степені для знаходження  $R_0(H_x)$ :

$$R_0(H_x) = H_x \quad (3.22)$$

Тому вважаємо, що до і після вимірювань мінімальні середні втрати  $\Delta R_0$  дорівнюють різниці невизначеностей  $H_x$ . Дані невизначеності можна позначити, як  $H_x^{ps}$  і  $H_x^{pr}$ . За формулами (3.19), (3.20) та (3.21)

$$\Delta R_0 = H_x^{ps} - H_x^{pr} = - \int_{-\infty}^{\infty} p_{ps}(x) \cdot \log_2 p_{ps}(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} p_{pr}(x) \cdot \log_2 p_{pr}(x) dx. \quad (3.23)$$

Звідси випливає, що  $\Delta R_0$  не залежить від  $\mu$  (математичного очікування) прогинів  $x$  для розподілів  $p_{pr}(x)$  та  $p_{ps}(x)$ , але спостерігається залежність від  $\sigma^2$  (дисперсії) прогинів  $x$ . У випадку, коли вдається зменшити  $\sigma^2$  прогину  $x$  (що відповідає апіорному розподілу), знаходимо певну інформацію щодо цього прогину. Мета ІТ з точки зору безпеки функціонування МС є виявлення аномального режиму роботи МС. Якщо за допомогою отримання інформації ми можемо сказати, що МС працює у аномальному режимі – саме в тому випадку інформація вважається цінною.

Нормальний режим роботи  $D_1$  МС у визначеній точці описується розподілом щільності ймовірностей прогинів  $p(x/D_1)$ , а аномальний  $D_2$  – розподілом  $p(x/D_2)$  (рис. 3.25). Такі розподіли наближені до гауссівських і отримані на основі експериментальних досліджень.

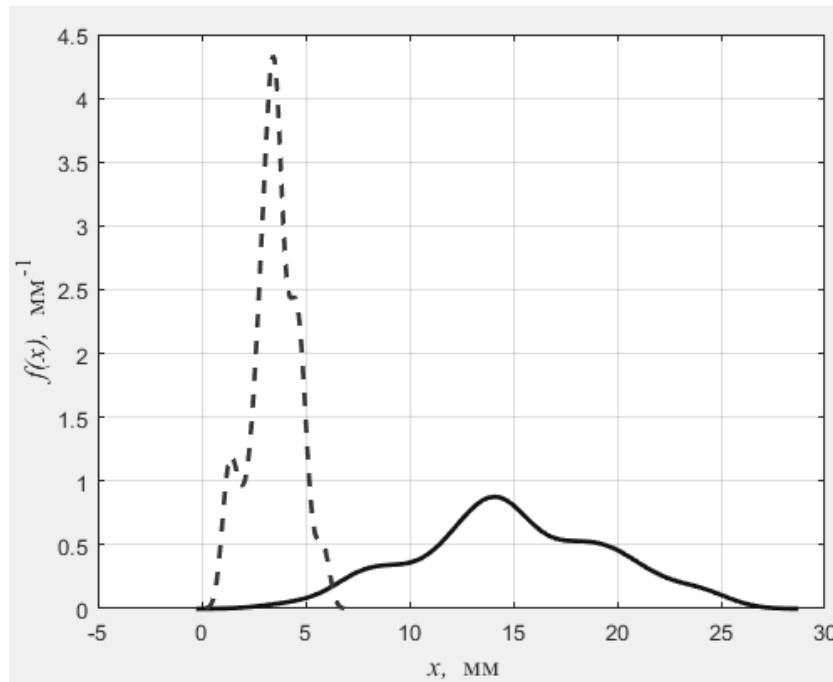


Рисунок 3.25 – Щільність розподілу прогину МС у визначеній точці при нормальному  $p(x/D_1)$  (штрихова лінія) та аномальному  $p(x/D_2)$  (суцільна лінія) режимах роботи фізичної моделі мосту

При обробці експериментальних даних або моделювання певного параметра МС можна отримати графіки розподілу щільності ймовірностей прогинів. У [70] показані приклади моделювання. Ширина кривих на визначеному рівні збільшується при збільшенні похибки вимірювання.

Побудова кривих щільності розподілу виконується наступним чином:

- 1) побудова гістограм на основі статистичного моделювання;
- 2) їх апроксимація нормальним розподілом.

Щоб прийняти певні рішення, наприклад, чи становить МС небезпеку для автотранспорту або пішоходів потрібно отримати інформацію, на основі якої вже робити висновки. Нехай можливі рішення є гіпотезами [71]  $H_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ): індекс  $i$  – прийняте рішення, індекс  $j$  – реальний стан МС. Тоді гіпотези мають наступний зміст:

$H_{11}$  – МС згідно значення прогину  $x$  у визначеній точці є справною, працює в нормальному режимі і приймається рішення про справність об'єкту;

$H_{22}$  – МС згідно значення прогину  $x$  є несправною (має дефекти) або вимушена під дією зовнішніх факторів працювати в аномальному режимі і система приймає рішення про аномальний режим роботи;

$H_{12}$  – МС працює в аномальному режимі, але ВІС цього не помічає і приймається рішення про нормальний режим її роботи (пропуск аномального режиму);

$H_{21}$  – МС є справною, працює в нормальному режимі, але приймається рішення про її несправність або аномальний режим роботи (хибна тривога).

Щоб оцінити ймовірність даних ситуацій визначається певний поріг прийняття рішення  $x_0$ . Ймовірності неправильних рішень (3.24) та (3.25) [70]

$$P(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(x > x_0 / D_1) = P_1 \int_{x_0}^{\infty} p(x / D_1) dx, \quad (3.24)$$

$$P(H_{12}) = P(D_2) \cdot P(x < x_0 / D_2) = P_2 \int_{-\infty}^{x_0} p(x / D_2) dx, \quad (3.25)$$

де  $P_1 = P(D_1)$ ,  $P_2 = P(D_2)$  – апіорні ймовірності діагнозів  $D_1$  та  $D_2$ .

У випадку, коли ймовірність хибної тривоги  $P(H_{21})$  є дуже високою, а МС працює у нормальних умовах, прийняття рішення щодо виведення з експлуатації МС принесе великі збитки. Але у випадку, коли МС працює в аномальному режимі, а приймається рішення щодо його справності і нормальної роботи (пропуск дефекту з ймовірністю  $P(H_{12})$ ), наслідки можуть бути дуже трагічними. Зокрема, можливі людські втрати, техногенні катастрофи тощо. Тому в ідеальному випадку дані ймовірності повинні бути мінімальними.

У [70] описано розв'язання задач з використанням середнього ризику  $R$  (3.26), де призначається відносна вага хибної тривоги  $C_{21}$  та вага пропуску дефекту  $C_{12}$

$$R(x_0) = C_{21}P_1 \int_{x_0}^{\infty} p(x/D_1)dx + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{x_0} p(x/D_2)dx. \quad (3.26)$$

Наприклад, при  $C_{21} = 0.2$ ,  $C_{12} = 0.8$ , математичних очікуваннях випадкових прогинів для нормального режиму роботи мосту  $x_1 = 10$  мм та аномального –  $x_2 = 20$  мм, відповідних середньоквадратичних відхиленнях прогинів  $\sigma_1 = 3$  мм,  $\sigma_2 = 4$  мм залежність  $R(x_0)$  має вигляд (рис. 3.26).

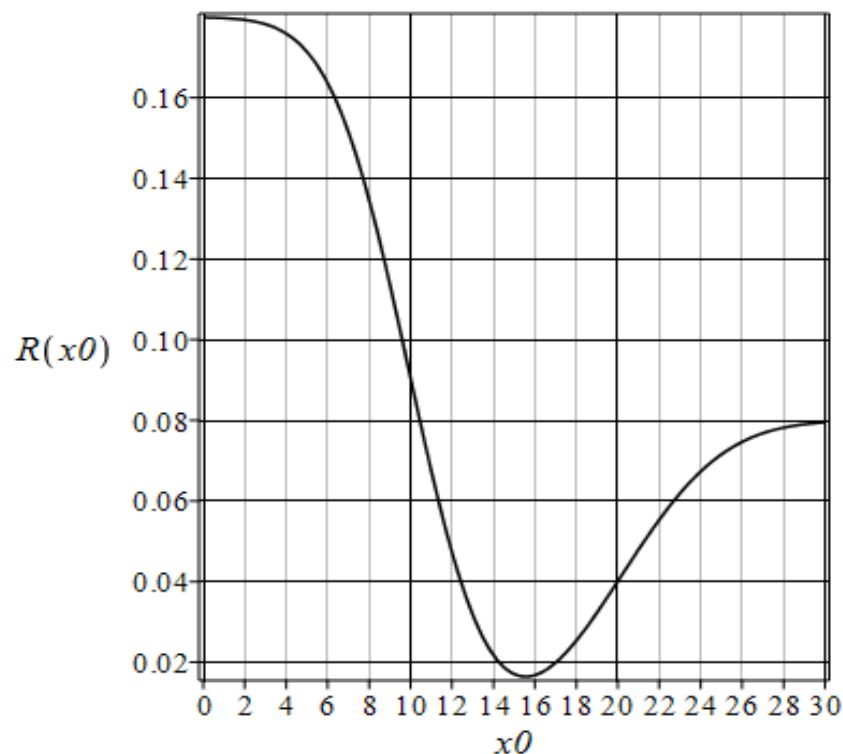


Рисунок 3.26 – Залежність ненормованого середнього ризику від  $x_0$ , при якому приймається рішення про безпеку МС, при  $C_{21} = 0.2$ ,  $C_{12} = 0.8$ ,

$$P_1 = 0.9, P_2 = 0.1$$

Значення  $R$  досягає мінімуму для даного прикладу при  $x_0 \approx 15.5$  мм. Після визначення оптимального порогу  $x_0$  оцінюється ймовірність правильного виявлення нормального режиму роботи МС (3.27) за результатами вимірювання

$$P(H_{11}) = P(x \leq x_0 / D_1) = \int_{-\infty}^{x_0} p(x / D_1) dx \quad (3.27)$$

або аномального режиму (3.28) за такими же результатами

$$P(H_{22}) = P(x \geq x_0 / D_2) = \int_{x_0}^{\infty} p(x / D_2) dx. \quad (3.28)$$

Цінність інформації визначається за різними формулами [72], зокрема, за (3.29)

$$V = \frac{P_{ps} - p_{apr}}{1 - p_{apr}} = \frac{P(H_{22}) - P(D_2)}{1 - P(D_2)}, \quad (3.29)$$

де  $p_{apr} = P(D_2)$  – ймовірність досягнення мети до отримання інформації;

$P_{ps} = P(H_{22})$  – після її отримання.

На рис. 3.27 показана залежність цінності інформації  $V$  від порогового значення прогину мосту  $x_0$  коли  $p_{apr} = P(D_2) = 0.1$ .

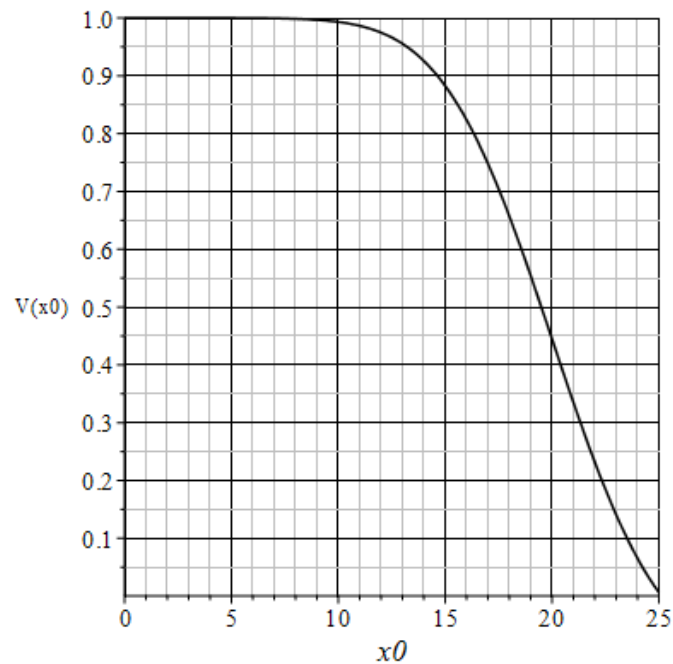


Рисунок 3.27 – Залежність цінності інформації  $V$  від порогового прогину  $x_0$ , при якому приймається рішення про безпеку МС

Максимальна цінність інформації (згідно рис. 3.27) досягається для заданих параметрів при  $x_0 \leq 10$  мм, хоча середній ризик для таких значень  $x_0$  приймає великі значення порівняно з мінімальним (рис. 3.26). Цінність інформації  $V$  не є максимальною  $V \approx 0.85$  при мінімальному значенні середнього ризику, тобто при  $x_0 \approx 15.5$  мм. Тому для забезпечення безпеки при створенні ІТ створюються умови, коли середній ризик  $R(x_0)$  мінімізується і в той же час вибирається найбільш цінна інформація  $V(x_0)$ . Виникає оптимізаційна задача, що має дві цілі (двокритеріальна задача). Вона розв'язується методом аналізу ієрархій, як показано у підрозділі 2.4. Нормовані функції  $R(x_0)$  та  $V(x_0)$  мають протиріччя. Для його усунення замість середнього ризику використовується функція  $1 - R(x_0)$ . У цьому випадку здійснюється максимізація узагальненої функції

$$\Psi(x_0) = \alpha_1(1 - R(x_0)) + \alpha_2 V(x_0), \quad (3.30)$$

де  $\alpha_i (i = 1, 2)$  – вагові коефіцієнти, що нормуються, тобто  $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1$ .

На рис. 3.28 приведено графік узагальненої функції  $\Psi(x_0)$  при вагових коефіцієнтах  $\alpha_1 = 0,75$ ,  $\alpha_2 = 0,25$ .

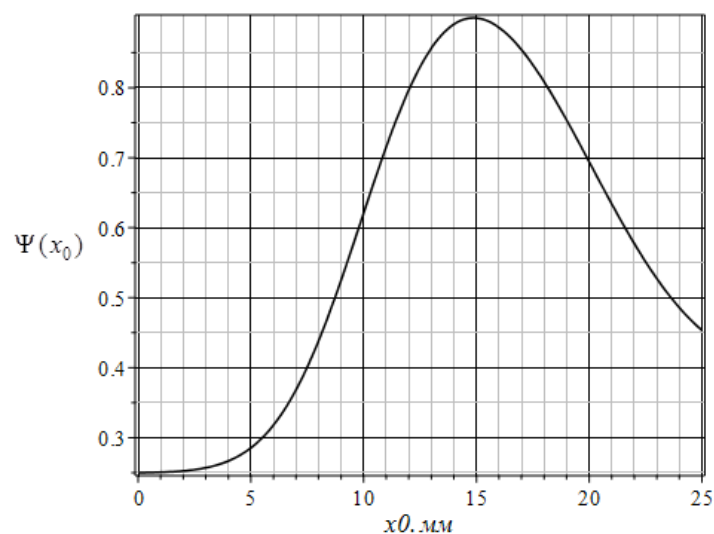


Рисунок 3.28 – Залежність узагальненої функції  $\Psi(x_0)$  від порогового прогину МС

Максимум цієї функції досягається при  $x_0 \approx 14,9$  мм, тобто при менших значеннях, ніж тільки при використанні критерію мінімуму середнього ризику, при якому  $x_0 \approx 15,5$  мм (рис. 3.26). Відносний рівень цінності інформації при такому значенні порогового прогину становить  $V(14,9) \approx 0,9$  (рис. 3.27). Отже,  $x_0 \approx 14,9$  є оптимальним пороговим значенням  $x_{opt}$  прогину мостової конструкції. У будь-якому випадку безпека експлуатації МС є найголовнішим пріоритетом і тоді часто  $\alpha_1 \square \alpha_2$ . Цінність інформації опосередковано також впливає на зазначену безпеку.

Мінімізація середнього ризику  $R(x_0)$  є головною рекомендацією, але при умові що цінність інформації  $V(x_0) \geq V_a$ , де  $V_a$  є допустимим мінімальним значенням цінності інформації. Обґрунтування та визначення значення  $V_a$  є складним завданням. Тип МС, оснащеність датчиками тощо – все це повинно враховуватись при визначенні  $V_a$ . Воно також повинно враховувати ранжування мостів [73]. за різними групами. У проаналізованому випадку,  $V_a = 0.8$  може бути порогом, що задовольняє критерію мінімуму середнього ризику і при якому  $V(x_{opt}) > V_a$ . Подібні дослідження можуть буди застосовані для кожної точки МС, де вимірюється значення прогинів різними методами (контактними чи безконтактними). Сукупність даних точок можна зменшити лише до тих, де значення прогину буде найбільше, що й рекомендується в нормативній літературі.

Недоліком приведеного способу є тільки те, що можливість визначення  $V$  існує тільки для одного параметру МС, який вимірюється. У випадку, коли кількість вимірюваних параметрів дорівнює  $m$ , то мінімальні середні втрати для одного  $i$ -го параметру становлять

$$\Delta R_{0i} = R_0(H_{x_i}) - R_0(H_{x_i} - I_i). \quad (3.31)$$

Кожне значення мінімальних середніх втрат  $\Delta R_{0i}$  можна просумувати, оскільки їх розмірність є однаковою. У такому випадку мінімальні середні втрати всіх параметрів знаходяться за формулою (3.32)

$$\Delta R = \sum_{i=1}^m c_i \cdot \Delta R_{0i}, \quad (3.32)$$

де  $c_i$  – ваговий коефіцієнт, що відноситься до важливості для безпеки ТСО  $i$  –го параметру, причому  $\sum_{i=1}^m c_i = 1$ . Коефіцієнти  $c_i$  повинні призначатись фахівцями експертної групи.

Отже, метод визначення цінності ВІ в інтересах безпеки мостових споруд включає наступні етапи:

- формування апріорної щільності ймовірностей прогинів на основі результатів їх вимірювань в попередніх випробуваннях МС;
- визначення апріорних діагнозів стану МС (справний – несправний) на основі досвіду експлуатації аналогічних мостів;
- оцінка умовної щільності ймовірностей прогинів при наявності і відсутності дефектів МС, що впливають на безпеку споруди;
- визначення з практичних потреб вагових коефіцієнтів  $C_{21}$  та  $C_{12}$ , що характеризують відносну вага хибної тривоги та вагу пропуску дефекту;
- визначення значення прогину МС  $x_0$ , при якому досягається мінімум середнього ризику;
- визначення узагальненої функції  $\Psi(x_0)$ , її максимізація та знаходження оптимального значення прогину  $x_{opt}$ ;
- перевірка значення цінності інформації для оптимального порогового рівня  $x_{opt}$ ; якщо це значення більше значення  $V_a$ , тобто  $V(x_{opt}) > V_a$ , то розв'язання задачі закінчується; якщо  $V < V_a$ , то порогове значення прогину зменшують, але так, щоб значення відносного середнього ризику не перевищувало допустимого значення  $R_a$  для даної МС. В противному разі



рішення задачі визначення порогового прогину для прийнятих значень  $V_a$  і  $R_a$  є неможливим і потрібно або змінювати значення  $V_a$  і  $R_a$ , чи змінювати вагові коефіцієнти  $\alpha_i$ , а може, навіть, виводити МС з експлуатації.

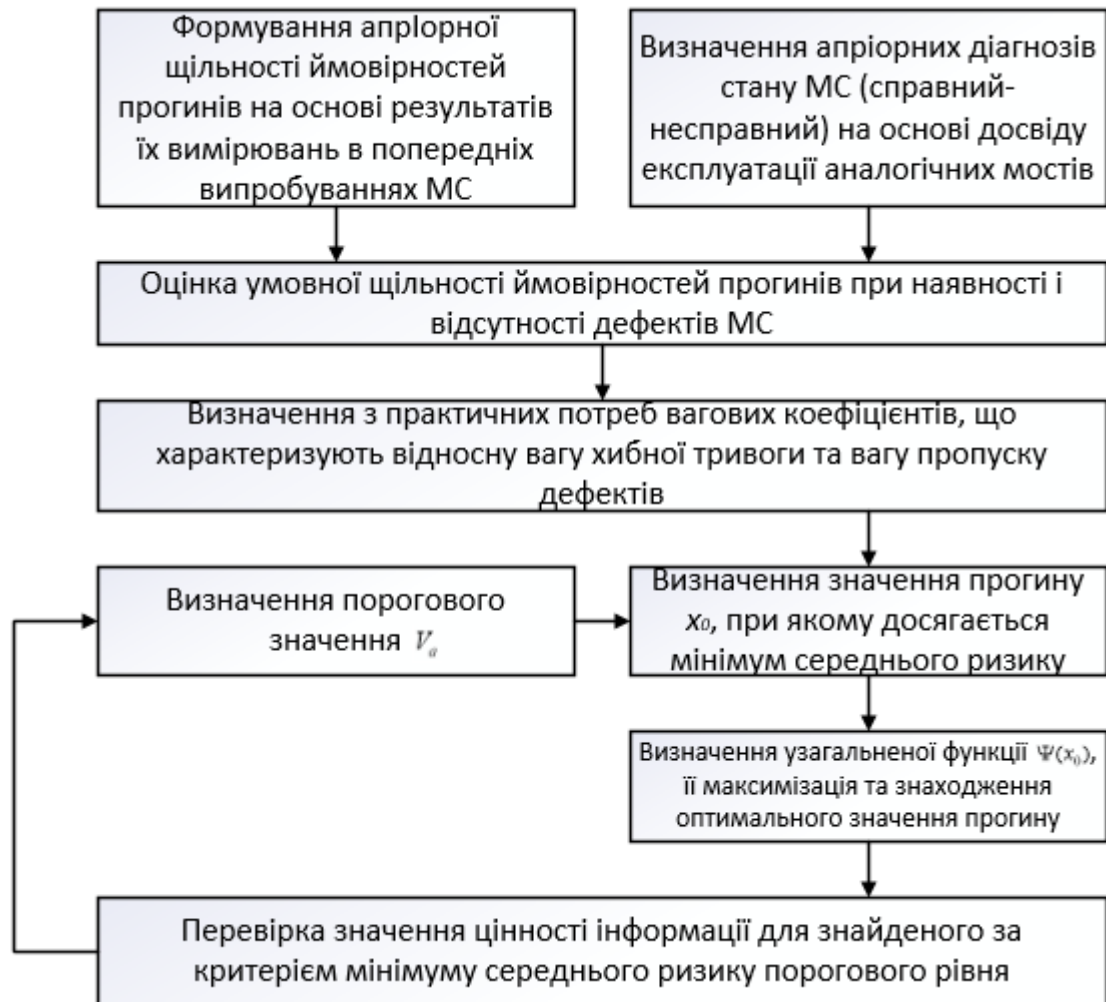


Рисунок 3.29 – Структурна схема методу визначення цінності вимірювальної інформації в інтересах безпеки МС

Для даного методу визначення цінності інформації автором створено графічний інтерфейс користувача (рис. 3.30), який в залежності від вибраного експерименту (експериментальні дані прогину МС у вибраній точці при різних видах динамічного навантаження) буде його графік у верхній частині вікна ліворуч при натисканні кнопки «Вибрати». Коли користувач натискає цю кнопку у лівій частині екрану будеється графік розподілу щільності

ймовірності прогинів, а також у нижній частині екрану розраховується значення цінності інформації  $V$  за формулою (3.29).

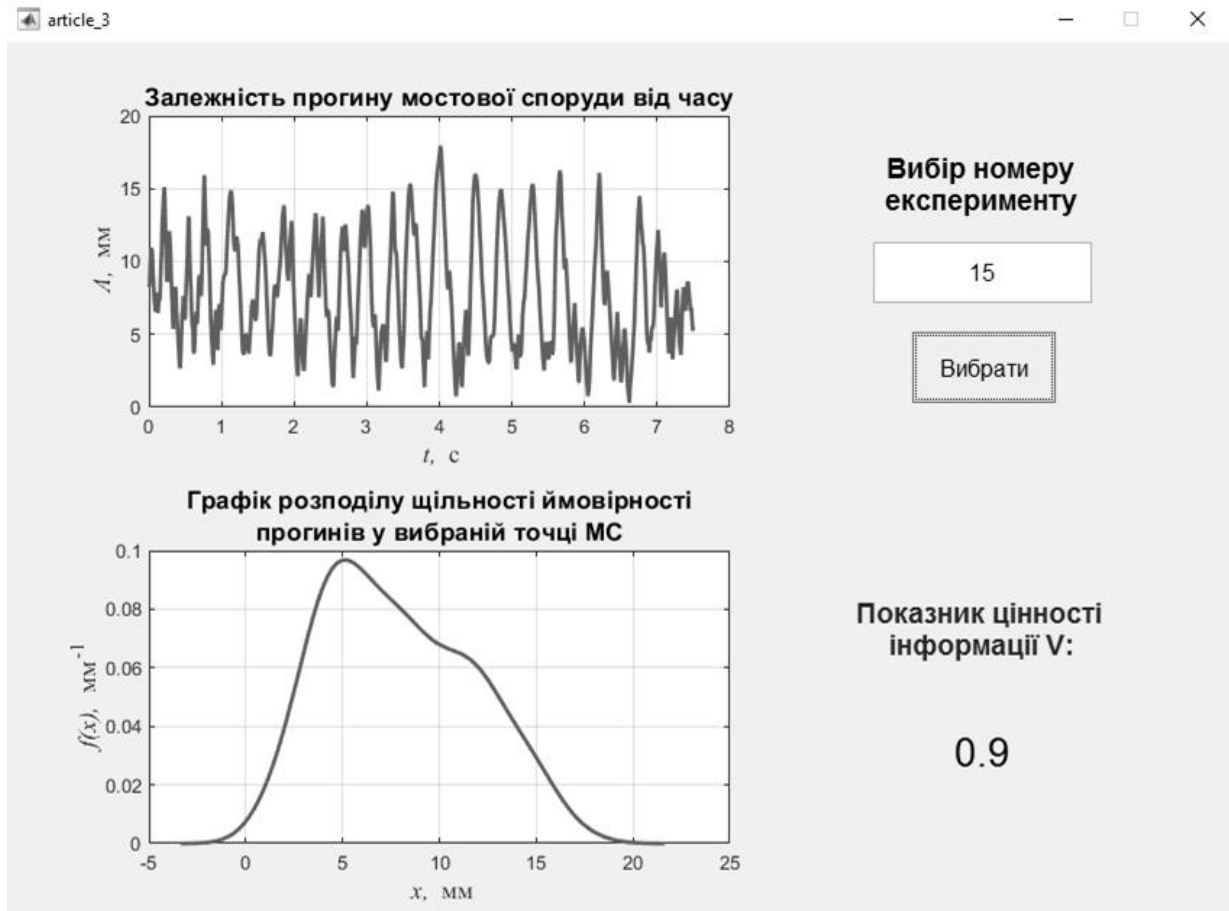


Рисунок 3.30 – Графічний інтерфейс користувача для оцінки цінності інформації

Розроблений метод та модель дозволяє визначити цінність всієї інформації про прогини мосту з одночасним врахуванням показників статистичних рішень (ймовірностей пропуску дефекту мосту та хибної тривоги). Запропоновано використовувати мінімально допустимий рівень цінності інформації. Якщо при пороговому рівні прогину, що визначено при мінімізації ризику, цінність інформації перевищує мінімально допустимий рівень, то це означає, що цінність інформації визначена, хоча вона може бути і не максимальною. Перевага тут віддається безпеці експлуатації мосту, а не вимогам ІТ. Методом аналізу ієрархій в підрозділі визначається оптимальне

порогове значення прогину і при ньому цінність інформації повинна перевищувати вибраний мінімально допустимий рівень. Отже, в підрозділі 3.6 удосконалено модель та метод визначення цінності вимірювальної інформації про прогини мостових споруд, яка на відміну від відомих, враховує показники статистичних рішень щодо безпеки споруд, що дозволяє задовольнити суперечливим вимогам щодо безпеки експлуатації мостової споруди та цінності інформації. Це складає **третій** пункт наукової новизни.

### Висновки до розділу 3

1. Збільшення цифрових та інтелектуальних датчиків на сучасних мостових спорудах, а також розвиток технологій «розумних» мостів потребує створення відповідної інформаційної структури для оцінки технічного стану мостів, яка ґрунтується на моделях і методах, що є повністю придатними для вибраної групи існуючих систем.

2. На старих мостових спорудах доцільно використовувати методи збирання та перетворення інформації, що розроблені в дисертації. Вимірний доплерівський зсув частоти відбитого від поверхні мосту сигналу міні радара малої вартості може бути перетворений віртуальною системою в прогини конструкції споруди, хоча для дистанційного вимірювання прогинів потрібні прилади високої вартості. Ідентифікація віртуальної системи здійснюється розробленим в дисертації методом, сутність якого потребує мінімізації вибраного функціоналу.

3. Вперше розроблено метод пошуку та дистанційного збирання ВІ прогини нижньої поверхні бетонної МС, який на відміну від відомих забезпечує одночасне вимірювання нестационарних прогинів всієї поверхні, що дозволяє підвищити якість і оперативність прийняття рішення про безпеку споруди. Метод припускає попереднього встановлення металевих відбивачів на нижню поверхню споруди, які стають джерелами вторинних електромагнітних хвиль, обробка яких створює інформацію про прогини. При

використанні даного методу точність отриманої інформації склала 90% при використанні рекомендованих параметрів системи.

4. Удосконалено модель та метод оцінювання сталості інформації, що отримана від нестационарних процесів, відносно опорного стаціонарного процесу, яка відрізняється обробленням інформації про стаціонарні моди Гільберта-Хуанга, що дозволяє підвищити якість прийняття автоматичного рішення про стан технічного об'єкту. Це створює умови для відмови від статистичного аналізу нестационарних процесів і переходу до оброблення тільки стаціонарних процесів, інформація від яких є сталою. Після проведених експериментів було отримано показник сталості від 0.86 до 0.98 для різних видів коливань МС.

5. Удосконалено модель та метод визначення цінності ВІ про прогини мостових споруди, яка на відміну від відомих, враховує показники статистичних рішень щодо безпеки споруд, що дозволяє задовольнити суперечливим вимогам щодо безпеки та цінності інформації. Вибір порогових прогинів здійснюється з оптимальним врахуванням цих вимог. Після проведених експериментів було отримано показник цінності інформації, який коливався в межах від  $V = 0.81$  до  $V = 0.95$  у залежності від прикладених до МС динамічних зовнішніх впливів при виборі порогового значення  $V_a = 0.8$ .

## РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

### 4.1 Перспективи впровадження запропонованого методу для контролю технічного стану мостових споруд

В попередніх розділах дисертації отримано рішення складної задачі вибору альтернативи отримання інформації про технічний стан бетонної МС. На відміну від методів, що використовуються в Україні, запропоновані нові моделі, методи та інформаційна технологія контролю МС не в одній точці, а одночасно в багатьох точках. Це дозволяє підвищити ймовірність правильного рішення про стан МС. В технологічно розвинутих країнах світу така задача розв'язується шляхом встановлення великої кількості контактних датчиків на міст. Ці датчики визначають прогин споруди в багатьох точках, але вони мають високу вартість і є дорогими при експлуатації. Крім того, термін їх служби складає декілька років.

Більш дешевими можуть бути п'єзоелектричні фазообертачі, що визначають фазу сигналу, яка безпосередньо зв'язана з прогином [74], [75]. Вони можуть об'єднуватись у складну високоточну вимірювальну інформаційну систему, яка не є дешевою. Оскільки переважна більшість мостових споруд в Україні експлуатуються десятки років, то висока точність вимірювання прогинів мостів не потрібна. Не потрібні також високоточні дистанційні методи вимірювання, що використовуються в окремих розвинутих країнах (США, Корея, Японія, Китай та ін.). Отже, відносні похибки вимірювання, що звичайно складають декілька відсотків і не перевищують 10 % в запропонованому методі (розділ 3), є прийнятними для формування адекватних рішень про стан МС.

Розвиток інтелектуальних ІТ може стимулювати модернізацію запропонованого методу. В таких технологіях в інтелектуальних датчиках, що

розміщуються на мостах і транспортних засобах, буде зосереджена велика кількість інформації про характеристики транспортного засобу (маса, швидкість, координати його розміщення на мосту тощо) та характеристики самої МС (тип, геометричні характеристики, попередні результати вимірювання прогинів тощо). Якщо провести попередні дослідження просторово-часової реакції мосту на імпульсне навантаження (для мостів, прогин яких лінійно залежить від навантаження), то можна отримати просторово-часову функцію (функцію Гріна), яка буде виконувати таку ж роль, яка властива імпульсній характеристиці для лінійних електричних та радіотехнічних кіл [76]. Це означає, що при відомій функції Гріна, яка для навіть однакових споруд буде відрізнятися (математична картка мосту), та відомих характеристиках транспортного засобу інформаційна система, що обслуговує даний міст, зможе за короткий час дати дуже великий обсяг інформації про стан МС. Більш того, вона здатна також забезпечити інформацією відповідні органи, якщо по мосту буде рухатись неідентифікований транспортний засіб. Дослідження, сутність яких щойно описана, поки що ніде в світі не проводились.

В третьому розділі описано метод дистанційного вимірювання прогинів МС і проведено моделювання для лінійного розміщення відбиваючих пластин на нижній поверхні мосту. Якщо пластини розмістити на всій поверхні МС, сутність методу не зміниться, однак з'являться труднощі, що обумовлені збільшенням кількості хибних мінімумів при оптимізації функціоналу (3.5). У цьому випадку необхідно провести стиснення інформації про амплітудно-фазовий розподіл, наприклад, шляхом переходу до еквівалентної антенної решітки, тобто замість двомірної решітки використовувати еквівалентну одномірну. Замість цього автором запропоновано аналогічний підхід при виявленні наземних орієнтирів мобільними автономними роботами.

## 4.2 Метод виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами

Скористаємось рис. 3.19. Джерелом інформації тепер є наземний орієнтир зі своїми координатами, абсолютні значення яких на карті не обов'язково знати, оскільки при автономній навігації робота на обмеженій ділянці місцевості важливою інформацією є відносне положення робота від вибраного орієнтиру. Отже, головною метою методу є виявлення наземного орієнтиру з наперед заданими показниками якості. В цьому випадку підцілями є:

- вибір засобів виявлення;
- вибір моделей прийняття рішення.

### 4.2.1 Вибір засобів виявлення наземного орієнтиру

Вибір засобів виявлення наземного орієнтиру для робота було здійснено за критерієм коефіцієнта повноти інформації. В автономній навігації АМР без GPS інформація збирається від наземних орієнтирів, які спочатку треба виявити, а потім визначити координати робота відносно виявленого орієнтиру. Основна проблема складається в тому, що орієнтир є нерухомим відносно навколишньої місцевості, яку будемо називати фоном. В таких умовах важко знайти відмінності між параметрами сигналів, що відбиті від фону та орієнтиру при активній локації різними хвилями (електромагнітними, ультразвуковими тощо). В роботі [77] запропоновано метод розширення умов застосування радарів на основі розробленої системи виявлення стрибків амплітуди сигналів, відбитих від орієнтиру. В пасивній локації з застосуванням відеокамер або приладів нічного бачення, що приймають хвилі різних діапазонів (оптичному видимому та інфрачервоному), з'являється можливість виявлення орієнтирів з високою ймовірністю при застосуванні методів, що описані в [61].

#### 4.2.2 Вибір моделей прийняття рішення

Давно існують загальновідомі критерії прийняття рішення, що стосуються виявлення об'єктів, зокрема орієнтирів. Найголовніший з них – перевищення ймовірності  $p$  правильного виявлення орієнтиру деякого порогового значення  $p_{\text{пор}}$  в широкому діапазоні умов освітлення, кольорів зображення, впливу заважаючих факторів тощо

$$p \geq p_{\text{пор}}. \quad (4.1)$$

Для визначення  $p$  потрібно знати закон розподілу флуктуацій  $W_{\text{сф}}(\Delta u)$  параметру  $\Delta u$ , що вибраний для аналізу. Для мостів це був прогин, а для відеокамери узагальненого параметру не існує. Реально маємо двомірну картину зображення, що описується великою кількістю кольорових пікселів, причому кольоровість кожного пікселя може бути розкладена на три кольори з різною інтенсивністю. Це червоний, зелений і синій, що позначаються літерами  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . Отже, кількість пікселів потрібно помножити на три і від кожного отримати інформацію, що дає можливість описати об'єкти на кадрі. Оброблення такої кількості інформації в реальному масштабі часу є складним завданням. Після отримання інформації необхідно розпізнати орієнтир, зображення якого вводиться в пам'ять комп'ютера. Розпізнавання проводиться, як правило, при наявності різних типів шумів. Як наслідок, не слід очікувати високої швидкодії ІС та якості розпізнавання орієнтирів.

В дисертації вибрано інші підходи до реалізації основної мети навігації робота. По-перше, це обмеження кількості типів орієнтирів, які повинна розпізнавати інформаційна система робота. Оскільки основним є визначення локальних координат орієнтиру на місцевості, то орієнтир повинен мати малі розміри у горизонтальній площині та великі – у вертикальній. Для



моделювання вибрано вертикальний стовп з будь-якого матеріалу, вежа чи просто одиноке дерево.

По-друге, це відмова від оброблення двомірної картини зображення. Оскільки циліндроподібний орієнтир на кадрі займає значну частину вертикальної смуги, то є основа для сподівання, що кольоровість в межах цієї смуги є майже однаковою. Звідси випливає ідея розбиття всього двомірного зображення кадру на вертикальні смуги, ширина яких є сумірною з шириною зображення орієнтиру, а для цього ще потрібно врахувати орієнтовну дальність до орієнтиру та технічні характеристики самої камери. З фізичної точки зору зрозуміло, що результат усереднення кольоровості в смугі, де розміщений циліндроподібний орієнтир, буде істотно відрізнятися в більшості випадків від результату усереднення кольоровості в інших вертикальних смугах, в яких кольоровість є хаотичною для спостерігача.

По-третє, слід очікувати, що така ж залежність існує для кожної складової кольоровості, тобто для  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . Усереднене значення кольоровості в межах вертикальної смуги будемо називати параметром кольоровості, розподіл якого вздовж горизонтальної координати кадру є одномірною залежністю. Це означає, що описана методика переходу від двомірного зображення до одномірного приводить до стиснення інформації в число разів, що дорівнює добутку кількості пікселів по горизонтальній координаті кадру на кількість пікселів по вертикальній координаті, поділений на кількість вертикальних смуг. Як правило, коефіцієнт стиснення становить декілька десятків тисяч.

По-четверте, розподіл параметру кольоровості вздовж горизонтальної координати є реалізацією одномірного випадкового поля, а при скануванні відеокамери в азимутальній площині та при русі робота випадкове поле можна перетворити у випадковий процес. В процесі пошуку орієнтиру робот отримує багато реалізацій цього процесу і на їх основі з допомогою відомих статистичних методів - закон розподілу  $W_{cf}(\Delta y)$  параметрів кольоровості при

наявності орієнтиру та аналогічний закон  $W_{\phi}(\Delta y)$  при його відсутності, тобто при наявності тільки зображень, що не відносяться до орієнтирів. Такі зображення будемо вважати фоновими або шумовими. Не існує принципових обмежень для моделювання подібних розподілів і в дисертаційній роботі вони отримані при моделюванні з використанням зображень визначених типів місцевості. Наявність законів розподілу дозволяє визначити ймовірність виявлення наземного орієнтиру у конкретних умовах.

По-п'яте, для прийняття рішення про виявлення орієнтиру потрібно забезпечити визначення порогового значення ймовірності виявлення. Для цього потрібно сформулювати вимоги до значення ймовірності хибної тривоги і далі максимізувати ймовірність виявлення орієнтиру. Подібні операції не є проблемними у випадках коли випадковий процес є стаціонарним. Тоді стрибки параметру кольоровості в області розміщення зображення орієнтиру на кадрі при перевищенні наперед визначеного рівня будуть свідчити про наявність орієнтиру в зоні огляду відеокамери.

По-шосте, у випадках, коли випадковий процес кольоровості є нестаціонарним, треба створювати адаптивний поріг параметру кольоровості, що на практиці є дуже складним завданням. В дисертації запропоновано перехід від прийняття рішення в умовах нестаціонарного процесу до прийняття рішення для стаціонарного, який, як показано в роботі, можна отримати шляхом розкладання реалізацій нестаціонарного процесу в адаптивному базисі Гільберта-Хуанга, як це вже було зроблено стосовно МС.

По-сьоме, не завжди параметр кольоровості в смузі с орієнтиром буде істотно перевищувати фонові значення. В дисертації запропоновано штучний підхід забезпечення високих значень цього параметра за рахунок їх просторового накопичення при скануванні відеокамерою навіть в умовах нестаціонарного процесу і показано, що запропонований метод є ефективним при малому радіусі кореляції параметрів кольоровості.

4.3 Нові методи збирання і оброблення інформації в системі дистанційного виявлення наземних орієнтирів бортовими системами автономних мобільних роботів

4.3.1 Система збирання і оброблення інформації на основі використання динамічних просторових каналів виявлення наземних орієнтирів

На відміну від інформації про параметри мостових споруд, яка може оброблятися достатньо довго, інформація для АМР, який шукає орієнтири, повинна формуватися за відносно короткий час (це залежить від завдання, що ставиться перед роботом). Кадри з зображенням місцевості швидко змінюються і, як наслідок, маємо великий обсяг динамічної інформації. В таких ситуаціях дуже важко за короткий час виділити наземний орієнтир за параметрами кольоровості. Потрібні нестандартні підходи до розв'язання цієї задачі.

Як зазначалося, в навігаційній системі АМР використовуються одномірні розподіли залежностей координат кольоровості  $R(x), G(x), B(x)$  від горизонтальної координати матриці відеокамери  $x$  замість обробки двомірного зображення у вигляді залежностей  $R, G, B$  від горизонтальної та вертикальної координат матриці відеокамери. Використання фрактальної обробки результатів вимірювання, яке показано автором в [78], дозволяє також здійснювати стиснення інформації. Ймовірність виявлення орієнтиру наближається до одиниці, коли параметри кольоровості орієнтиру доволі сильно відрізняються від фону.

В дисертації розглядається випадок слабкої відмінності параметрів кольоровості орієнтиру та фону, а за рахунок спеціальних рішень досягається для таких умов висока (задана) ймовірність виявлення наземного циліндроподібного орієнтиру. Сутність зазначених рішень ґрунтується на наступних фізичних ефектах. Якщо немає істотних відмінностей між параметрами кольоровості фону та орієнтиру, то виявлення останнього стає проблематичним. Звідси виникає ідея штучного створення зазначених

відмінностей. Для цього відбувається сканування відеокамерою з лінійною швидкістю, що істотно перевищує швидкість руху робота по місцевості. Замість одного зображення орієнтиру маємо декілька (іноді багато) зображень цього ж орієнтиру, але під різними ракурсами, де зображення фону найчастіше відрізняється від попереднього зображення фону. Фактично все зображення розділяється на декілька зображень, отриманих під різними кутами, завдяки чому формуються просторові канали зображення. Тепер можна складати параметри кольоровості по всім кадрам, що зсунуті в часі з урахуванням швидкості сканування камери: значення цих параметрів від наземного орієнтиру накопичуються, а від фону складаються хаотично, тобто наземний орієнтир виділяється над фоном.

Таким чином, відеокамера АМР здійснює за горизонтальною координатою сканування (рис. 4.1) із кутовою швидкістю  $\Omega$  протягом часу  $t_c$  ( $t_c = \frac{\theta_c}{\Omega}$ ) і переміщується через зону огляду із кутом  $\theta_c$ .

Кожна дискрета часу  $t_k = k \cdot \Delta t$ ,  $k = 0, 1, \dots, m-1$  завдяки скануванню камери відповідає розподілу параметрів кольоровості  $R$ ,  $G$ ,  $B$  по горизонтальній координаті  $x$  матриці відеокамери, а число  $m$  дорівнює цілій частині співвідношення  $\frac{t_c}{\Delta t}$ , де  $\Delta t$  – малий дискретний час, тобто числу просторових каналів зображення.

Наявний розподіл  $R(x), G(x), B(x)$  для  $k$ -го зображення позначається вектором  $\vec{y}_k$ , який містить  $n$  чисел, що відповідають кількості пікселів уздовж горизонтальної координати. На рисунках наземний орієнтир по довжині займає, приблизно 30 стовпців пікселів в залежності від його ширини та відстані. Приклади зображень місцевості із типовими орієнтирами можна бачити на рис. 4.2, а та на рис. 4.2, б. Трохи нижче можна побачити розподіл параметрів кольоровості  $R$ ,  $G$ ,  $B$ .

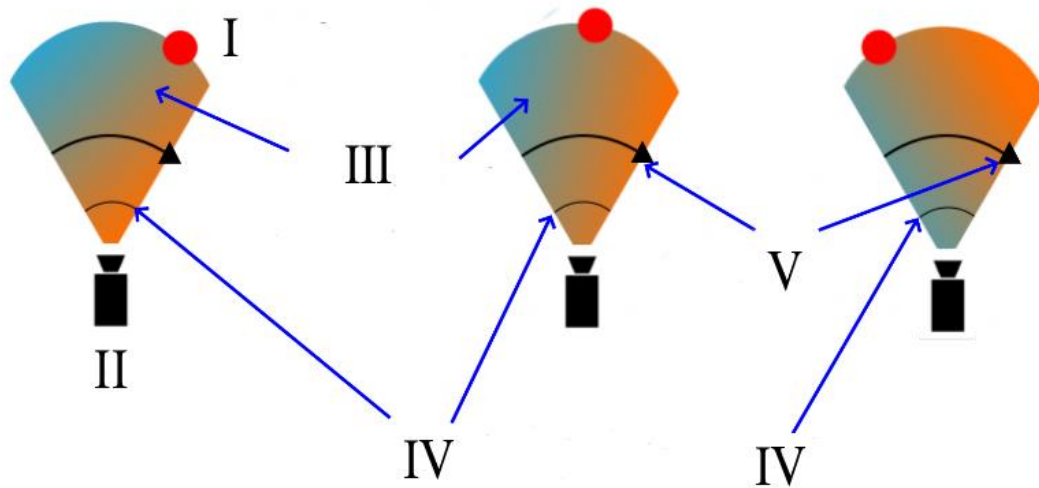


Рисунок 4.1 – Ілюстрація переміщення (чорна точка) орієнтиру всередині зони огляду скануючої за годинниковою стрілкою відеокамери (формування просторових каналів відеозображення)

Після проведеного аналізу було виявлено, що для першого типу місцевості розподіл випадкових параметрів кольоровості є однорідним, а для другого – ні. Однорідність можна вважати в даному випадку прикладом стаціонарного процесу, а неоднорідність – прикладом нестаціонарного процесу. Оскільки простір і час пов'язані, то будемо використовувати терміни «стаціонарні» та «нестаціонарні процеси». Графіки залежностей 3 параметрів кольоровості  $R(x), G(x), B(x)$  є дуже схожими. Тому для отримання достовірного результату треба аналізувати саме ту залежність, до візуально можна визначити різку зміну характеру протікання процесу. У подальшому така залежність буде позначатись як  $\vec{y}_k(x)$  для  $k$ -го моменту часу сканування камери. Вона буде визначатись знаходженням пікселя в рядку камери, кількість яких визначено змінною  $n$ . Для  $\vec{y}_k(x)$  векторний символ позначає, що кожний піксель пов'язаний із значенням параметру кольоровості. В залежності від багатьох умов, наприклад, освітленості, співвідношення кольору фонового зображення і орієнтиру будуть з'являтися «стрибки» чи «провали».

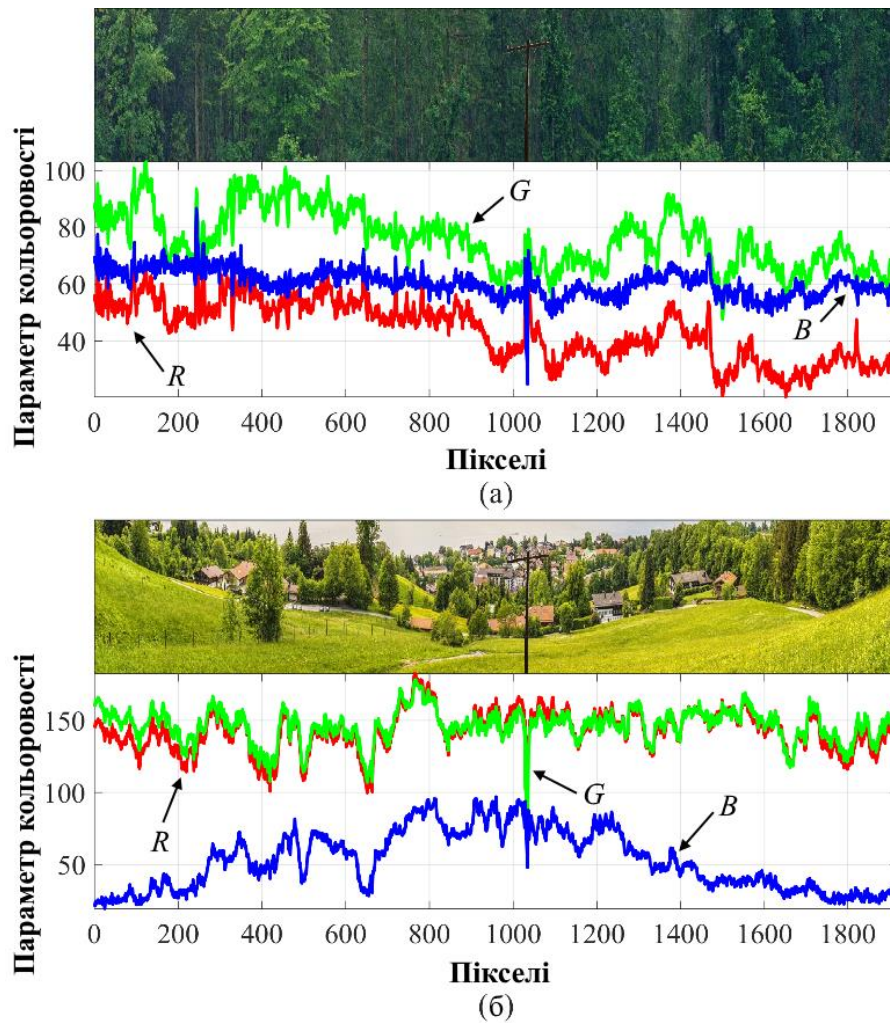


Рисунок 4.2 – Приклади фотографій із орієнтирами, характерними для першого та другого типів місцевості із розподілами параметрів кольоровості

Після аналізу реалізації випадкових процесів  $R(x), G(x), B(x)$  існування орієнтирів приводить до значних змін цих реалізацій у визначеному просторовому секторі, що буде проявлятися у вигляді тих самих «стрибків» чи «провалів».

Деякий поріг, що визначається, є критерієм виявлення орієнтиру. Орієнтир можна вважати виявленим, якщо «стрибок» (або «провал») перевищує поріг. До таких висновків можна дійти тільки в статистичному сенсі. У випадку, коли процес кольоровості має велике значення дисперсії  $\sigma^2$ , то можна зробити хибний висновок щодо виявлення орієнтиру АМР. Такий випадок називають помилковим чи хибним. Значення порогового рівня дуже сильно впливає на ймовірність виявлення орієнтиру, а також хибної тривоги.

На рис. 4.4, б можна бачити процес виявлення орієнтиру (у випадку рис. 4.2.) із декількома відмінними один від одного порогамі виявлення (4-сигма (штрих пунктирна лінія) і 3-сигма (штрихова лінія)). Згідно з статистичним критерієм Граббса [50] та рівнем значущості 0.01 перевищення порогу свідчить про існування орієнтиру.

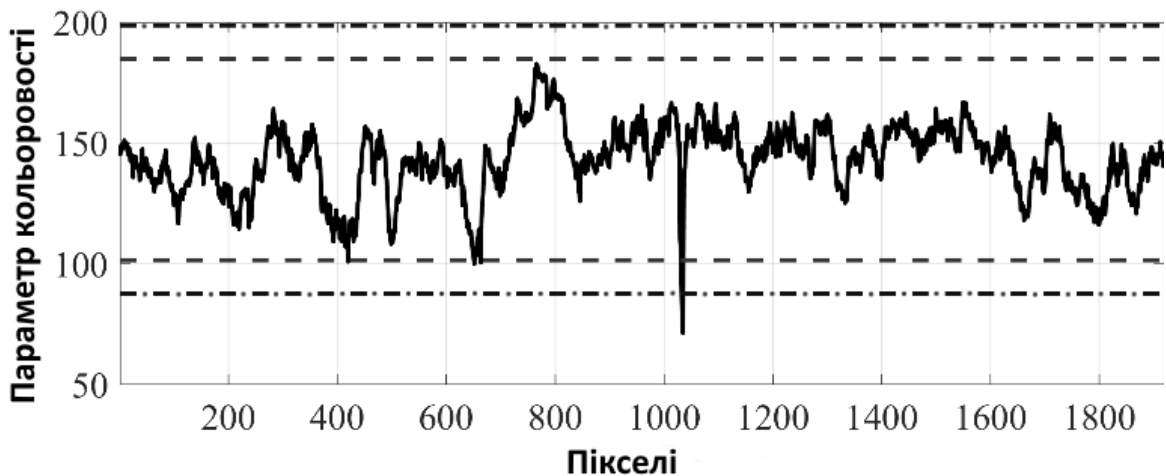


Рисунок 4.3 – Пояснення принципу виявлення «стрибка» параметра кольоровості через наявність орієнтиру

Після аналізу розподілів параметру кольоровості для різноманітних фонових зображень можна зробити висновок, що орієнтир не завжди виявляється, тому що такі «стрибки» чи «провали» можуть бути значно меншими порівняно з флуктуаціями параметрів кольоровості фону. Велика дисперсія цих флуктуацій часто приводить до хибного виявлення. Саме тому є варіант використання методу вирівнювання параметрів кольоровості фонового зображення у процесі сканування простору відеокамерою.

Але у процесі згладжування наявних флуктуацій можна не помітити і знищити сам «стрибок» цього параметру. Рішенням цієї проблеми є відмова від згладжування країв параметрів кольоровості в ближніх межах «стрибка». Наприклад, після сканування простору камерою ми отримали  $m$  векторів  $\vec{y}_k(x)$ . У першу секунду сканування відеокамерою орієнтир знаходиться праворуч області огляду камери (рис. 4.4, а). Перший вектор  $\vec{y}_1(x)$ , який

описує перше зображення, затримується на час  $(m-1) \cdot \Delta t$ , другий – на час  $(m-2) \cdot \Delta t$  і т. д., а останній вектор  $\vec{y}_m(x)$  зовсім не затримується [79]. Затримка означає збереження вектору (набору  $n$  чисел) у пам'яті комп'ютера протягом певного часу. З часом  $m \cdot \Delta t$  усі зміщені в часі вектори додаються [79]. Під терміном «затримка» розуміється збереження вектору у пам'яті комп'ютера на певний час. Після проходження деякого часу  $m \cdot \Delta t$  всі такі вектори сумуються. У випадку, коли «стрибок» або «провал», спричинений появою орієнтиру, з'являється у першому кадрі, то очікується, що він буде на всіх або на більшості інших кадрів. Завдяки затримці розподілу параметрів кольоровості досягається приблизне вирівнювання часу, коли в кожному зображенні є стрибок (або провал) цих параметрів [79]. Навіть якщо «стрибок» чи «провал» є дуже великим, то це ще не означає, що він може дуже легко виявлений. Параметри кольоровості орієнтиру сумуються разом із сумуванням параметрів кольоровості фону і тому збільшення амплітуди «стрибка» або «провалу» відносно фону може не трапитися. Такий випадок є дуже частим, коли радіус кореляції флуктуацій параметрів кольоровості є високим. У практичному сенсі такий метод вибору «стрибків» або «провалів» є неприйнятним. Для того, щоб параметри кольоровості фону формувалися хаотично, необхідно підсумовувати не сусідні вектори, а вектори, зміщені в просторі вздовж горизонтальної координати на значення радіусу кореляції або більше для випадкових залежностей  $R(x), G(x), B(x)$  [79]. Такі «стрибки» не сумуються хаотично, оскільки зміна цих залежностей забезпечує ефект додавання стрибків майже в один і той же момент часу. Отриманий результат поділяється на певне число  $n_0$ , яке дорівнює цілому числу

$$n_0 = \frac{n}{n_{cor}}, \quad (4.2)$$

де  $n_{cor}$  – радіус кореляції флуктуацій параметрів кольоровості в пікселях по горизонтальній координаті  $x$  [79]. Використовуючи такий підхід головним



ефектом є зменшення дисперсії флуктуацій параметрів кольоровості  $\bar{y}_k(x)$  фону. Дисперсія флуктуацій залежить від  $n_0$ , що свідчить також про існування залежності від місцевості, на якій розміщується шуканий орієнтир. Наприклад, система виявляє «стрибок» чи «провал», але не може з'ясувати чи це є орієнтир. Після обертання камери під кутом на попередньому місці матриці камери з'явиться ще одне зображення, параметри кольоровості якого можуть бути некорельовані з попереднім розподілом [79]. У випадку сумування попереднього параметру кольоровості з новим, процес відбувається хаотично, коли «стрибок» чи «провал» не пов'язаний з орієнтиром, тобто він хибний чи не існує. Можна очікувати, що в інший момент часу  $t_k$  «стрибок» або «провал» зникне і цей «хибний орієнтир» буде згладжуватися. Слід зазначити, що перший етап усереднення параметрів кольоровості відбувається на етапі отримання середнього значення цих параметрів у кожному стовпчику пікселів [79]. Далі виконується попередня операція вибору орієнтиру. У випадку, коли «стрибок» параметру кольоровості не виявлено, основними причинами цього є відсутність орієнтиру у зоні огляду камери, великий радіус кореляції флуктуацій параметрів кольоровості фону чи малий стрибок кольоровості [79]. Рис. 4.4. показує процес згладжування параметрів кольоровості фону з майже подібним стрибком цього параметру.

Ефективність вищезгаданого способу розглядається на прикладі розподілу параметру  $R(x)$  (червоний колір).

На чотирьох перших фотографіях (рис. 4.4, а) показано зміщення положення орієнтиру (стовпа) у часі, що відповідає радіусу кореляції параметра кольоровості в пікселях на рівні 0,37 нормованої кореляційної функції, розподіл параметрів кольоровості уздовж кадру показано на рис. 4.4, б різними кольорами, і кожен з кольорів відповідає одному з положень орієнтиру на рис. 4.4, а [79]. Якщо кутова швидкість камери та час вимірюється з високою точністю, відстань між провалами кривих  $R(x)$ , які зумовлені тим самим орієнтиром, є однаковою, що дає підстави визначати середню суму розподілів, зміщених на цю відстань. Ця сума показана на рис. 4.4, в, з чого

впливає, що дисперсія флуктуацій параметрів кольоровості фону значно зменшилася, а амплітуда стрибка (провалу) залишилася майже незмінною. В таких умовах є причини для зменшення порогу і збільшення ймовірності виявлення орієнтиру без збільшення ймовірності хибної тривоги. Для фону радіус кореляції флуктуацій параметрів кольоровості високий, і тому неможливо значно зменшити дисперсію цих коливань і, таким чином, зменшити поріг [79]. Застосування методу усереднення (рис. 4.4, в) дозволяє знизити поріг та збільшити ймовірність виявлення орієнтиру, що видно із порівняння рис. 4.3 та рис. 4.4, в, і визначається за допомогою критерію Граббса [59], [80].

Метод вимагає попереднього виявлення «стрибка» чи «провалу» в розподілі параметрів кольоровості, і для цього встановлюється поріг виявлення орієнтиру. Він може навіть трохи перевищувати стандартне відхилення флуктуацій параметрів, яке легко обчислюється з отриманого розподілу на зображенні. Перевищення цього порогу означає наявність орієнтиру, але значення ймовірності хибної тривоги може бути високою. Після усереднення зміщених залежностей  $R(x)$ ,  $G(x)$ ,  $B(x)$  фонових значень аналогічні розподіли в місцях стрибків (провалів) також усереднюються. Якщо останні не спричинені орієнтиром, амплітуда в цілому зменшується. Це є процесом селекції хибних орієнтирів, які сприймаються роботом як справжні.

Отже, запропонований метод виявлення орієнтирів роботом слід застосовувати до барвистої фонові області з невеликим радіусом кореляції флуктуацій параметрів кольоровості. Цей радіус повинен бути меншим від приблизно третини частини пікселів, розташованих уздовж горизонтальної координати кадру [79]. Чим більший радіус кореляції, тим менше шансів зменшити дисперсію флуктуацій параметрів кольоровості, і це накладає обмеження на поріг виявлення орієнтиру. Зниження порогу означає збільшення ймовірності хибної тривоги.

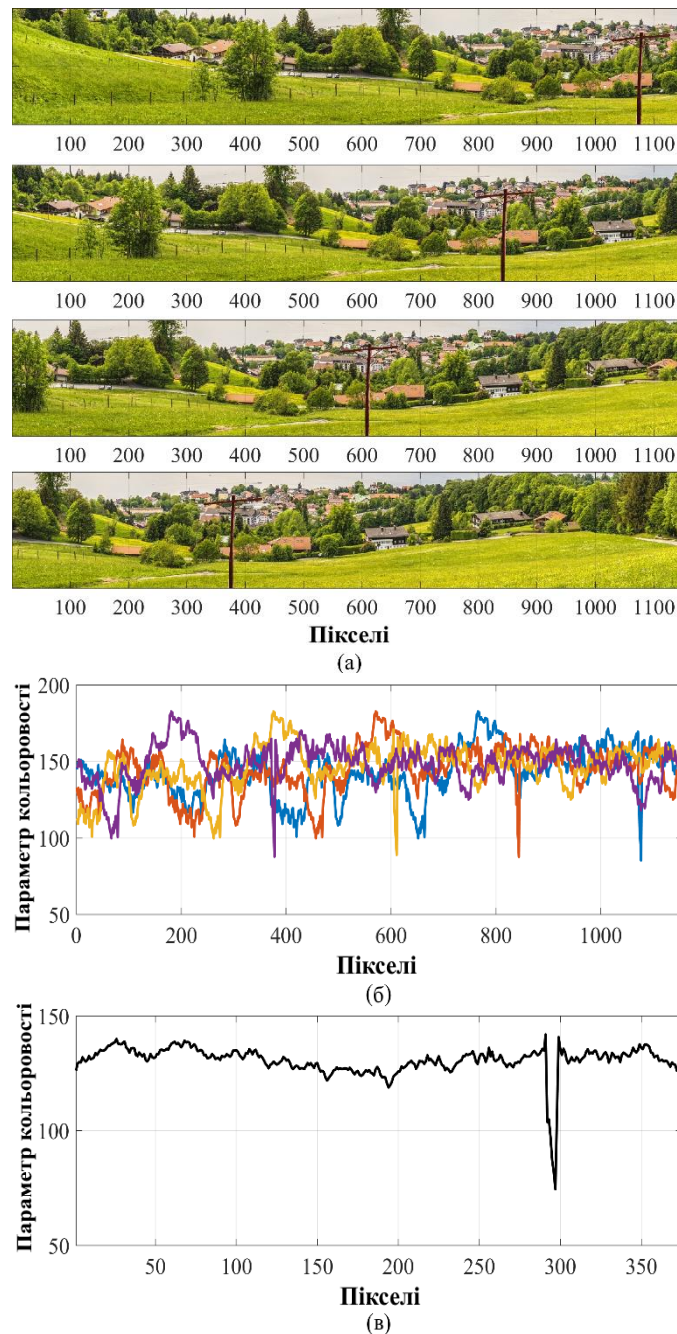


Рисунок 4.4 – Ілюстрація процесу згладжування параметрів кольоровості фону з майже однаковим «стрибком» цього параметру

Оскільки дисперсія флуктуацій параметрів кольоровості під час усереднення зменшується, певний рівень хибної тривоги буде існувати при нижньому пороговому значенні.

Аналіз 100 розподілів параметрів кольоровості для різних зображень дозволив провести статистичну оцінку цих параметрів окремо для фону та орієнтирів [79]. Приклад законів розподілу параметрів кольоровості для фону

(суцільна лінія) та орієнтирів (штрих-пунктирна лінія) для другого типу рельєфу місцевості наведено на рис. 4.5. Важливо зазначити, що ймовірність виявлення орієнтирів не залежить від середніх значень параметрів кольоровості фону та орієнтирів, а залежить тільки від співвідношення між цими середніми значеннями. Оскільки вони на різних зображеннях одного типу могли суттєво відрізнятися, то доцільно їх зменшувати до одного середнього значення, що не впливає, таким чином, на дисперсію закону розподілу, який виявився близьким до нормального (рис. 4.5).

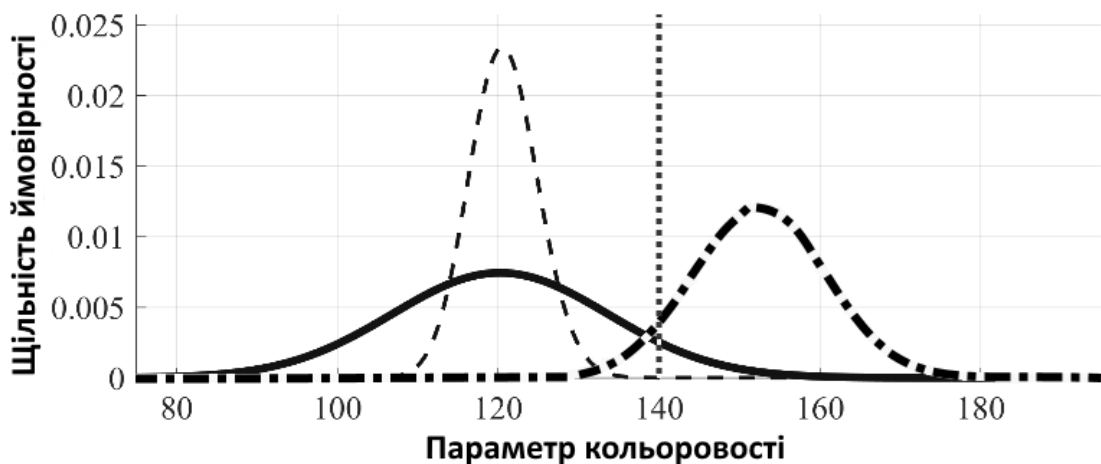


Рисунок 4.5 – Приклад законів розподілу параметрів кольоровості для фону (суцільна лінія) та орієнтирів (штрих-пунктирна лінія) для другого типу рельєфу місцевості

На рис. 4.5 представлені закони розподілу  $W_{\phi}(y)$  флуктуацій параметрів кольоровості для фону другого типу (суцільна крива – до застосування запропонованого способу, штрихова крива – після його застосування) та орієнтирів  $W_{o\phi}(y)$  з найближчим фоном. Криві  $W_{o\phi}(y)$  до та після застосування запропонованого способу близькі та майже збігаються рис 4.5. Ці закони виявились нормальними за критерієм Колмогорова з критичним рівнем значущості 0,95. Середнє значення параметрів кольоровості для орієнтирів визначалося як середнє значення абсолютних значень провалів і стрибків цих параметрів від різних типів орієнтирів (стовпів різного кольору,

висоти та діаметру, окремих дерев тощо). Провали в розподілі параметрів кольоровості були перевернуті, а їх максимальні значення в більшості випадків перевищували значення параметрів для фону. Інверсія провалів та їх перетворення у стрибки параметру кольоровості зумовлені методом оцінки ймовірності виявлення орієнтирів за встановленим порогом. Без цієї процедури потрібно було б окремо будувати закони розподілу для провалів та стрибків. Пунктирна вертикальна лінія на рис. 4.5 позначає поріг. Перевищення порогу за параметром кольоровості призводить до виявлення орієнтиру [79]. Для визначення ймовірності виявлення орієнтиру  $D$  та хибної тривоги  $F$  встановлюється поріг стрибка (провалу)  $y_0$  для прийняття рішення. У цьому випадку бажано використовувати формули (3.14)-(3.15), що є загальноприйнятими в радіолокації [60].

Залежності ймовірності виявлення орієнтиру  $D$  від відношення  $q$  середнього значення параметрів кольоровості від орієнтиру до такого ж самого значення від фону для першого (трійка лівих кривих) та другого (трійка правих кривих) типів місцевості показані на рис. 4.6. Суцільна лінія відповідає ймовірності хибної тривоги  $F$ , що дорівнює 0,01, пунктирна – 0,05 і штрихпунктирна – 0,1. З рис. 4.6 випливає, що надійне виявлення орієнтирів (наприклад,  $D \geq 0.9$ ) у розглянутих умовах можливе, якщо  $q \geq 1.7 \dots 2.2$ . Застосування запропонованого способу дозволяє значно зменшити  $q$  (зелені лінії). Невеликі значення  $q$  також можна отримати, збільшивши ймовірність хибної тривоги  $F$ . Він визначається з важливості завдань, які ставлять перед роботом. З рис. 4.6 випливає велика чутливість кривих виявлення до виду фону, на якому знаходиться орієнтир. Це видно з порівняння положень  $R$  та  $B$  ліній по осі абсцис на рис. 4.6. Вибравши пороговий рівень для конкретного типу фону, можна забезпечити необхідні значення ймовірності виявлення орієнтиру  $D$  та хибної тривоги  $F$ . Тому проблема налаштування адаптивного порогу  $y_0$  є важливою та актуальною.

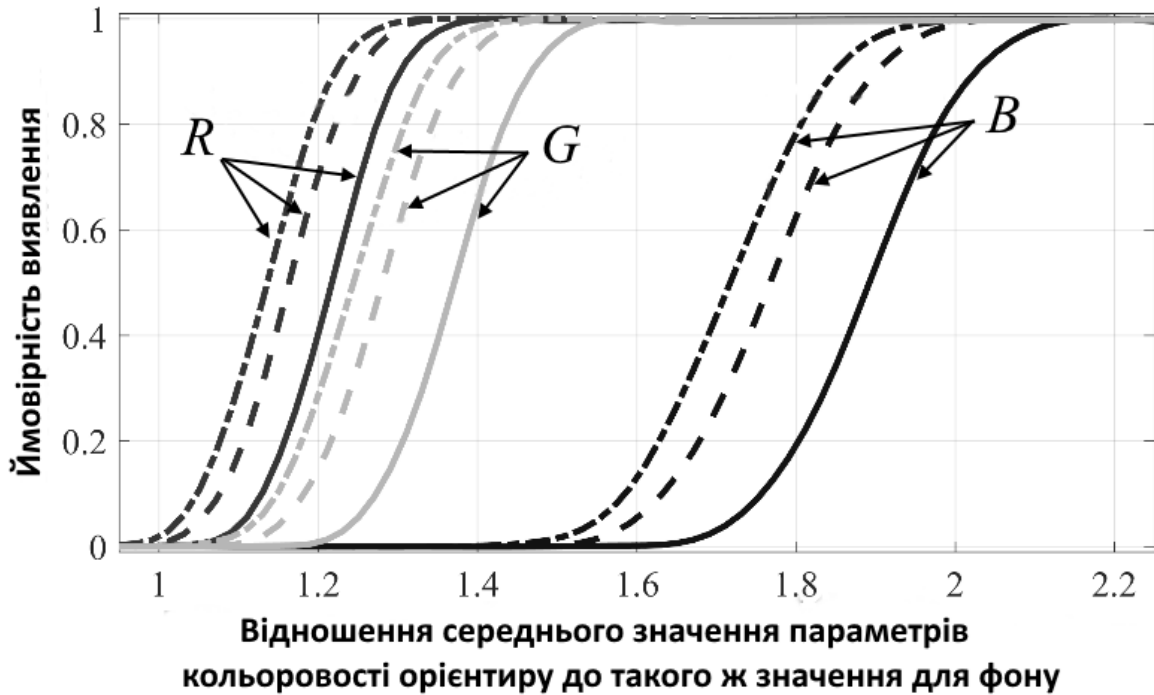


Рисунок 4.6 – Залежність ймовірності виявлення наземного орієнтиру (стовпа) від відношення середнього значення параметрів кольоровості орієнтира до того ж значення для фону

Схема, що реалізує запропоновану систему обробки інформації, приведена на рис. 4.7. З матриці відеокамери 1 з пікселів кожного стовпця сигнал, що пропорційний інтенсивності червоного, зеленого або синього кольору подають на суматор. На рис. 4.7 показана схема сумування тільки для одного стовпця одного з кольорів  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . Далі сумарну інтенсивність одного кольору ділять на кількість пікселів у стовпці і результат подають на вхід додаткової матриці 4, який відповідає номеру стовпця [79]. На інші входи додаткової матриці 4 подають середню інтенсивність відповідного кольору з інших стовпців, внаслідок чого на додатковій матриці встановлюється розподіл середньої інтенсивності кольору, наприклад,  $R(x)$  або (і)  $G(x)$ , або (і)  $B(x)$  [79]. На рис. 4.7 приведена багатоканальна система з декількома матрицями відеокамери 1. Реально це одна матриця, але показана в різні моменти часу, що обумовлені кутовим скануванням відеокамери [79]. Кількість таких квазіканалів дорівнює числу  $n_0$ , яке дорівнює кількості

радіусів кореляції в пікселях середньої інтенсивності кольорів  $R(x)$ ,  $G(x)$ ,  $B(x)$ , які поміщуються в межах горизонтального розміру матриці відеокамери. З виходів кожного каналу розподіли середньої інтенсивності  $R(x)$ ,  $G(x)$ ,  $B(x)$  затримуються в лініях затримки 5, причому в першому каналі найбільша затримка, а в останньому затримка дорівнює нулю [79]. Затримані розподіли складають в суматорі 6 і далі ділять в подільнику 7 на число  $n_0$ . В отриманому розподілі визначають максимальне або мінімальне значення розподілу в пристрої 8, яке в схемі порівняння 9 порівнюють з наперед встановленим порогом [79]. Перевищення останнього свідчить про виявлення наземного орієнтиру.

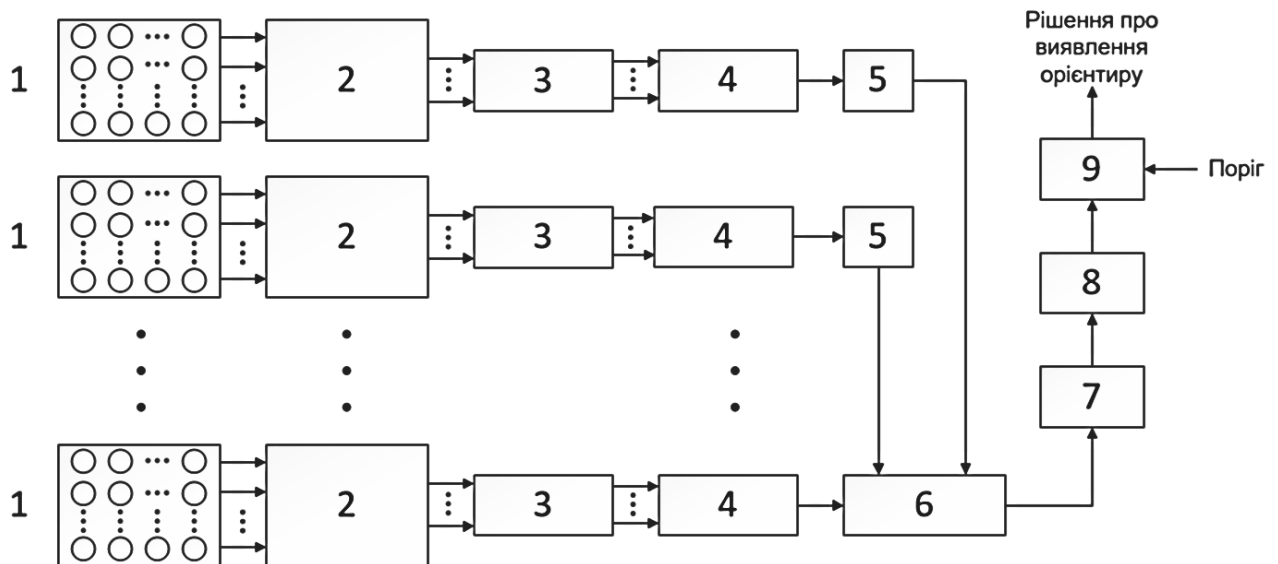


Рисунок 4.7 – Схема, що реалізує запропонований метод оброблення інформації про кольоровість зображення з наземним орієнтиром

Отже, головною перевагою запропонованої системи є можливість забезпечення заданого рівня ймовірності виявлення циліндроподібного орієнтиру при фіксованому рівні ймовірності хибної тривоги на фоні місцевості, що слабо відрізняється по кольору від орієнтиру. Високий рівень хибної тривоги свідчить про низьку достовірність інформації. Якщо колір орієнтиру значно відрізняється від кольорів фону, ймовірність виявлення

такого орієнтиру наближається до «1». При відсутності відмінностей між кольорами орієнтиру та фону ймовірність виявлення орієнтиру близька до нуля. У цьому випадку повинні використовуватись методи виявлення, що ґрунтуються на інших фізичних принципах. Ймовірність виявлення наземного циліндроподібного орієнтиру з використанням запропонованого способу залежить, однак, від радіусу кореляції флуктуацій параметрів кольоровості зображення. Чим більше цей радіус кореляції, тобто фон є більш одноманітний по кольору, тим менше ймовірність виявлення орієнтиру. На практиці не часто зустрічаються одноманітні кольорові фони, бо навіть, наприклад, одноманітний зелений ліс змінює свою кольоровість під дією освітлення, вітру та інших природних факторів. Таким чином, в більшості випадків досягається необхідна ефективність запропонованого методу.

Отже, в пункті 4.3.1 вдосконалено метод пошуку та дистанційного отримання інформації про виявлення наземного орієнтира для навігації автономного мобільного робота на довільній місцевості, який відрізняється від відомих створенням динамічних просторових каналів виявлення орієнтиру за ознаками кольоровості, що забезпечує виділення орієнтирів на фоні природних та штучних об'єктів при накопиченні параметрів кольоровості каналів.

4.3.2 Система збирання інформації про виявлення наземних орієнтирів на основі її оброблення в функціональному просторі ортогональних мод Гільберта-Хуанга

Для того, щоб виявити наземний циліндроподібний орієнтир шукають ознаки, які можуть знаходитись як в розподілі параметрів кольоровості, так і в складових розподілу. При розкладанні функцій  $R(x)$ ,  $G(x)$ ,  $B(x)$  на окремі компоненти «стрибки» та «провали» можуть зникнути, але проблема в тому, що вони і є головними ознаками наявності орієнтирів. Розкладання повинно бути придатним для неоднорідних полів, що становить собою подібність нестационарного процесу, оскільки вид розподілів  $R(x)$ ,  $G(x)$ ,  $B(x)$  у значній



мірі залежить від типу місцевості. Як було показано у [58], перетворення Г-Х є прийнятним для застосування у даному випадку як для нестационарних процесів, так і для неоднорідних випадкових полів. Процес декомпозиції сигналів на моди Г-Х описаний у [81].

Перехід до розкладання реалізацій процесів на складові означає перенесення оброблення інформації та прийняття рішення в функціональний простір ортогональних мод Гільберта-Хуанга, що практично забезпечує незалежність рішення від виду нестационарності вхідних процесів (неоднорідність полів). Результати декомпозиції параметрів кольоровості на моди Гільберта-Хуанга показані на рис. 4.8 та рис. 4.9, які відносяться до різних типів фонові місцевості.

Специфіка розкладання сигналу на моди Г-Х може видавати від'ємні значення параметрів кольоровості, але для знаходження і виявлення орієнтирів АМР це зовсім не є суттєвим. Таке розкладання на моди проводилося для зображень різних місцевостей. Після аналізу отриманих мод Г-Х (кількість яких склала від 6 до 8 в залежності від кількості локальних екстремумів на графіках параметрів кольоровості) було виявлено деякі закономірності, а саме чітке візуальне виділення «стрибків» чи «провалів» саме на перших, зазвичай, трьох модах. На четвертій та наступних модах «стрибків» чи «провалів» не виявлено. Подібні «стрибки» чи «провали» зустрічались майже на усіх 100 реалізаціях параметрів кольоровості на різних фотографіях, де орієнтири не сильно відрізнялись від фонового зображення. Дані «стрибки» чи «провали» можуть свідчити про те, що там знаходиться потрібний нам наземний орієнтир. Але для першої моди разом із стрибком параметру кольоровості (рис. 4.10) присутній також стрибок, який обумовлений іншими невідомими причинами. Даний стрибок можна тлумачити у розрізі збільшення ймовірності хибної тривоги. Так непотрібні «стрибки» чи «провали» можна усунути, використовуючи наступні методи:

- 1) перевірити наявність «стрибків» («провалів») у перших 2-х чи навіть 3-х модах Гільберта-Хуанга в одному місці на кадрі (матриці відеокамери);

2) застосувати метод усереднення фонового розподілу параметрів кольоровості;

3) використати інші методи виявлення орієнтирів.

У випадку, коли на зображенні присутні інші різноманітні циліндроподібні наземні об'єкти задача знаходження саме потрібного орієнтиру дуже ускладнюється. Автором висувається обмеження, що тільки один наземний орієнтир знаходиться у зоні огляду відеокамери.

Для того, щоб виявити наземний орієнтир, найефективнішим критерієм стає діапазон  $\Delta u$  значень параметрів кольоровості вздовж вертикальної координати розподілів  $R(x)$ ,  $G(x)$ ,  $B(x)$  в 1-х та 2-х модах при виконанні перетворення Г-Х. Оскільки параметри кольоровості можуть бути від'ємними, діапазон  $\Delta u$  визначається максимальним значенням різниці між невід'ємним і від'ємним значеннями параметрів кольоровості для кожної горизонтальної координати.

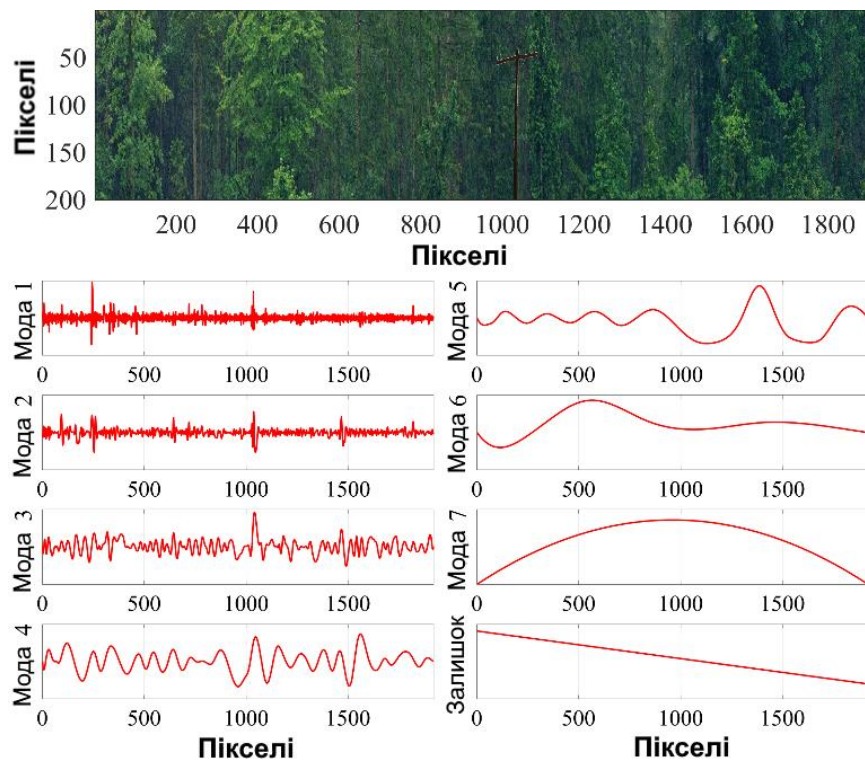


Рисунок 4.8 – Результати декомпозиції параметрів кольоровості зображення місцевості першого типу на моди Г-Х

На рис. 4.10 показані закони розподілу  $\Delta u$  для фонового зображення (рис. 4.9) для перших трьох мод, що досягнуті за 100 реалізаціями параметрів кольоровості. З рис. 4.10 випливає, що дисперсія флуктуацій параметрів кольоровості для першої моди значно менша, ніж для другої та третьої. Після отриманої інформації можна зробити наступний висновок: доцільно використовувати тільки першу та другу моду Г-Х для виявлення наземного орієнтиру.

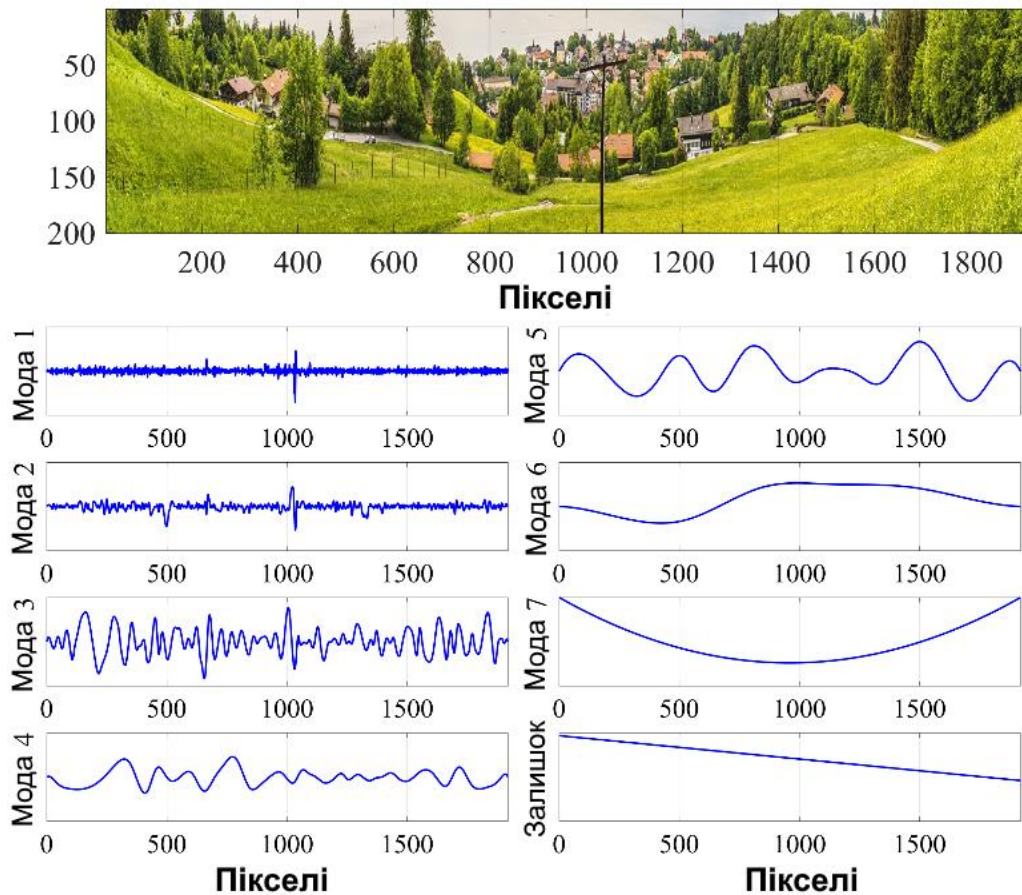


Рисунок 4.9 – Результати декомпозиції параметру кольоровості зображення місцевості другого типу на моди Г-Х

У якості критерію знаходження орієнтиру можна вибрати деякий поріг, при перевищенні якого можна говорити, що він знайдений. Аналогічно пункту 4.3.1 такі висновки можна зробити лише в статистичному сенсі. При великому значенні дисперсії флуктуацій параметрів кольоровості виявлення наземного

орієнтиру може бути хибним. Вибір порогового значення  $\Delta y$  є дуже важливою задачею, яка впливає на ймовірність правильного виявлення наземного орієнтиру. Аналогічно п. 4.3.1 перевищення порогу за параметром кольоровості за статистичним критерієм Граббса [59] та рівнем значущості 0,01 свідчить про існування орієнтиру.

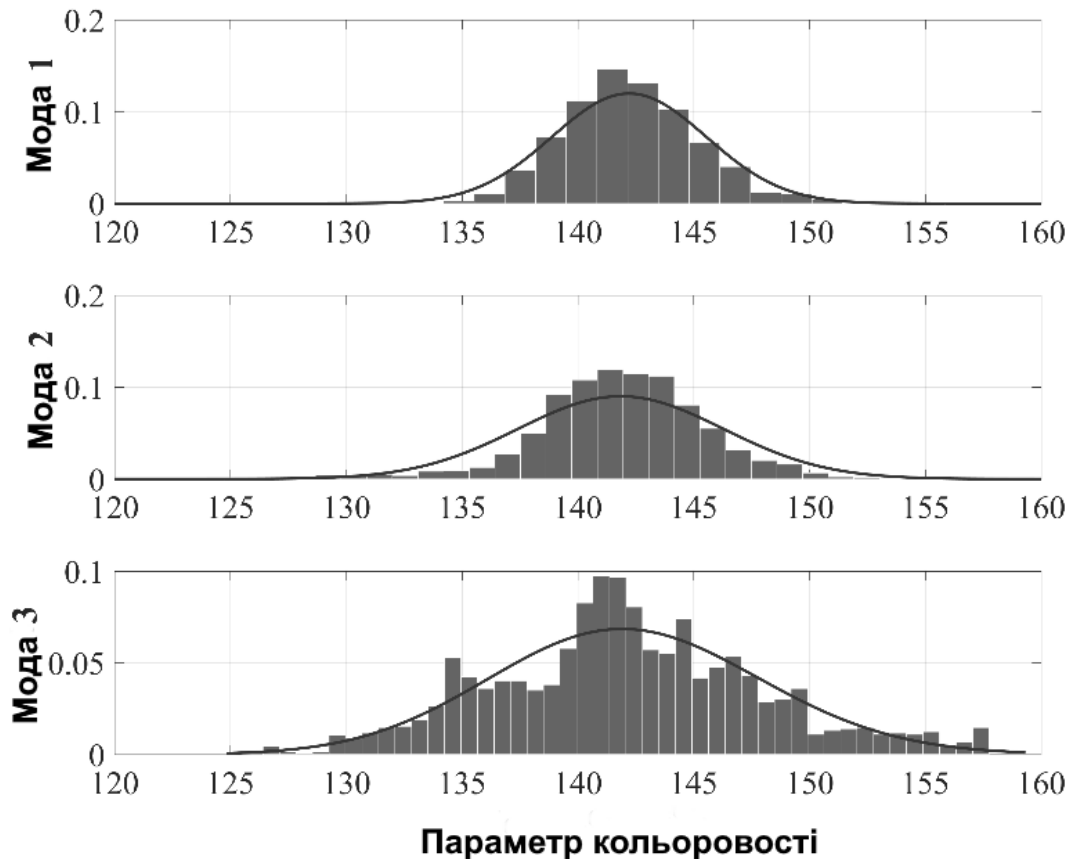


Рисунок 4.10 – Закони розподілу  $\Delta y$  для фону для перших 3 мод

На рис. 4.11 приведені криві ймовірностей визначення орієнтиру при різних значеннях хибної тривоги  $F$ . Суцільна лінія позначає значення хибної тривоги  $F = 0.01$ , пунктирна лінія –  $F = 0.05$ , а штрих-пунктирна лінія позначає значення хибної тривоги  $F = 0.1$ .

Для забезпечення необхідних значень ймовірності  $D$  та  $F$  потрібно вибрати правильний пороговий рівень  $\Delta y_0$ .

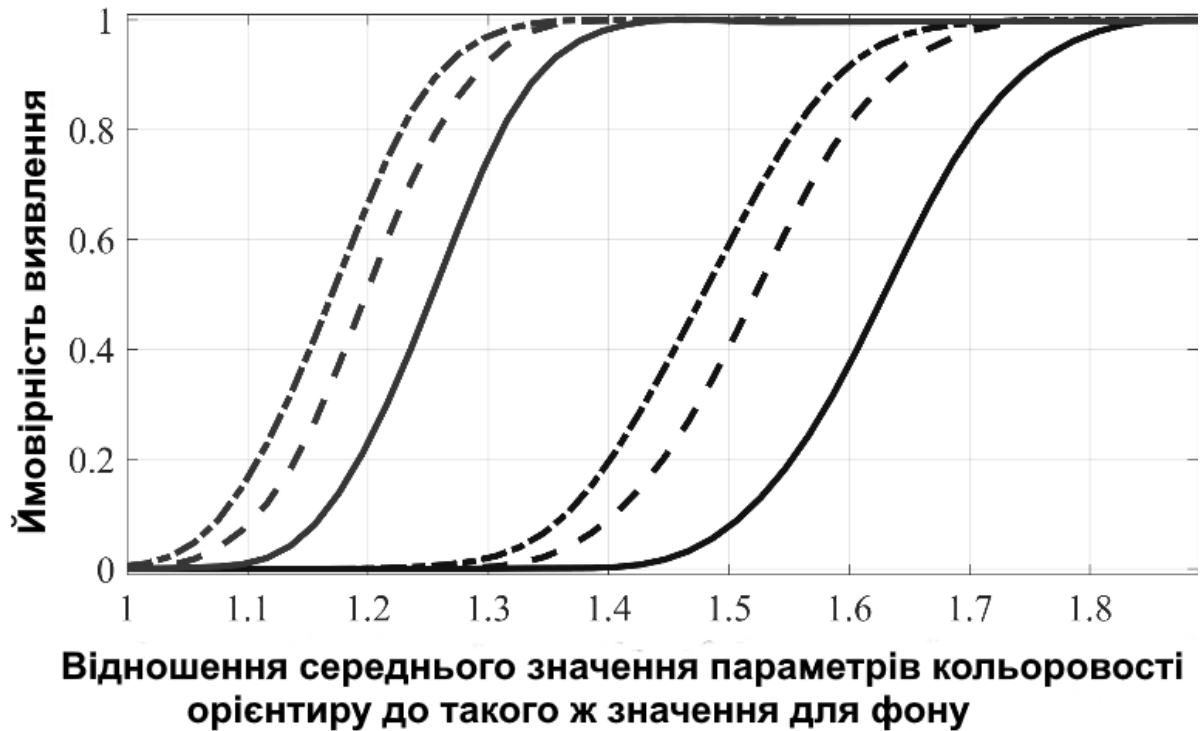


Рисунок 4.11 – Графіки ймовірності виявлення орієнтиру для різних значень ймовірності хибної тривоги  $F$  для двох типів місцевості (три лівих графіка для першого типу і три графіки праворуч для другого типу): суцільна лінія –  $F = 0.01$ , пунктирна лінія –  $F = 0.05$ , і штрих-пунктирна лінія –  $F = 0.1$ .

На рис. 4.11 можна бачити, що для отримання однакових значень ймовірності виявлення орієнтирів треба використовувати невеликі відношення середнього значення параметрів кольоровості від орієнтиру до того ж значення від фону. Після проведеного аналізу зображень це відношення повинно знаходитись в межах від 1.1 до 1.8. І зрозуміло, що для кожного фону криві виявлення орієнтиру не будуть однаковими, але використовуючи даний спосіб задачу по знаходженню наземного циліндроподібного орієнтиру можна вирішити в багатьох випадках. На рис. 4.12 показана схема, яка реалізує метод, що пропонується, для одного з кольорів  $R, G, B$ .

Її принцип роботи полягає у наступному: з кожного пікселя стовпця матриці відеокамери знімають сигнал, що пропорційний параметру кольоровості. Потім цей сигнал подають на багатоканальний суматор і багатоканальний подільник, який ділить сумарний сигнал в кожному каналі на

кількість пікселів у стовпці матриці відеокамери [82]. Кількість каналів суматора і подільника дорівнює кількості стовпців матриці, а кожний стовпець відповідає визначеній координаті  $x$  матриці відеокамери. З кожного каналу подільника сигнал подають на додаткову матрицю, яка аналогічна матриці відеокамери, в якій створюється один з розподілів параметрів кольоровості  $R(x)$ ,  $G(x)$  або  $B(x)$ , тобто функція, яку спрямовують на блок розкладання функцій  $R(x)$ ,  $G(x)$ ,  $B(x)$  на моди Гільберта-Хуанга [58]. Цей блок реалізують в комп'ютері з допомогою програм перетворення Гільберта-Хуанга, причому деякі з них уже реалізовані в нових версіях математичного пакету Matlab. З виходу блоку сигнали перших трьох мод подають на три блоки оцінки та селекції стрибка параметра кольоровості [82]. В них стрибок визначають як різницю між максимальним (додатним) та мінімальним (від'ємним) значеннями параметра кольоровості на невеликій ділянці змінювання горизонтальної координати  $\Delta x$  матриці відеокамери [79]. З виходу всіх блоків сигнали стрибків параметрів кольоровості направляють на схему співпадіння стрибків по горизонтальній координаті  $x$ . Одні й ті ж значення стрибків параметрів кольоровості означає, що стрибки обумовлені наявністю наземного орієнтиру на координаті  $x$ . Не співпадіння є ознакою відсутності орієнтиру на зазначеній координаті. Можлива поява одних і тих самих значень на декількох координатах у випадку наявності декількох орієнтирів. При співпадінні стрибків параметрів кольоровості вихідний сигнал схеми подають на три схеми порівняння [82]. У випадку відсутності такого сигналу схеми порівняння блокуються, що свідчить про відсутність в зоні огляду відеокамери якого-небудь наземного орієнтиру. При наявності орієнтиру схеми порівняння відкриті [82]. На один з входів схем порівняння подають сигнал стрибка першої, другої або третьої мод Гільберта-Хуанга. Кожна з схем порівняння призначена для порівняння стрибків параметрів кольоровості першої, другої або третьої мод з пороговими сигналами, які відрізняються для кожної з мод і визначаються наперед на основі статистичної обробки параметрів кольоровості з урахуванням завдань, які повинен виконувати автономний

мобільний робот. З виходів трьох схем порівняння сигнали надсилають на входи схеми «або» [82]. Наявність трьох або двох сигналів на входах цієї схеми означає, що орієнтир в зоні огляду відеокамери на визначеній координаті  $x$  матриці виявлений. Ймовірність виявлення орієнтиру оцінюють за перевищенням амплітуди стрибка над пороговим сигналом. Вибір порогового сигналу пов'язаний з рівнем хибної тривоги [82].

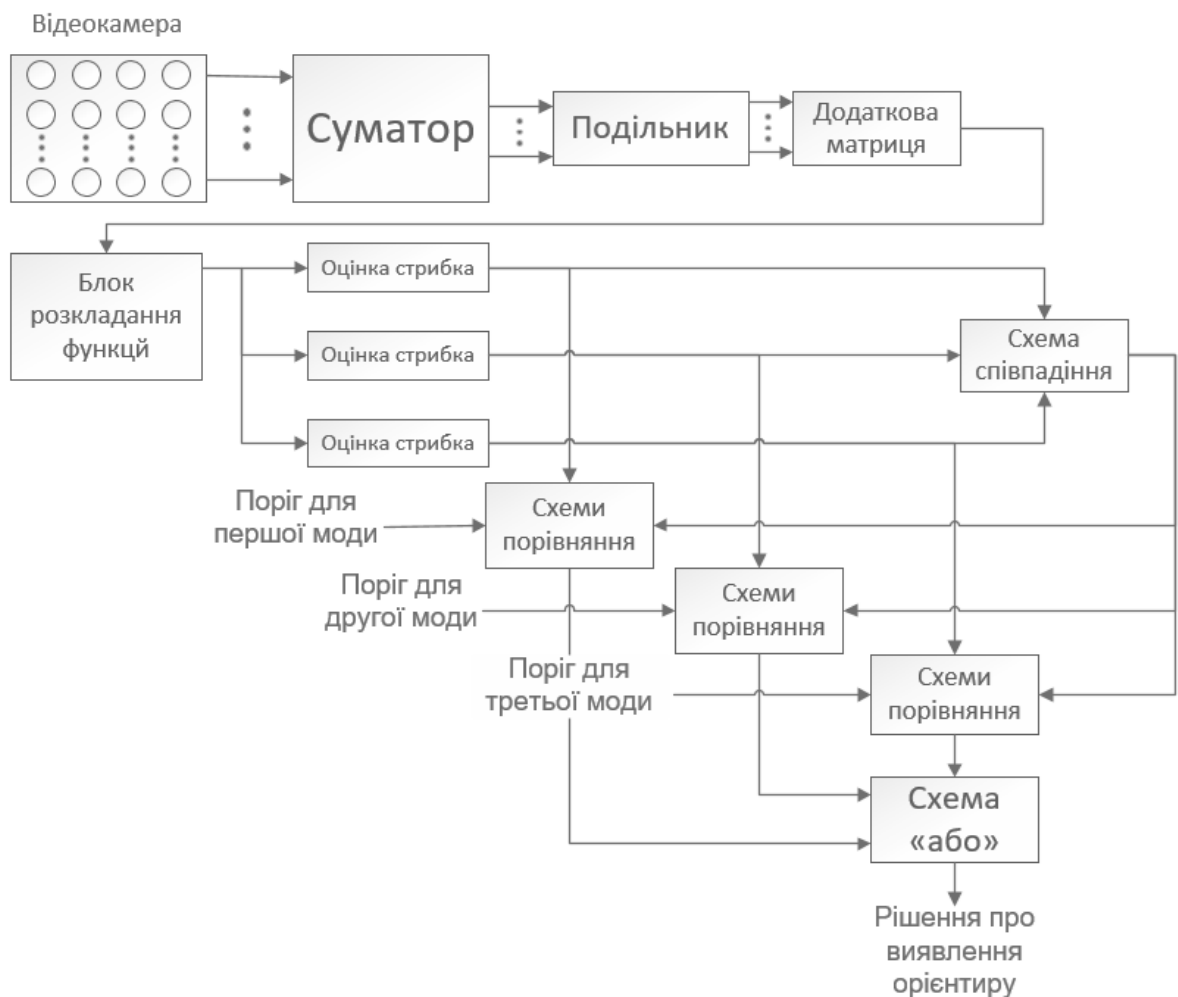


Рисунок 4.12 – Структурна схема системи, що забезпечує оброблення інформації про параметри кольоровості зображення з його розкладанням на моди Гільберта-Хуанга

Головною перевагою запропонованого способу є можливість забезпечення заданого рівня ймовірності виявлення циліндроподібного

орієнтиру при фіксованому рівні ймовірності хибної тривоги на фоні місцевості, що слабо відрізняється по кольору від орієнтиру [82]. Якщо колір орієнтиру значно відрізняється від кольорів фону, ймовірність виявлення такого орієнтиру наближається до одиниці. При відсутності відмінностей між кольорами орієнтиру та фону ймовірність виявлення орієнтиру близька до нуля. У цьому випадку повинні використовуватись методи виявлення, що ґрунтуються на інших фізичних принципах [82]. Таким чином, в більшості випадків досягається необхідна ефективність запропонованого способу, тобто задана ймовірність виявлення наземного орієнтиру при фіксованій ймовірності хибної тривоги.

Отже, в пункті 4.3.2 вдосконалено метод пошуку та дистанційного отримання інформації про виявлення наземного орієнтиру для навігації автономного мобільного робота на довільній місцевості, який відрізняється від відомих перенесенням оброблення інформації та прийняття рішення в функціональний простір ортогональних мод Гільберта-Хуанга, що практично забезпечує незалежність рішення від виду нестационарності вхідних процесів.

Цей метод є аналогічним для розробленого в третьому розділі методу оцінки стану МС, в якому не висувається ніяких вимог щодо оперативності оброблення інформації. Автономна навігація робота потребує швидкої видачі інформації про виявлення наземного орієнтиру. Весь процес оброблення інформації на основі використання мод Гільберта-Хуанга з отриманням ймовірності правильного виявлення орієнтиру займає від 2 до 5 секунд), якщо раніше вже були отримані закони розподілу параметрів кольоровості на місцевості подібного виду в аналогічних умовах (час доби, погода тощо).

#### 4.4 Показники, що характеризують досягнення мети дисертаційної роботи

Метою роботи є підвищення якості прийняття автоматизованого рішення щодо стану мостових споруд. Під якістю автор розумів оперативність



та ймовірність правильного прийняття рішення при заданому значенні хибної тривоги і цінності інформації. Для досягнення мети в дисертації розроблено новий метод дистанційного збирання вимірювальної інформації про прогини всієї поверхні МС. На українських мостах згідно зі стандартами вимірюється прогин тільки в одній точці МС, тобто при появленні локальної аномалії, що обумовлена дефектом мосту, вона може бути не виявлена. В дисертації за рахунок вимірювання поверхневого прогину виявляються аномальні прогини в будь-якій точці мосту і тому це є першою причиною підвищення якості прийняття рішення. Цифрові показники, що враховують локальні дефекти МС, в дисертації не приводяться, оскільки вони залежать від багатьох факторів, оцінка впливу яких виходить за межі дисертаційних досліджень. Порівняння результатів дисертації з найкращими МС технологічно розвинутих країн світу є недоцільним, оскільки там використовуються вбудовані в мостову конструкцію різноманітні недешеві датчики, включаючи датчики прогинів, які періодично замінюються через декілька років. В зазначених країнах використовуються і дистанційні методи вимірювання прогинів з допомогою високоточних радарів та лазерних систем. Їх вартість досягає десятків тисяч і навіть сотень тисяч доларів. В дисертації в експериментальних дослідженнях використовувався міні радар вартістю біля 100 доларів. Встановлення металевих пластин та приймальної системи збільшить вартість обладнання для дистанційного вимірювання прогинів до декількох тисяч доларів, що більше, ніж на порядок менше вартості зарубіжних аналогів. Отже, розроблений метод, на який отримано три патенти, доцільно використовувати в небагатих країнах, де сучасні вимірювальні технології є недоступними по вартості.

В дисертації розроблено ще два методи, в яких відбирається інформація з поверхні, але замість вторинних випромінювачів використовуються пікселі матриці відеокамери автономних мобільних роботів. Метод передбачає попереднє стиснення інформації від пікселів і далі її оброблення оригінальними пристроями, що зареєстровано в двох патентах. Зазначені методи не виносились в наукову новизну, оскільки не входять до рамки

основної теми роботи. Їх функція – показати, що в основному методі збирання вимірювальної інформації можливо перейти від оброблення інформації від розміщених на площині пластин до еквівалентного розміщення пластин вздовж лінії, що на порядок зменшить кількість інформації, яка обробляється, а, значить, підвищить оперативність прийняття рішення щодо стану МС. Запропонований метод порівняно з наявними методами вимірювання прогинів є більш привабливим, оскільки не обов'язково вимагає перекриття МС від транспорту, а час виконання вимірювання прогинів обумовлений тільки часом встановлення під мостом апаратури радара та приймальної системи, тоді як в існуючих технологіях міст звільнюється від транспорту і здійснюється вимірювання контактними прогиномірами з заїздом на міст автомобіля зі стандартним навантаженням. Отже, час на проведення вимірювань запропонованим методом є на порядок меншим, ніж в сучасних вимірювальних технологіях в Україні. Час на прийняття автоматизованого рішення в запропонованому методі складає декілька секунд, якщо попередньо набрана статистика прогинів. Закони розподілу прогинів повинні періодично обновлятися. В існуючих технологіях рішення приймається в ручному режимі відповідними фахівцями.

Другою причиною підвищення якості рішення щодо стану МС є відмова від аналізу нестационарних процесів, оброблення яких існуючими методами не завжди приводить до достовірних результатів. Для цього реалізації нестационарних процесів розклалися на ортогональні моди Гільберта-Хуанга в адаптивному базисі, аналіз яких показав, що в більшості випадків моди реалізацій зазначених процесів є стаціонарними. Фактично завдяки такому підходу істотно знижені можливості для недостовірних рішень, оскільки тепер здійснюється оброблення сталої інформації, модель оцінки якої запропонована в дисертації. Наявність нестационарності процесу прогинів суттєво зменшує відношення  $q$  середнього значення прогинів (стрибки прогину плюс фон) до середнього значення модулю фону, а це приводить до зменшення ймовірності правильного виявлення дефектів МС (рис. 3.17) в

декілька разів. Згідно з розробленою моделлю прийняття рішення приймається тільки для встановлених значень сталості інформації.

Третьою причиною підвищення якості рішення щодо стану МС є комплексний підхід, який враховує не тільки статистичні показники щодо безпеки, але і цінність інформації. Для цього створена модель визначення цінності інформації з урахуванням безпекових факторів, причому наперед експертами встановлюються вагові коефіцієнти на безпеку і цінність. Модель є перспективною на майбутнє, коли на українських мостах з'являться сучасні інформаційні технології і тоді ваговий коефіцієнт на цінність інформації підвищиться.

Нарешті, при вирішенні основних організаційних причин, що зменшують оперативність рішень щодо стану МС, на перший план висунуться питання швидкості оброблення великого обсягу інформації в технологіях на мостових спорудах. Ось чому автор перевіряв оперативність розробленої інформаційної технології не на мостових спорудах, а на автономних мобільних роботах, на яких така оперативність є необхідною при прийнятті навігаційних рішень. Дійсно, в системах оброблення інформації робота, як і в МС, автором запропоновано використання мод Гільберта-Хуанга. Виявилось, що оперативність прийняття рішення роботами складає 2-5 секунд, що, в свою чергу, накладає вимоги щодо швидкості пересування такого робота на місцевості. Такої оперативності достатньо для прийняття рішень щодо стану мостових споруд.

#### Висновки до розділу 4

1. Запропоновані методи дистанційного контролю стану мостових споруд є ефективними для мостів, що перебувають в експлуатації. Для перспективних “розумних” мостів їх застосування можливе, якщо для конкретної мостової споруди буде визначена просторово-часова реакція мосту на імпульсне навантаження (функція Гріна). Тоді динамічний стан споруди

доцільно описувати сумою реакцій мосту на вплив кожного транспортного засобу з відомою масою, визначеною на основі перспективних інформаційних технологій.

2. Розроблені методи прийняття рішення щодо стану мостової споруди не вимагають оперативності дій. Для перевірки розроблених методів, моделей та інформаційної технології в умовах швидкого реагування в розділі проведено аналіз їх реалізації в умовах навігації автономних мобільних роботів, що виконують завдання на незнайомій місцевості при відсутності GPS. При попередній підготовці статистичного матеріалу завдання виявлення апаратурою робота одинокого наземного орієнтиру на суцільному фоні дерев, кущів, будівель тощо може бути виконане з ймовірністю не менше 0,9 за 2-5 секунд.

3. Удосконалено метод пошуку та дистанційного отримання інформації про виявлення наземного орієнтира для навігації автономного мобільного робота на довільній місцевості, який відрізняється від відомих створенням динамічних просторових каналів виявлення орієнтиру за ознаками кольоровості, що забезпечує виділення орієнтирів на фоні природних та штучних об'єктів при накопиченні параметрів кольоровості каналів.

4. Удосконалено метод пошуку та дистанційного отримання інформації про виявлення наземного орієнтиру для навігації автономного мобільного робота на довільній місцевості, який відрізняється від відомих перенесенням оброблення інформації та прийняття рішення в функціональний простір ортогональних мод Гільберта-Хуанга, що практично забезпечує незалежність рішення від виду нестационарності вхідних процесів.

## ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи зводяться до наступного.

1. На прикладі мостових споруд проаналізовано наявні в світі та Україні інформаційні технології, що використовуються на подібних об'єктах в інтересах прийняття рішень щодо їх стану. З аналізу випливає, по-перше, необхідність розвитку на Україні методів дистанційного пошуку та збирання вимірювальної інформації про найбільш важливі параметри насамперед тих технічних об'єктів, які можуть чинити вплив на безпеку людини та екологію, а, по-друге, поступове впровадження інформаційних технологій для smart-систем, незважаючи на те, що для мостових споруд таких технологій в Україні ще не існує.

2. Створено математичні моделі процесів, що супроводжують дистанційний контроль мостових споруд під час стандартних та випадкових навантажень. Показано, що сигнали, які несуть інформацію про прогини мостових споруд в контрольних точках, є найчастіше нестационарними випадковими процесами, аналіз яких традиційними методами істотно ускладнений. Запропоновано представлення реалізацій нестационарних процесів в адаптивному базисі ортогональних мод Гільберта-Хуанга. Доведено шляхом математичного моделювання, що у переважній більшості випадків реалізації мод Гільберта-Хуанга є стаціонарними випадковими процесами, що суттєво спрощує аналіз сигналів і підвищує достовірність прийняття рішень про стан мостових споруд.

3. Удосконалено метод дистанційного збирання вимірювальної інформації від мостових споруд в інтересах автоматизованого прийняття рішень щодо стану цих об'єктів або їх елементів в типових умовах оброблення нестационарних сигналів. Для цього методу, а також для всіх розроблених в дисертації методів створені графічні інтерфейси користувача, що дозволяють наочно показати результат прийняття рішення. При використанні розробленого методу відносні похибки оцінювання отриманої інформації не

перевищують 10% при дотримуванні рекомендованих параметрів системи і умов роботи.

4. Удосконалено модель та метод оцінки сталості інформації в умовах нестаціонарності прогинів мостової споруди. Запропонована модель оцінювання сталості інформації дає рекомендації щодо застосування методів прийняття рішень про стан мостової споруди. При перевищенні встановленого критичного порогу сталості інформації, що свідчить про нестаціонарність вхідних впливів, рекомендовано розкладання реалізацій нестаціонарного процесу на ортогональні моди Гільберта-Хуанга і наступна оцінка сталості інформації кожної моди з подальшим прийняттям рішень. Після проведених експериментів на фізичній моделі мостової споруди отримано показник сталості від 0.9 до 0.98 для різних видів коливань МС під дією навантаження.

5. Удосконалено модель та метод визначення цінності інформації, що отримується при дистанційному вимірюванні прогинів мостових споруд. Метод дозволяє приймати рішення щодо стану об'єкта з урахуванням як середнього ризику, так і цінності інформації, що є новим для практики. Було з'ясовано для фізичної моделі мостової споруди, що максимальна цінність інформації, яка близька до одиниці, досягається для заданих параметрів і умов при порогових прогинах  $x_0 \leq 10$  мм, хоча середній ризик для таких значень  $x_0$  приймає великі значення порівняно з мінімальним. При мінімальному значенні середнього ризику порогове значення прогину складає  $x_0 \approx 15.5$  мм, а цінність інформації не є максимальною ( $V \approx 0.85$ ). Проведено оптимізацію порогового прогину мостової споруди на основі методу аналізу ієрархій, і отримано оптимальне значення прогину 14,9 мм. Отже, при розробці інформаційних технологій на великих мостах потрібно, з одного боку, для виконання умов безпеки мінімізувати середній ризик і, з іншого боку, вибирати найбільш цінну інформацію.

6. Набула подальшого розвитку інформаційна технологія дистанційного контролю технічних об'єктів, яка враховує нестаціонарність вхідних впливів. Основна відмінність її від існуючих технологій – відмова від використання

оброблення нестационарних сигналів шляхом розкладання реалізацій цих процесів на ортогональні моди Гільберта-Хуанга, які виявились в переважній більшості стаціонарними.

7. Показано, що розроблені методи, моделі та інформаційна технологія за своїми характеристиками у перспективі можуть бути використані у сфері виявлення мобільними автономними роботами орієнтиру для автономної навігації. Наприклад, автором розроблено метод і модель накопичення параметрів кольоровості від наземного орієнтиру в просторових каналах на фоні майже суцільної за кольором навколишньої місцевості. Як і для мостових споруд, для виявлення орієнтирів використовується розкладання прийнятих реалізацій кольоровості зображення на моди Гільберта-Хуанга, що підвищує ймовірність виявлення наземних орієнтирів в складних ситуаціях не менше, ніж на 30 %. Оперативне прийняття рішень щодо стану технічного об'єкта досягається не тільки для мостової споруди, але і для швидкоплинних процесів при автономній навігації робота.

Отже, в дисертації розроблено моделі, методи та інформаційна технологія дистанційного контролю технічних об'єктів з нестационарними вихідними сигналами для автоматичного прийняття рішення щодо стану цих об'єктів. Метою роботи було підвищення якості прийняття автоматизованого рішення щодо стану мостових споруд. Розроблені в роботі методи, моделі створюють основу для прийняття оптимального рішення в заданих умовах, тобто його якість в цих умовах є найкращою за вибраними автором критеріями безпеки та цінності інформації і тому, за думкою автора, мету роботи можна вважати виконаною.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформаційні системи і технології. / П. М. Павленко та ін. Київ: НАУ, 2013. 323 с.
2. ГОСТ 27.001-95 Система стандартів «Надійність в техніці». Основні положення. [Введен с 1997-01-01]. Прийнят Міжгосударственным советом по стандартизації, метрології і сертифікації, 1995. 7 с.
3. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Споруди транспорту. Частина I. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 104 с. (Державні будівельні норми України).
4. Шеннон К. Роботи по теорії інформації і кібернетикі. Москва: Видавництво іноземної літератури, 1963. 830 с.
5. Харкевич А. А. О цінності інформації. Проблеми кібернетики. Вид. 4-е. Москва: Физматгиз, 1960. 54 с.
6. Бидерман В. Л. Теорія механічних коливань. Москва: Вища школа, 1980. 480 с.
7. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения / И. И. Овчинников и др. *Транспортные сооружения*. 2014. № 2. С. 1-32.
8. Baraka M. A., EL-SHAZLY A. H. Monitoring Bridge Deformations during Static Loading Tests Using GPS. *From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week*. 2005.
9. Li H., Ou J. A Remote Deformation Monitoring System for a Cable-Stayed Bridge Using Wireless Snternet-Based GPS Technology. *Civil Engineering*. 2006.
10. Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques / J. J. Lee et al. *Exp Mech* 46, 105. 2006. Vol. 114. DOI: 10.1007/s11340-006-6124-2.



11. Оптимальна система виявлення і оцінювання стрибків амплітуди вібрацій динамічних об'єктів / О. В. Полярус и др. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2009. № 6. С. 21-23.
12. Полярус О. В., Барчан В. В. Коливання навісного обладнання при динамічних випробуваннях мостових конструкцій. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 3. С. 49-51.
13. ДСТУ 2226-93. Автоматизовані системи. [Чинний від 01.07.1994] Вид. офіц. Київ, 1993. 91с. (Терміни та визначення).
14. ДСТУ 2481-94. Інтелектуальні інформаційні технології. [Чинний від 01.01.1995] Вид. офіц. Київ, 1994. 38 с. (Терміни та визначення).
15. ДСТУ 3396.2-97 Захист інформації. Технічний захист інформації. [Чинний від 1998-01-01] Вид. офіц. Київ, 1997. 11 с. (Терміни та визначення).
16. Davis S. W., Yen D. C. The information system consultant's handbook. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1998. 800 p.
17. ДСТУ ISO/IEC 2382:2015 Інформаційні технології. [Чинний від 2019-01-01] Вид. офіц. Київ: Технічний комітет стандартизації «Інформаційні технології». (Словник термінів).
18. Експлуатація і реконструкція мостів. / Н. Є. Страхова та ін. Вид. 2-ге. Київ: Транспортна академія України, 2002. 408 с.
19. ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. [Чинний від 2009-11-11]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 66 с. (Державні будівельні норми України).
20. American Society of Civil Engineering (ASCE). Infrastructure Report Card. Reston: ASCE, 2017. 112 p.
21. Kratky R. J. Assessment of Performance of Vital Long-Span Bridges in the United States. Ohio: American Society of Civil Engineers, 2004. 42 p.
22. Frangopol D. M. Bridge Safety and Reliability. Ohio: Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, 1999. 239 p.

23. Павлиш В. А., Гліненко Л. К., Шаховська Н. Б. Основи інформаційних технологій і систем: підручник. Львів: Львівська політехніка, 2018. 620 с.

24. Информационные технологии в строительстве / В. Т. Минченя и др. *Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты*. 2015. С. 174-182.

25. Овчинников И. Г., Косауров А. П., Суров Д. И. Непрерывный удаленный мониторинг и диагностика технического состояния мостов. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2019. Т. 9, № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nepreryvnyu-udalennyu-monitoring-i-diaagnostika-tehnicheskogo-sostoyaniya-mostov> (дата звернення: 03.02.2021).

26. Peeters B., Maeck J. Guido De Roeck Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects. *Smart materials and structures*.. 2000. Vol. 10. P. 518-527.

27. Forced and ambient vibration testing of full-scale bridges. / P. Omenzetter et al. Auckland: The University of Auckland, 2013. 206 p.

28. Pakzad S. N., Fenves G. L. Statistical Analysis of Vibration Modes of a Suspension Bridge Using Spatially Dense Wireless Sensor Network. *Journal of Structural Engineering*. 2009. Vol. 135. P. 863-872.

29. Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 124207 Україна. № 201710597; заявл. 01.11.2017; опубл. 26.03.2018.

30. Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 118730 Україна. № 201710596; заявл. 01.11.2017; опубл. 25.02.2019.

31. Спосіб дистанційного визначення динамічних прогинів і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних

об'єктів: пат. 146478 Україна. № 202005999; заявл. 21.09.2020; опубл. 24.02.2021.

32. Gentile C. Application of Microwave Remote Sensing to Dynamic Testing of Stay-Cables. *Remote Sensing*. 2010. Vol. 2. P. 36-51.

33. Spencer B. F., Hoskere V., Narazaki Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. *Engineering*. 2019. № 5. P. 199-222.

34. Noncontact Deflection Distribution Measurement for Large-Scale Structures by Advanced Image Processing Technique / S. Ri et al. *Materials Transactions*. 2012. Vol. 53, № 2. P. 323-329.

35. Riveiro B., Lindenbergh R. Laser Scanning: An Emerging Technology in Structural Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2019. 270 p.

36. Kaloop M. R., Hu J. W. Dynamic performance analysis of the towers of a long-span bridge based on GPS monitoring technique. *Journal of Sensors*. 2016. DOI: 10.1155/2016/7494817.

37. Zhou X., Zhang X. Thoughts on the Development of Bridge Technology in China. *Engineering*. 2019. Vol. 5. P. 1120–1130.

38. Suchocki C., Błaszczak-Bąk W. Down-Sampling of Point Clouds for the Technical Diagnostics of Buildings and Structures. *Geosciences*. 2019. Vol. 9, № 2. P. 70. DOI: 10.3390/geosciences9020070.

39. Pipinato A. Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. 878 p.

40. Measurement of the Bridge Surface Deflections Using Near-Field Amplitude of Secondary Radiators System / O. V. Poliarus et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, № 6. P. 217-224.

41. A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions / M. Rashidi et al. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 22. P. 3796. DOI: 10.3390/rs12223796.

42. Poliarus O. V., Poliakov Y. A., Lebedynskiy A. V. Measurement of Bridges Dynamic Deflections Using Arrays of Secondary Radiators. *IEEE Ukrainian Microwave week (UkrMW)*. 2020. № 1. P. 97-100.

43. Колмогоров А. Н., Фомин С. Н. Элементы теории функций и функционального анализа. Москва: Наука, 1976. 544 с.

44. Identification of a nonlinear inertial measuring pressure channel / O. Poliarus et al. *Ukrainian Metrological Journal*. 2019. № 1. P. 63-70.

45. Полярус О. В., Поляков Є. О., Барчан В. В. Методика підвищення точності вимірювань вібропереміщень машини на основі комплексування вимірювачів. *Технологія приборостроєння*. 2012. № 1. С. 25-29.

46. Design and Development of an Electronic Sensor to Detect and Measure Curvature of Spaces Using Curvature Energy / F. Bulnes et al. *Journal of Sensor Technology*. 2012. Vol. 2012, № 2. P. 116-126.

47. Full field measurements of curvature using coherent gradient sensing: application to thin film characterization / A. J. Rosakis et al. *Elsevier. Thin Solid Films*. 1998. Vol. 325. P. 42-54.

48. Łukianowicz Cz., Karpiński T. Optical system for measurement of surface form and roughness. *Measurement Science Review*. 2001. Vol. 1, № 1. P. 151-154.

49. Determination of surface waviness using radius of curvature measurement with laser scanning technique / T. Pienkos et al. *Optica Applicata*. 2005. Vol. 35, № 3. P. 503-507.

50. Adams P. M. Curvature measurements of stressed surface-acoustic-wave filters using Bragg angle contour mapping. *Advances in X-ray Analysis*. 2003. Vol. 46. P. 86-91.

51. Parra-Denis E., Moulin N., Jeulin D. Three-dimensional complex shapes analysis from 3D local curvature measurements. Application to intermetallic particles in aluminium alloy 5XXX. *Image Analysis & Stereology*. 2007. Vol. 26. P. 157-164.

52. Drăgut Lw., Blaschke T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Elsevier. Geomorphology*. 2006. Vol. 81. P. 330-344.
53. Mérigot Q., Ovsjanikov M., Guibas L. Voronoi-based Curvature and Feature Estimation from Point Clouds. *IEEE Transactions on Visualisation and Computer Graphics*. 2010. Vol. 2010, № 8. P. 1-14.
54. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. Москва: Сов. радио, 1972. 464 с.
55. Huang Y., Boyle K. Antennas from theory to practice. New York: Wiley, 2008. 379 p.
56. Poliarus O. V., Poliakov Y. A., Lebedynskyi A. V. Measurement of Bridges Dynamic Deflections Using Arrays of Secondary Radiators. *IEEE Ukrainian Microwave week (UkrMW)*. 2020. № 1. P. 97-100.
57. Cardno C. A. Smart Bridges. *The Magazine of the American Society of Civil Engineers*. 2020. P. 2020. URL: <https://www.asce.org/cemagazine/smart-bridges/> (date of access: 04.05.2021).
58. N. Huang and S. Shen. Hilbert–Huang Transform and Its Applications. - *Interdisciplinary Mathematical Sciences*, 2014.
59. Detection in Arbitrarily Oriented Subspaces / H. Kriegel et al. *IEEE 12th International Conference on Data Mining*. 2012. P. 2012.
60. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. Москва: Сов. радио, 1970. 560 с.
61. Poliarus O., Poliakov Y., Lebedynskyi A. Detection of landmarks by autonomous mobile robots using camera-based sensors in outdoor environments. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, № 10. P. 11443-11450. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3010883.
62. Fuchs C. Information Technology and Sustainability in the Information Society. *International Journal of Communication*. 2017. Vol. 11. P. 2431–2436.

63. Machado M. C., Flavio H. J., Sobra F. A. Sustainability in information technology: an analysis of the aspects considered in the model COBIT. *JISTEM J. Inf. Syst. Technol. Manag.* 2017. № 14. P. 154-178..

64. Nolin J. Sustainable information and information science. *Information research (an international electronic journal)*. 2010. Vol. 15. P. 1368–1613.

65. Стійкість систем. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Стійкість\\_систем](https://uk.wikipedia.org/wiki/Стійкість_систем) (дата звернення: 17.02.2021).

66. Kadota T. T. On the Information Stability of Stationary Ergodic Processes. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1974. Vol. 1974, № 26. P. 176–182.

67. Glazer R. Measuring the Value of Information: The Information-Intensive Organization. *IBM Systems Journal*. 1993. P. 99–110.

68. Weill P. The Relationship Between Investment in Information Technology and Firm Performance: A Study of the Valve Manufacturing Sector. *Graduate School of Management, University of Melbourne*. 1990.

69. Стратонович Р. Л. Теория информации. Москва: Сов. радио, 1975. 424 с.

70. Czerniawski T., Leite F. Automated digital modeling of existing buildings: A review of visual object recognition methods. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 113. P. 103-131.

71. Биргер И. А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. 240 с.

72. Корогодина В. И., Корогодина В. Л. Информация как основа жизни. Дубна: Феникс, 2000. 208 с.

73. Rashidi M., Samali B. A new model for bridge management: Part A: Condition assessment and priority ranking of bridges. *Aust. J. Civ. Eng.*. 2016. № 14. P. 35-45.

74. Piezoelectric Actuated Phase Shifter Based on External Laser Interferometer: Design / Peng-Zhi Li et al. *Control and Experimental Validation. – Sensors*. 2017. Vol. 17, № 4. P. 838. DOI:10.3390/s17040838

75. Piezo-controlled Dielectric Phase Shifter / Moongi Jeong et al. *Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, 2006. Vol. 6, № 1. P. 1-8.

76. Poliarus O. V. Perspectives of the Green's functions using for estimation of bridges state. *Мости, тунелі і дороги: стан, проблеми утримання та перспективи підвищення довговічності* : матеріали Всеукраїнської наук.-практ. інтернет-конф., м. Харків, 25 травня 2018 р. Харків, 2018. С. 204-205.

77. Poliarus O., Poliakov Y., Lindner L. Determination of landmarks by mobile robot's vision system based on detecting abrupt changes of echo signals parameters. *IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. P. 3165-3170.

78. Analyses of Motor-grader Loading on the Basis of Fractal Dimension / A. V. Polyarus et al. *Automobile Transport Collection of Scientific Works*, KHNADU. 2016. № 39. P. 25-27.

79. Спосіб виявлення циліндроподібних наземних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів: пат. 146486 Україна. № 202006061; заявл. 22.09.2020; опубл. 24.02.2021.

80. Hodge V., Austin J. A Survey of Outlier Detection Methodologies. *Artificial Intelligence Review*. 2004. Vol. 22, № 2. P. 85-126.

81. Полярус О. В., Лебединський А. В. Дистанційне визначення діелектричної проникності бетонної плити мостової споруди. *Технология приборостроения, научно-технический журнал*. 2019. № 2. С. 62-65

82. Спосіб виявлення циліндроподібних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів: пат. 146487 Україна. № 202006062; заявл. 22.09.2020; опубл. 24.02.2021.

83. Influence of Measurements Uncertainty on Uncertainty of Gilbert-Huang Transform Modes / O. Poliarus et al. *Proceedings of 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019, Sozopol, Bulgaria, 6-8 September, 2019, pp.* 2019. P. 644-647. DOI: 10.1109/caol46282.2019.9019512.

ДОДАТОК А МЕТОД ДИСТАНЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ  
ДИЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ НИЖНЬОЇ ПОВЕРХНІ БЕТОННИХ  
МОСТОВИХ СПОРУД

Метод припускає використання тільки двох приймальних елементів  $P_1$  та  $P_2$  на деякій відстані від випромінюючого елемента  $M_1$ , який є вторинним і підвішується на нижній поверхні мостової споруди на відстані  $h$  від бетонної плити (рис. А.1), яка в свою чергу розміщена на висоті  $H$  над поверхнею води чи землі. В першому приймальному елементі створюється комплексна амплітуда напруженості поля  $\dot{E}_1$ , а в другому –  $\dot{E}_2$ , які описуються відомими формулами [54]:

$$\dot{E}_1 = \frac{A}{r_1^*} e^{-jkr_1^*} + \frac{A}{r_1} R_{\text{вз1}}(\varepsilon) e^{-jkr_1}, \quad (\text{A.1})$$

$$\dot{E}_2 = \frac{A}{r_2^*} e^{-jkr_2^*} + \frac{A}{r_2} R_{\text{вз2}}(\varepsilon) e^{-jkr_2}, \quad (\text{A.2})$$

де  $A$  – амплітуда поля, що випромінюється кожним вторинним випромінювачем;

$r_1^*$  – відстань між випромінювачем  $M_1$  та першим приймальним елементом  $P_1$ ;

$r_2^*$  – відстань між випромінювачем  $M_1$  та другим приймальним елементом  $P_2$ ;

$r_1$  – відстань між дзеркальним випромінювачем  $M_2$  та першим приймальним елементом  $P_1$ ;

$r_2$  – відстань між дзеркальним випромінювачем  $M_2$  та другим приймальним елементом  $P_2$ ;



$R_{\epsilon z1}(\epsilon)$  – комплексний коефіцієнт відбиття ЕМХ (ЕМХ) вертикальної (в) або горизонтальної (г) поляризації від бетонної плити мостової споруди, що має відносну діелектричну проникність  $\epsilon$  (для напрямку на перший приймальний елемент  $P_1$ );

$R_{\epsilon z2}(\epsilon)$  – комплексний коефіцієнт відбиття ЕМХ (ЕМХ) вертикальної (в) або горизонтальної (г) поляризації від бетонної плити мостової споруди, що має відносну діелектричну проникність  $\epsilon$  (для напрямку на другий приймальний елемент  $P_2$ ).

Дзеркальний випромінювач  $M_2$  є віртуальним. Він створює ЕМХ, що за своїми параметрами однакова з ЕМХ, яка відбивається від поверхні бетонної плити МС. Інформація про відносну діелектричну проникність  $\epsilon$  міститься в коефіцієнтах відбиття ЕМХ  $R_{\epsilon z1}(\epsilon)$  і  $R_{\epsilon z2}(\epsilon)$ . Абсолютна діелектрична проникність  $\epsilon_a$  поверхні бетонної плити визначається як добуток відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  на абсолютну діелектричну проникність вакууму  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{\Phi}{м}$ . Отже, в корисній моделі достатньо визначити відносну діелектричну проникність  $\epsilon$  поверхневого шару бетону МС.

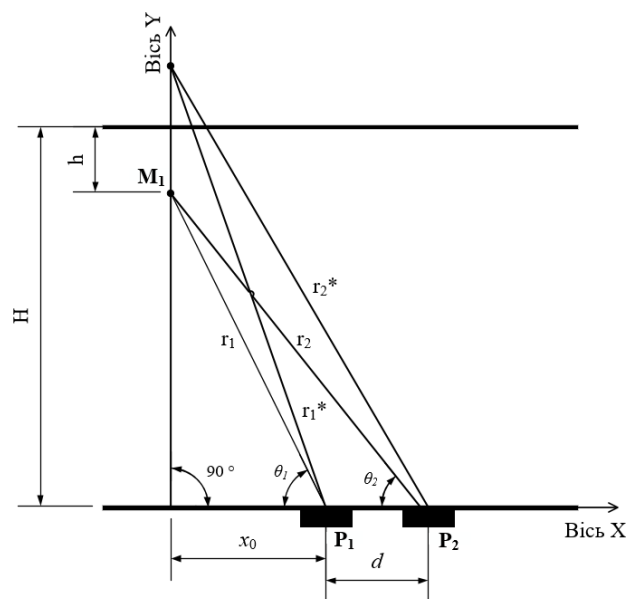


Рисунок А.1 – Схема розміщення приймачів та вторинних випромінювачів

Напишемо вирази (A.1) і (A.2) у вигляді:

$$\dot{E}_1 = \alpha_1 + R_{\epsilon z1}(\epsilon)\beta_1, \quad (\text{A.3})$$

$$\dot{E}_2 = \alpha_2 + R_{\epsilon z2}(\epsilon)\beta_2, \quad (\text{A.4})$$

$$\text{де } \alpha_1 = \frac{A}{r_1^*} e^{-jkr_1^*}, \quad \alpha_2 = \frac{A}{r_2^*} e^{-jkr_2^*}, \quad \beta_1 = \frac{A}{r_1} e^{-jkr_1}, \quad \beta_2 = \frac{A}{r_2} R_{\epsilon z2}(\epsilon) e^{-jkr_2}. \quad (\text{A.5})$$

Розділимо вираз (A.3) на співвідношення (A.4), при умові, що останнє не дорівнює нулю (а це завжди можна перевірити), і отримаємо

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{\alpha_1 + R_{\epsilon z1}(\epsilon)\beta_1}{\alpha_2 + R_{\epsilon z2}(\epsilon)\beta_2}. \quad (\text{A.6})$$

Звідси маємо

$$\dot{\alpha}_2 \dot{E}_1 - \dot{\alpha}_1 \dot{E}_2 = \dot{\beta}_1 \dot{E}_2 \dot{R}_{\epsilon z1}(\epsilon) - \dot{\beta}_2 \dot{E}_1 \dot{R}_{\epsilon z2}(\epsilon) \text{ або } \dot{\delta} = \dot{\gamma}_1 \dot{R}_{\epsilon z1}(\epsilon) - \dot{\gamma}_2 \dot{R}_{\epsilon z2}(\epsilon), \quad (\text{A.7})$$

$$\text{де } \dot{\delta} = \dot{\alpha}_2 \dot{E}_1 - \dot{\alpha}_1 \dot{E}_2, \quad \dot{\gamma}_1 = \dot{\beta}_1 \dot{E}_2, \quad \dot{\gamma}_2 = \dot{\beta}_2 \dot{E}_1. \quad (\text{A.8})$$

Точки над буквами означають, що відповідні величини є комплексними.

Підставляємо в (A.8) вираз для коефіцієнтів відбиття, наприклад, для горизонтальної поляризації ЕМХ [54] і маємо

$$\dot{\delta} = \dot{\gamma}_1 \frac{\sin \theta_1 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_1}}{\sin \theta_1 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_1}} - \dot{\gamma}_2 \frac{\sin \theta_2 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_2}}{\sin \theta_2 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_2}}. \quad (\text{A.9})$$

Нелінійне рівняння (A.9) містить одне невідоме значення – відносну діелектричну проникність бетону  $\epsilon$ .

Аналогічно розв'язується задача для вертикальної поляризації ЕМХ. Вираз для коефіцієнту відбиття хвиль вертикальної поляризації є в [54].

Діелектрична проникність  $\varepsilon$  знаходиться у цьому випадку з нелінійного рівняння (А.10)

$$\delta = \dot{\gamma}_1 \frac{\varepsilon \cdot \sin \theta_1 - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta_1}}{\varepsilon \cdot \sin \theta_1 + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta_1}} - \dot{\gamma}_2 \frac{\varepsilon \cdot \sin \theta_2 - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta_2}}{\varepsilon \cdot \sin \theta_2 + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta_2}}. \quad (\text{А.10})$$

Для перевірки роботи даного методу було проведено моделювання відносної діелектричної проникності в математичному пакеті MatLab для відомих значень амплітуд напруженості полів  $\dot{E}_1$  та  $\dot{E}_2$  в двох приймальних антенах та відстанях і кутах, що характеризують геометрію задачі (рис. А.7):  $r_1^* = 36.1$  м,  $r_2^* = 28.3$  м,  $r_1 = 36.6$  м,  $r_2 = 29$  м,  $\theta_1 = 46^\circ$ ,  $\theta_2 = 36^\circ$ .

На рис. А.2 та рис. А.3 [83] приведені приклади залежності похибок визначення відносної діелектричної проникності від похибок вимірювання амплітуд напруженості електричного поля в двох приймальних елементах для горизонтальної та вертикальної поляризації ЕМХ. Щоб похибки вимірювання діелектричної проникності не перевищували 10%, похибки вимірювання амплітуди напруженості поля не повинні виходити за межі 4%. При підвищенні рівня зовнішніх завад вимоги щодо точності вимірювання амплітуди поля зростають і тому перед проведенням вимірювань треба впевнитись в низькому рівні таких завад.

Як видно з формул (3) – (5), діелектрична проникність залежить від довжини хвилі або частоти. Залежності похибки вимірювання  $\varepsilon$  від нестабільності відносної частоти передавача  $\frac{\Delta f}{f}$  для горизонтальної та вертикальної поляризації ЕМХ приведені на рис. 4.

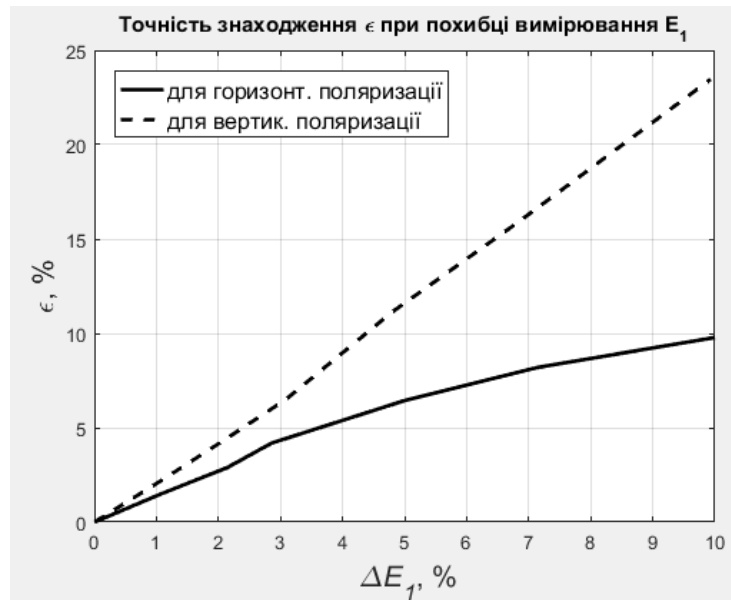


Рисунок 2 – Залежність похибки визначення відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  поверхні мостової споруди від відносної похибки вимірювання амплітуди поля  $\Delta E_1$

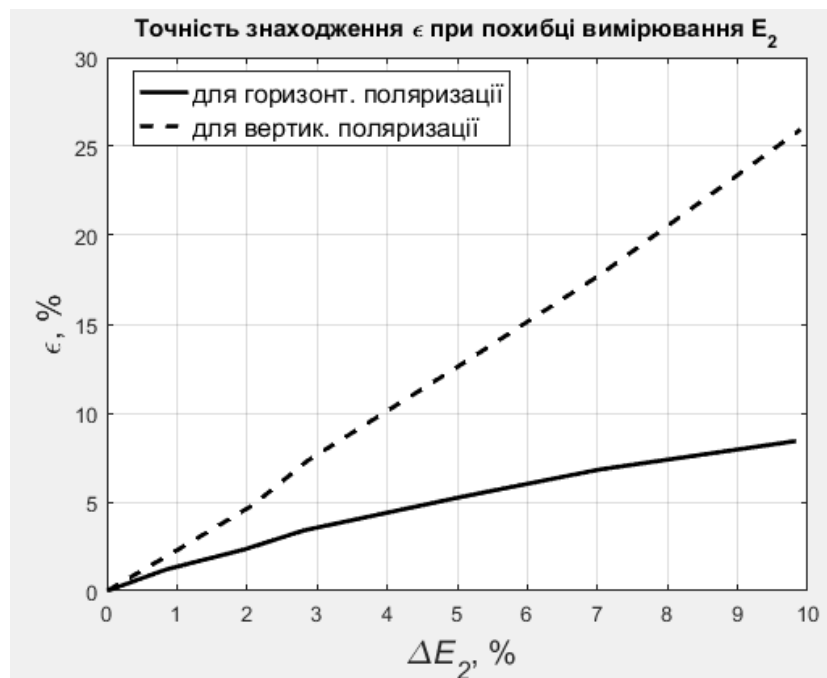


Рисунок 3 – Залежність похибки визначення відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  поверхні мостової споруди від відносної похибки вимірювання амплітуди поля  $\Delta E_2$

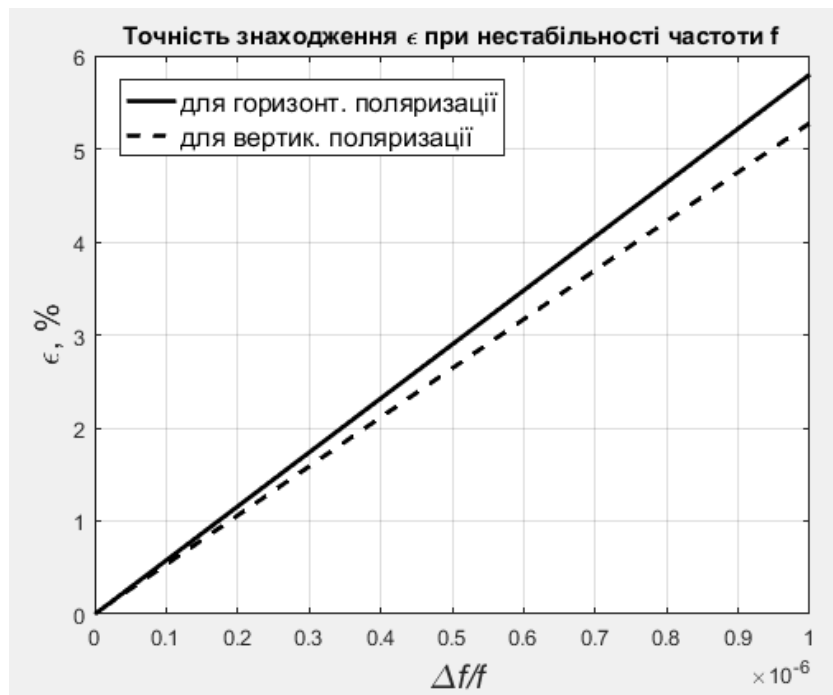


Рисунок 4 – Залежність похибки визначення відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  поверхні МС від відносної нестабільності частоти  $\Delta E_2$

Отже, нестабільність частоти передавача, який генерує ЕМХ, не повинна перевищувати приблизно  $10^{-6}$ , що, як правило, виконується на практиці. Даний метод дозволяє оцінити діелектричну проникність бетону з урахуванням арматури всередині нього, оскільки поле формується відбиттям від поверхні плити МС. Представлений підхід може використовуватись для дистанційного визначення поточного значення діелектричної проникності бетонних мостових конструкцій або інших великогабаритних об'єктів з похибками, які є допустимими для практичного використання. Дистанційні вимірювання значно скорочують часові витрати на проведення експериментів і попереднього математичного моделювання прогинів МС.

## ДОДАТОК Б ОТРИМАНІ ПАТЕНТИ







НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146478** (13) **U**  
(51) МПК  
**G01B 15/06** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2020 05999</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>21.09.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>25.02.2021</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>24.02.2021, Бюл.№ 8</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Полярус Олександр Васильович (UA), Поляков Євген Олександрович (UA), Лебединський Андрій Володимирович (UA), Медведовська Яна Сергіївна (UA), Грайворонська Інна Валеріївна (UA), Янушкевич Сергій Дмитрович (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці): <b>ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002 (UA), Полярус Олександр Васильович, вул. Наталії Ужвій, 86, кв. 81, м. Харків, 61195 (UA), Поляков Євген Олександрович, вул. Тракторобудівників, 102-а, кв. 57, м. Харків, 61118 (UA), Лебединський Андрій Володимирович, вул. Державінська, 2, кв. 310, м. Харків, 61001 (UA), Медведовська Яна Сергіївна, вул. Маршала Батицького, 20, к. 259, 260, м. Харків, 61038 (UA), Грайворонська Інна Валеріївна, вул. Садовий проїзд, 20, кв. 64, м. Харків, 61100 (UA), Янушкевич Сергій Дмитрович, пров. Титаренківський, 4, кв. 34, м. Харків, 61064 (UA)</b></p>
--	---

**UA 146478 U**

**(54) СПОСІБ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОГИНІВ І ФОРМИ ДЕФОРМОВАНОЇ ПОВЕРХНІ МОСТОВИХ СПОРУД АБО ІНШИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ****(57) Реферат:**

Спосіб дистанційного визначення динамічних прогинів і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів полягає в тому, що поверхню спочатку ненавантаженої, а потім навантаженої мостової споруди або іншого об'єкта, на якій попередньо встановлюють вторинні випромінювачі на однакових відстанях один від одного, які створюють передавальну антенну решітку, опромінюють електромагнітною хвилею, вимірюють амплітуди відбитих електромагнітних хвиль у визначених просторових точках, на будь-яких відстанях (сумірних з висотою розміщення мостової споруди), що є зручними для оператора. А для вимірювання використовують приймальну лінійну антенну решітку, на виходах кожного з елементів решітки вимірюють сумарну амплітуду поля хвиль, що випромінюються елементами передавальної антенної решітки, а для визначення прогинів створюють функціонал у вигляді





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146486** (13) **U**  
 (51) МПК  
**H04N 1/56** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2020 06061</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>22.09.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>25.02.2021</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>24.02.2021, Бюл.№ 8</b></p>	<p>(72) Винахідник(и):  <b>Полярус Олександр Васильович (UA),          Поляков Євген Олександрович (UA),          Лебединський Андрій Володимирович (UA),          Медведовська Яна Сергіївна (UA),          Коваль Олександр Андрійович (UA),          Богатов Олег Ігоревич (UA),          Купко Олександр Данилович (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володілці):  <b>ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ          АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ          УНІВЕРСИТЕТ,          вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002 (UA),          Полярус Олександр Васильович,          вул. Наталії Ужвій, 86, кв. 81, м. Харків,          61195 (UA),          Поляков Євген Олександрович,          вул. Тракторобудівників, 102-а, кв. 57, м.          Харків, 61118 (UA),          Лебединський Андрій Володимирович,          вул. Державінська, 2, кв. 310, м. Харків,          61001 (UA),          Коваль Олександр Андрійович,          вул. Краснодарська, 171-а, кв. 28, м. Харків,          61176 (UA),          Медведовська Яна Сергіївна,          вул. Маршала Батицького, 20, к. 259, 260, м.          Харків, 61038 (UA),          Богатов Олег Ігоревич,          вул. Цілиноградська, 48-в, кв. 7, м. Харків,          61202 (UA),          Купко Олександр Данилович,          вул. Маршала Рибалка, 24/17, кв. 80, м.          Харків, 61099 (UA)</b></p>
--	---

**UA 146486 U**
**(54) СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ЦИЛІНДРОПОДІБНИХ НАЗЕМНИХ ОРІЄНТИРІВ ПРИ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ****(57) Реферат:**

Спосіб виявлення циліндроподібних наземних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів полягає в тому, що з пікселів матриці відеокамери, яка встановлена на роботі, знімають три сигнали в цифровому вигляді, що пропорційні інтенсивності червоного, зеленого та синього кольорів зображення. Шляхом порівняння інтенсивності кольорів виділяють вузькі області у вертикальній площині матриці пікселів, в яких є істотна відмінність інтенсивності кольору від інших областей. Значення інтенсивності червоного, зеленого та синього кольорів в кожному



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146487** (13) **U**  
 (51) МПК  
*H04N 1/56 (2006.01)*

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2020 06062</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>22.09.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>25.02.2021</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>24.02.2021, Бюл.№ 8</b></p>	<p>(72) Винахідник(и):  <b>Полярус Олександр Васильович (UA),          Поляков Євген Олександрович (UA),          Лебединський Андрій Володимирович (UA),          Медведовська Яна Сергіївна (UA),          Коваль Андрій Олександрович (UA),          Купко Олександр Данилович (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці):  <b>ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ          АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ          УНІВЕРСИТЕТ,          вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002 (UA),          Полярус Олександр Васильович,          вул. Наталії Ужвій, 86, кв. 81, м. Харків,          61195 (UA),          Поляков Євген Олександрович,          вул. Тракторобудівників, 102-а, кв. 57, м.          Харків, 61118 (UA),          Лебединський Андрій Володимирович,          вул. Державінська, 2, кв. 310, м. Харків,          61001 (UA),          Коваль Андрій Олександрович,          вул. Краснодарська, 171-а, кв. 28, м. Харків,          61176 (UA),          Медведовська Яна Сергіївна,          вул. Маршала Батицького, 20, к. 259, 260, м.          Харків, 61038 (UA),          Купко Олександр Данилович,          вул. Маршала Рибалка, 24/17, кв. 80, м.          Харків, 61099 (UA)</b></p>
--	--

**UA 146487 U**

**(54) СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ЦИЛІНДРОПОДІБНИХ ОРІЄНТИРІВ ПРИ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ****(57) Реферат:**

Спосіб виявлення циліндроподібних наземних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів полягає в тому, що з пікселів матриці відеокамери, яка встановлена на роботі, знімають три сигнали в цифровому вигляді, що пропорційні інтенсивності червоного, зеленого та синього кольорів зображення. Шляхом порівняння інтенсивності кольорів виділяють вузькі області у вертикальній площині матриці пікселів, в яких є істотна відмінність інтенсивності кольору від інших областей. Сигнали інтенсивності червоного, зеленого та синього кольорів з кожного стовпця пікселів матриці зображення відеокамери складають і ділять на кількість пікселів у стовпці матриці, внаслідок чого середні значення інтенсивності трьох кольорів у кожному стовпці створюють розподіл інтенсивності червоного, зеленого та синього кольорів вздовж горизонтальної координати матриці, що відповідає конкретному зображенню відеокамери.

## ДОДАТОК В АКТ О ВПРОВАДЖЕННІ

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з наукової роботи ХНАДУ

проф. Ходирев С. Я.

« 1 » вересня 2021 р.



АКТ

використання результатів дисертаційної роботи

Лебединського Андрія Володимировича

«Моделі, методи та інформаційна технологія дистанційного контролю  
технічних об'єктів з нестаціонарними сигналами»

Напрацьований аспірантом Лебединським А. В. під час виконання дисертаційної роботи матеріал по інформаційним технологіям дистанційного контролю технічних об'єктів з нестаціонарними сигналами матеріал було використано для підготовки практичних занять, методичних вказівок та теоретичного курсу при викладенні навчальної дисципліни «Інноваційні напрямки технології експлуатації транспортних споруд».

Зав. каф. мостів, конструкцій  
та будівельної механіки  
ім. В. О. Російського, к.т.н., проф.

Бугаєвський С.О

## ДОДАТОК Г СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Полярус О. В., Лебединський А. В. Метод, модель та інформаційна технологія визначення сталості інформації при дистанційному контролі стану технічних об'єктів. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2021. № 92. DOI: 10.32620/oikit.2021.92.12.

*(Особистий внесок здобувача: реалізація методу визначення сталості інформації, створення графічного інтерфейсу користувача)*

2. Результати вимірювань параметрів механічних коливань балки з використанням РЛС міліметрового діапазону / Р. Е. Пащенко та ін. *Технология приборостроения, научно-технический журнал*. 2018. № 2. С. 55-59.

*(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів, обробка отриманих результатів)*

3. Полярус О. В., Лебединський А. В. Дистанційне визначення діелектричної проникності бетонної плити мостової споруди. *Технология приборостроения, научно-технический журнал*. 2019. № 2. С. 62-65.

*(Особистий внесок здобувача: реалізація методу визначення діелектричної проникності мостової споруди)*

4. Measurement of the Bridge Surface Deflections Using Near-Field Amplitude of Secondary Radiators System / A. V. Lebedynskiy et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, № 6. P. 217-224.

*(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів, обробка результатів експериментів, моделювання системи із вторинними випромінювачами, отримання результатів моделювання)*

5. Influence of Measurements Uncertainty on Uncertainty of Gilbert-Huang Transform Modes / A. Lebedynskiy et al. *Proceedings of 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019, Sozopol, Bulgaria, 6-8 September, 2019, pp.* 2019. P. 644-647. DOI: 10.1109/caol46282.2019.9019512.

*(Особистий внесок здобувача: аналіз впливу невизначеності вимірювань сигналу на невизначеність його мод Гільберта-Хуанга, моделювання залежностей мод при ідентифікації систем, отримання результатів моделювання).*

6. Poliarus O. V., Poliakov Y. A., Lebedynskyi A. V. Measurement of Bridges Dynamic Deflections Using Arrays of Secondary Radiators. *IEEE Ukrainian Microwave week (UkrMW)*. 2020. № 1. P. 97-100.

*(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів, обробка результатів експериментів, моделювання системи із вторинними випромінювачами, отримання результатів моделювання)*

7. Poliarus O., Poliakov Y., Lebedynskyi A. Detection of landmarks by autonomous mobile robots using camera-based sensors in outdoor environments. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, № 10. P. 11443-11450. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3010883.

*(Особистий внесок здобувача: проведення розкладання зображень фону та орієнтиру на складові кольоровості, створення графіків залежностей, знаходження законів розподілення ймовірностей, отримання результатів моделювання)*

8. Poliarus O. V., Lebedynskyi A. V. Method for Determining Information Stability in Information Technologies at Technical Objects. *Computer technology and mechatronics* : proceedings of the third international scientific and methodical conference, Kharkiv, 27-28 May 2021. Kharkiv: KhNAHu, 2021. P. 145-147.

*(Особистий внесок здобувача: доповідав та брав участь у обговоренні результатів, реалізував метод визначення сталості інформації, підготував основну частину тексту)*

9. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Lebedynskyi A. V. Method of determining measurement information value for bridges safety. *Проблеми надзвичайних ситуацій. Матеріали конференції*. : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations», м. Харків, 20-21

травня 2021. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2021. С. 77-78.

*(Особистий внесок здобувача: доповідав та брав участь у обговоренні результатів, реалізував метод визначення цінності інформації, підготував основну частину тексту)*

10. Полярус О. В., Краснов С. М., Лебединський А. В. Метод дистанційного визначення коефіцієнта динамічності мостової споруди вимірювальною інформаційною системою малої вартості. *Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи* : Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи» (МІВТС-2020), г. Харків, 28-29 січня 2020. Харків: Український метрологічний журнал, 2020. С. 110-111.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, промодельовав метод визначення коефіцієнта динамічності мостової споруди вимірювальною інформаційною системою малої вартості, підготував основну частину тексту)*

11. Лебединський А. В. Оцінка стаціонарності за допомогою методу зворотного розподілення. *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах* : Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Харків, 4-5 листопада 2019. Харків: ХНАДУ, 2019. С. 173-175. URL: [https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/58643/mod\\_resource/content/1/sbornik\\_konf\\_2019.pdf](https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/58643/mod_resource/content/1/sbornik_konf_2019.pdf). (дата звернення: 19.11.2020).

12. Лебединський А. В. *Застосування перетворення Гільберта-Хуанга в ІТ-технологіях. Комп'ютерні технології і мехатроніка* : Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні технології і мехатроніка», м. Харків, 28-29 Травня 2020. Харків: ХНАДУ, 2020. С. 114-117.

13. Лебединський А. В., Янушкевич С. Д. Оцінка точності апроксимації нестаціонарних сигналів емпіричними модами Гільберта-

Хуанга. *Комп'ютерні технології і мехатроніка* : Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні технології і мехатроніка», м. Харків, 30-31 Травня 2019. Харків: ХНАДУ, 2019. С. 109-112.

*(Особистий внесок здобувача: доповідав та брав участь у обговоренні результатів, оцінив точність апроксимації нестационарних сигналів емпіричними модами Гільберта-Хуанга, побудував графіки, підготував основну частину тексту)*

14. Lebedynskyi A. V. Hilbert-Huang Transform and its Application. *Студентство. Наука. Іноземна мова* : Збірник наукових праць студентів, аспірантів та молодих науковців, м. Харків, 20-21 Травня 2019. Харків: ХНАДУ, 2019.

15. Лебединський А. В. Подготовка экспериментальных данных колебания модели балки моста к обработке. *Мости, тунелі і дороги: стан, проблеми утримання та перспективи підвищення довговічності* : Всеукраїнська науково-практична Інтернет конференція, м. Харків, 25-26 March 2018. Харків: ХНАДУ, 2018. URL: [https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/49375/mod\\_resource/content/2/СБОРН\\_ИК.pdf](https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/49375/mod_resource/content/2/СБОРН_ИК.pdf). (дата звернення: 25.08.2021).

16. Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 124207 Україна. № 201710597; заявл. 01.11.2017; опубл. 26.03.2018.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

17. Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 118730 Україна. № 201710596; заявл. 01.11.2017; опубл. 25.02.2019.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

18. Спосіб дистанційного визначення динамічних прогинів і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів: пат. 146478 Україна. № 202005999; заявл. 21.09.2020; опубл. 24.02.2021.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

19. Спосіб виявлення циліндроподібних наземних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів: пат. 146486 Україна. № 202006061; заявл. 22.09.2020; опубл. 24.02.2021.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*

20. Спосіб виявлення циліндроподібних орієнтирів при навігації автономних мобільних роботів: пат. 146487 Україна. № 202006062; заявл. 22.09.2020; опубл. 24.02.2021.

*(Особистий внесок здобувача: брав участь у обговоренні результатів, підготував основну частину тексту, провів моделювання, отримав і обробив результати моделювання)*