

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ННІ «ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРАБАНОВ СТАНІСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК [351.785(699.852):622.8] (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД З
УРАХУВАННЯМ МЕТОДУ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ**

26 Цивільна безпека

263 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



С.С. Барабанов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Бєліков А.С., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Барабанов С.С. Забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням методу віброакустичного контролю. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека». – Навчально-науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій, Дніпро, 2024.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою в галузі охорони праці та цивільної безпеки, у якій дано рішення актуального науково-технічного завдання з встановлення закономірностей змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості у будівельних конструкціях, а також удосконалення методів, розробки алгоритмів і моделей керування віброакустичними коливаннями із заданими амплітудними та частотними характеристиками для визначення прихованої пошкодженості в елементах будівельних конструкцій віброакустичним методом, що має суттєве значення для підвищення безпеки й ефективності експлуатації будівель і споруд.

У вступі наведено актуальність теми, мету дослідження, наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача та апробацію результатів досліджень.

У першому розділі проведено аналіз стану безпеки будівель і споруд при тривалій експлуатації з урахуванням руйнівних впливів вибухів та пожеж. Встановлено, що в умовах застарілого жилого фонду будівель і великої кількості надзвичайних ситуацій, які активізуються динамічними впливами від вибухів і пожеж, безумовно необхідно проводити контроль стійкості та безпеки об'єктів для оцінки їхньої придатності до подальшої експлуатації. Це відноситься як до самих інфраструктурних об'єктів безпосередньо, в ролі яких можуть виступати виробничі цехи, споруди, тунелі та інше, так і до житлових будинків. Аналіз показав, що накопичення внутрішніх пошкоджень в несучих стінах та фундаментах будівель є однією з найбільш поширених ознак потенційного руйнування в процесі експлуатації. Для моніторингу і діагностики пошко-

джень добре зарекомендував себе віброакустичний метод контролю, який був апробований в різних умовах і дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін перекриттів та інших видів конструкцій. Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів, кількісної оцінки накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень необхідна розробка автоматизованого збуджувача складних коливань і вдосконалення методу ідентифікації прихованих пошкоджень віброакустичним методом. На основі проведеного аналізу було сформульовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі проведено ідентифікацію структурних порушень в матеріалах будівель і споруд віброакустичним методом. На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль в дерев'яних, бетонних і металевих матеріалах проведена їх оцінка як коливальної системи при ударному впливі. Встановлені закономірності змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості у будівельних конструкціях. Визначення відкритих тріщин здійснюється по стоячих хвилях, резонаторами для яких є поверхня та береги тріщин. Закриті тріщини переводять однорідну нормальну хвилю в неоднорідну, що експоненційно загасає. Встановлено, що при пошкодженні конструктивних елементів будівель і споруд виникають впорядковані та хаотичні системи тріщин, розміри яких, у випадках часткового (прихованого) внутрішнього руйнування, значно нижче області контролю. Це середовище можливо вважати квазіоднорідним, в якому системи тріщин виявляють свої властивості лише інтегрально. Тому запропоновано визначати інтегральні показники пошкодження елементів конструкцій, які зв'язані з зонами акустичної чутності резонансних хвиль. Ці хвилі фіксуються приймачем з фільтрами, які пропускають низькі частоти для різних матеріалів. На базі цих показників вже можливо ідентифікувати ризики втрати стійкості об'єкта контролю. Проведено апробацію методу віброакустичного контролю пошкоджень конструктивних елементів споруд на прикладі досліджень бетонних тюбінгів. Визначено ділянки з підвищеними напруженнями, зони прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні. Зазначено, що для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень потрібна автоматизація віброакустичного методу,

розробка моделей складних коливань та підвищення достовірності оцінок руйнувань.

У третьому розділі розроблено моделі та алгоритми складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. Моделі складних коливань дозволяють реалізувати закони керування, неможливі для класичних вібраційних систем але необхідні для систем автоматизованого віброакустичного контролю будівель та споруд. Для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю та двигуном прямої дії обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності за алгоритмом J. Crenshaw. Показано, що зниження стійкості будівель та споруд внаслідок випадкових динамічних впливів призводить до необхідності врахування особливостей хаотизації процесів. Для віброакустичного контролю внутрішньої пошкодженості наземних споруд (стін, фундаментів) виконано наукове обґрунтування урахування хаотичної складової процесу руйнування. Розроблено програмну модель для генератора віброакустичних коливань, що описується системами диференційних рівнянь Лоренца Е. та Чена Х. Побудовані структурні схеми генераторів, що отримані на основі диференційних рівнянь. Удосконалено методи і алгоритми автоматичного керування генератором для отримання хвиль із заданими амплітудними та частотними характеристиками, що необхідно для створення збурюючого ударного впливу з потрібними параметрами при віброакустичному контролі.

У четвертому розділі розроблено методи підвищення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням програмних і технічних засобів віброакустичного контролю. Обґрунтовано, що втрата стійкості несучих конструкцій може відбуватися за двома основними сценаріями: поступовому ослабленні несучих конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень або швидкому накопиченню критичної кількості тріщин, які активізуються раптовим руйнуванням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів. Моделювання процесу руйнування методом скінченних елементів показало, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути визначені візуально, зони прихованої пошкодженості активно розвиваються всередині стінових конструкцій будівель і споруд. У зв'язку з тим, що об'єктом

досліджень є часткове руйнування будівель та споруд, тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів, то для оцінки пошкодженості об'єктів контролю вперше запропоновано використовувати показник, що відображає інтегральний ризик втрати стійкості конструктивних елементів споруд за двома основними групами факторів ризику. Перша група пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга група пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Інтегральний ризик втрати стійкості визначається або шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групі, або підсумовуванням ризиків за цими двома факторами. Для автоматизації систем віброакустичної діагностики будівель і споруд вперше розроблено генератор механічних коливань із заданим частотним спектром на основі програмованого логічного контролера і сервопривода. Лабораторні випробування роботи генератора пройшли успішно, були згенеровані прямокутний меандр, несиметрична пила, трикутний сигнал та періодичні гармонічні коливання. Встановлено, що генератор забезпечує виконання заданих характеристик, а механізм сервоприводу виконує запрограмоване завдання. В результаті проведених досліджень розроблені «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації», які встановлюють методи ідентифікації пошкоджень та тріщинуватості в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, що викликані тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Методичні рекомендації впроваджені в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області та в навчальному процесі кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, де використовуються для ризикорієнтованого управління і підвищення якості підготовки фахівців за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

Ключові слова: цивільна безпека, віброакустичні методи, безпека будівель і споруд, стійкість споруд критичної інфраструктури, моделювання дина-

мічних процесів, моделі складних коливань, віброакустичний моніторинг, автоматизація систем контролю, підвищення рівня безпеки.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, які відображають основні результати дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Ідентифікація геомеханічних та геотехнічних структур віброакустичним методом для систем автоматизованого контролю стійкості наземних споруд та гірничих виробок / Яланський О.А., Беліков А.С., Барабанов С.С., Слащова О.А., Іконніков М.Ю. // Вісті Донецького гірничого інституту. 2023. № 2 (53), С. 101-109. (Особистий внесок – проведення аналітичних та лабораторних досліджень; встановлення взаємозв'язків параметрів; обробка даних).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109>.

2. Беліков А.С., Барабанов С.С. Розробка алгоритмів керування віброакустичним коливаннями для оцінки безпеки споруд критичної інфраструктури // Вісті Донецького гірничого інституту. 2024. № 1. С. 7-14. (Особистий внесок – проведення аналітичних та лабораторних досліджень; розробка методів і алгоритмів для отримання коливань із заданими характеристиками).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-7-14>.

3. Яворська О.О., Барабанов С.С. Ідентифікація прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд для зниження ризиків їх руйнування // Український журнал будівництва та архітектури. Дніпро: ПДАБА, 2024. № 2 (020). С. 116-125. (Особистий внесок – проведення моделювання процесу руйнування та оцінка ризиків втрати стійкості споруд; розробка методики ідентифікації прихованої пошкодженості; обробка отриманих даних).

DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.116.1050>

4. Яланський О.А., Барабанов С.С. Оцінка пошкоджень конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом // Науковий вісник ДонНТУ. 2024. № 1. С. 8-17. (Особистий внесок – проведення аналітичних та натурних досліджень; розробка методу оцінки тріщинуватості).

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-1-8-17>.

5. Розробка моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд / Беліков А.С.,

Яланський О.А., Барабанов С.С., Слащова О.А., Іконніков М.Ю. // Український журнал будівництва та архітектури. Дніпро: ПДАБА, 2024. № 3 (021). С. 62-72. (Особистий внесок – проведення аналітичних досліджень кінематичних моделей; комп'ютерне моделювання та лабораторні випробування; обробка даних).

Публікації у матеріалах науково-технічних конференцій:

6. Беліков А.С., Барабанов С.С. Апробація в лабораторних умовах збудувача коливань для віброакустичного контролю безпеки будівель і споруд / Безпека життєдіяльності в ХХІ столітті: тези допов. XX Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції (17-18 квітня 2024 р.). Дніпро: ПДАБА, 2024. С. 97-98. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/12712> (Особистий внесок – проведення лабораторних досліджень; обробка даних).

7. Яланський О.А., Барабанов С.С. Генератор механічних коливань із заданими спектральними параметрами для вібраційних машин та діагностичного устаткування з прямим електричним приводом / Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: тези допов. ХХІ Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів (16-17 травня 2024 р.). Кременчук: КНУ, 2024. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/12712> (Особистий внесок – апробація генератора механічних коливань в лабораторних умовах).

8. Беліков А.С., Барабанов С.С. Контроль пошкодження конструктивних елементів будівель і споруд для зниження операційних та екологічних ризиків / Архітектура, Будівництво: XX Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of solving global problems of humanity» (20-22 травня 2024 р.). Афіни, 2024. С. 27-29. <https://eu-conf.com/events/problems-of-solving-global-problems-of-humanity/> (Особистий внесок – апробація методів віброакустичного профілювання та зондування; обробка даних).

ABSTRACT

Barabanov S.S. Ensuring the safety of the buildings and structures operation taking into account the method of vibroacoustic control. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for a PhD Degree in the specialty 263 – “Civil Safety”. – Educational and Scientific Institute “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” of Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2024.

The dissertation is a completed research work in the field of labor protection and civil safety, which provides the solution to the current scientific and technical task - to establish the regularities of changes in vibroacoustic parameters during the crack development in building structures and to improve methods and develop algorithms and models for controlling vibroacoustic oscillations with given amplitude and frequency characteristics for determining hidden damage in building structure elements by vibroacoustic method, which is essential for increasing the safety and efficiency of building and construction operations.

In the **introduction**, the relevance of the topic, the purpose of the research, scientific novelty, the practical significance of the obtained results, the recipient's personal contribution and the approbation of the research results are given.

In the **first** chapter, safety condition of buildings and structures during their long-term operation is analyzed with taking into account the destructive effects of explosions and fires. It is established that in the conditions of an overage housing stock and buildings and a great number of emergency situations, which become more intensive due to the dynamic impacts of explosions and fires, it is absolutely necessary to control stability and safety of the objects and to assess their suitability for further operation. This applies both to the infrastructural objects, which can include production shops, structures, tunnels, etc., and residential buildings. The analysis shows that accumulation of internal damages in load-bearing walls and foundations of the buildings is one of the most common signs of potential destruction during their operation. The vibroacoustic control method has proven itself well for monitoring and diagnosing the damages, it was tested in various conditions and allows for a non-destructive assessment of the condition of concrete, reinforced concrete, brick, multi-layered walls, ceilings and other types of structures. However, in order to improve the speed and quality of determining condition of the objects and making quantitative assessment of the accumulation of significant damages in the object elements, it is necessary to develop an automated exciter of complex oscillations and to improve the

method of identifying hidden damages using the vibroacoustic method. Based on the analysis, the purpose and objectives of the research were formulated.

In the **second** chapter, identification of structural damages in the materials of buildings and structures using the vibroacoustic method is shown. On the basis of the measurements of the velocities of elastic waves in wooden, concrete, and metal materials, these materials are assessed as an oscillating system under the impact action. The established patterns of changes in vibroacoustic parameters during the crack development in building structures are presented. Open cracks are determined by standing waves, the resonators for which are the surface and the edges of the cracks. Closed cracks transfer a uniform normal wave into a heterogeneous one which decays exponentially. It is further established that when structural elements of buildings and structures are damaged, ordered and chaotic systems of cracks appear, the sizes of which, in cases of partial (hidden) internal destruction, are significantly below the area under the control. This environment can be considered quasi-homogeneous, in which crack systems reveal their properties only integrally. Therefore, it is proposed to determine the integral damage indicators of the structure elements that are connected to the zones of acoustic audibility of resonant waves. These waves are captured by a receiver with low-pass filters for various materials. On the basis of these indicators, it is already possible to identify the risks of loss of stability of the object under the control. Approbation of the method of vibroacoustic damage control of the building structural elements was carried out on the example of studying concrete tubings. Areas with increased stresses, zones of hidden cracks and damages in concrete were identified. It is stated that in order to increase the speed and quality of determining the conditions of objects and the structure of accumulation of significant damages in their elements, the automation of the vibroacoustic method, the development of models of complex oscillations, and the improvement of the reliability of damage assessments are required.

In the **third** chapter, the models and algorithms of complex oscillations developed for automation systems of vibroacoustic control of safety of building and structures operation are presented. The models of complex oscillations make it possible to implement control laws which are impossible for classical vibration systems but are necessary for systems of automated vibroacoustic monitoring of buildings and struc-

tures. To control vibration systems with limited computing performance and the direct action engine, the use of reduced bit rate coefficients according to the Jack Crenshaw algorithm is justified. It is shown that a decrease in stability of buildings and structures as a result of random dynamic impacts leads to the need to take into account the features of chaotic processes. The chaotic component of the destruction process is scientifically justified for taking into account in vibroacoustic control of internal damage of ground structures (walls, foundations). A program model was developed for the generator of vibroacoustic oscillations described by the systems of differential equations of Lorentz and Chen. The structural diagrams of generators were constructed on the basis of differential equations. The methods and algorithms of automated control of the generator for obtaining waves with specified amplitude and frequency characteristics were improved, which is necessary to create a disturbing impact with the required parameters during vibroacoustic control.

In the **fourth** chapter, the developed methods of increasing the safety of the buildings and structures operation with taking into account software and technical means of vibroacoustic control are shown. It is substantiated that a loss of load-bearing structures stability can occur according to two main scenarios: the gradual weakening of load-bearing structures due to the accumulation of internal damages or the rapid accumulation of a critical number of cracks, which are provoked by the sudden destruction of limit stress structures due to any dynamic impacts. Modelling of the destruction process using the finite element method shows that long before cracks on the surfaces of structures can be determined visually, zones of hidden damages are actively developing throughout the walls of buildings and structures. Due the fact that the object of the research is partial destruction of buildings and structures, that is, not the root cause, but the consequences of the impact of a complex of negative basic factors, it is for the first time proposed to use an indicator which reflects the integral risk of loss of stability of structural elements of buildings for assessing the damage of objects under the control according to two main groups of risk factors. The first group is related to the detection of external structural damages, which are identified by visual inspection methods. The second group is related to the detection of hidden damages, the parameters of which are determined by the vibroacoustic method. The integral risk of loss of stability is determined either by comparing and choos-

ing the maximum risk in the group or by summing up the risks based on these two factors. It is for the first time when for the automation of systems of vibroacoustic diagnostics of buildings and structures, a generator of mechanical vibrations with a given frequency spectrum based on a programmable logic controller and a servo drive was developed. Laboratory tests of the generator were successful, a rectangular meander, an asymmetric saw, a triangular signal and periodic harmonic oscillations were generated. It was established that the generator ensures the performance of the specified characteristics, and the servo drive mechanism performs the programmed task. As a result of the conducted research, "The methodological recommendations for assessing damage in structural elements of buildings and structures by the vibroacoustic method to ensure the safety of their operation" were developed, which determine methods for identifying damages and cracks in structural elements of buildings and structures by the vibroacoustic method in emergency situations caused by long-term operation of infrastructure facilities and dynamic effects caused by explosions and fires. The Recommendations were implemented by the Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in the Dnipropetrovs'k Region and in the educational process of the Labor Protection, Civil and Technogenic Safety Department of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture, where they are used for risk-oriented management and for improving quality of training of specialists in the specialty 263 – "Civil Safety".

Keywords: civil safety, vibroacoustic methods, safety of buildings and structures, stability of critical infrastructure structures, modeling of dynamic processes, models of complex oscillations, vibroacoustic monitoring, automation of control systems, increasing the level of safety.

References

1. Yalanskyi O.A., Bielikov A.S., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. (2023) Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*, № 2 (53). Pp. 101-109. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109>.

2. Bielikov A.S. and Barabanov S.S. (2024) Development of control algorithms for vibroacoustic vibrations to assess the safety of critical infrastructure structures.

Journal of Donetsk Mining Institute, No. 1. Pp. 7-14. [https://doi.org/ 10.31474/1999-981X-2024-1-7-14](https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-7-14).

3. Yavorska O.O. and Barabanov S.S. (2024) Identification of hidden damage in structural elements of buildings and structures to reduce the risks of their destruction. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. No. 2 (020). Pp. 116-125. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.116.1050>.

4. Yalanskyi O.A. and Barabanov S.S. (2024) Assessment of damage to structural elements of buildings and structures using vibroacoustic method. *Scientific Bulletin of Donetsk National Technical University*. No. 1. Pp. 8-17. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-1-8-17>.

5. Bielikov A.S., Yalanskyi O.A., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. (2024) Development of models complex oscillations for automation systems of vibroacoustic operational safety control of buildings and structures. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. No. 3 (021). Pp. 62-72.

6. Bielikov A.S. and Barabanov S.S. (2024). Testing in laboratory conditions of a vibration exciter for vibroacoustic control of the safety of buildings and structures. *XX All-Ukrainian Student Sci. and Pract. Conf. "Life safety in the 21st century"* (April 17-18, 2024). Book of Abstracts. Dnipro, PSASEA, 2024. Pp. 97-98

7. Yalanskyi O.A. and Barabanov S.S. (2024). Generator of mechanical oscillations with specific spectral parameters for vibrating machines and diagnostic equipment with direct electric drive. *XXI International Sci. and Tech. Conf. of students and young researches "Electromechanical and energy systems, modeling and optimization methods"* (May, 16-17, 2024). Book of Abstracts. Kremenchuk, KNU, 2024.

8. Bielikov A.S. and Barabanov S.S. (2024). Damage control of structural elements of buildings and structures to reduce operational and environmental risks. *XX International Sci. and Tech. Conf. "Problems of solving global problems of humanity"* (May, 20-22, 2024, Athens, Greece). Book of Abstracts, 2024. Pp. 27-29.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ БЕЗПЕКИ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД.....	23
1.1 Стан питання безпеки будівель та споруд при тривалій експлуатації з урахуванням вибухів і пожеж.....	23
1.2 Фактори навколишнього середовища, що впливають на руйнування наземних та поглиблених споруд і створюють небезпечні умови під час їх тривалої експлуатації.....	37
1.3 Методи оцінки стану будівель та споруд.....	47
1.4 Основні методи неруйнівного моніторингу для діагностики внутрішньої структури різних середовищ.....	51
1.5 Висновки, мета, завдання і методи досліджень.....	55
РОЗДІЛ 2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТРУКТУРНИХ ПОРУШЕНЬ В МАТЕРІАЛАХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ВІБРОАКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ ...	57
2.1 Визначення задач віброакустичного методу контролю конструктивних елементів будівель і споруд.....	57
2.2 Ідентифікація структурних порушень в матеріалах конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом.....	59
2.3 Оцінка пошкоджень конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом.....	64
Висновки за розділом 2.....	73
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА АЛГОРИТМІВ СКЛАДНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	75
3.1 Підвищення продуктивності та достовірності віброакустичного контролю будівель і споруд за рахунок автоматизації ударної дії з заданими параметрами на базі розробки динамічних моделей складних коливань.....	75
3.2 Розробка алгоритмів керування віброакустичними коливаннями для оцінки безпеки споруд критичної інфраструктури.....	88

Висновки за розділом 3	96
РОЗДІЛ 4 ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД З УРАХУВАННЯМ МЕТОДІВ, ПРОГРАМНИХ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ	98
4.1 Ідентифікація прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд для зниження ризиків їх руйнування	98
4.2 Практична реалізація генератора коливань для засобів віброакустичного контролю на основі програмованого контролера та сервопривода	103
4.3 Розробка методичних рекомендацій з визначення прихованої пошкодженості будівель і споруд для забезпечення безпеки їх експлуатації ..	114
4.4 Визначення комплексних показників оцінки безпеки на базі моделі інтегрованого ризику	122
Висновки за розділом 4	126
ВИСНОВКИ	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	132
ДОДАТКИ	145
Додаток А Таблиця призначення даних програмного генератора	145
Додаток Б Лістинги програмних блоків апробації генератора механічних коливань для автоматизації засобів віброакустичного контролю	146
Додаток В Приклад форми подання узагальнюючих результатів з віброакустичної діагностики	148
Додаток Г Титульні листи, анотації та зміст методик, рекомендацій, довідок, актів, протоколів	149
Додаток Д Наукові праці здобувача, які відображають основні результати дисертації	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ ТА СКОРОЧЕНЬ

ПЛК – програмований логічний контролер;
ЛМІ – людино-машинний інтерфейс;
СЗОІ – система збору і обробки інформації;
ОМК – однокристальний мікроконтролер;
СКЕП – система керування електроприводом;
BLINK – функціональний блок мультівібратора;
СТУ – функціональний блок лічильника; входи/виходи:
CU – лічильний вхід;
RESET – вхід скиду (початкової ініціалізації);
PV – вхід зчитування значення уставки;
OUT – дискретні виходи;
CV – вихід поточного значення вмісту лічильного регістра;
ENABLE – вхід дозволу роботи;
TIMELOW – уставка тривалості паузи;
TIMENHIGH – уставка тривалості імпульсу.
 E – модуль пружності, МПа;
 σ – напруження, Па.

ВСТУП

Сьогодні Україна стикається з безпрецедентними викликами щодо безпеки критичної інфраструктури, будівель та споруд. В умовах надзвичайних ситуацій, які активізуються динамічними впливами від вибухів, пожежами, руйнуванням застарілого жилого фонду безумовно необхідно проводити контроль стійкості та безпеки об'єктів для оцінки їхньої придатності до подальшої експлуатації. Це відноситься як до самих інфраструктурних об'єктів безпосередньо, в ролі яких можуть виступати виробничі цехи, споруди, тунелі та інше, так і житлові будинки і комплекси допоміжних будівель та споруд.

Безпека експлуатації будівель та споруд в першу чергу залежить від виникнення та розвитку процесів руйнування в бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементах несучих конструкцій. Залежно від ступеня пошкодження втрата стійкості може бути м'якою або жорсткою. При м'якій втраті стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які часто пов'язані з допущеними при проектуванні помилками, підтопленнями фундаментів або недотриманням правил експлуатації, які проявляються в ослабленні несучих конструкцій внаслідок внутрішніх пошкоджень. Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості пошкоджень конструктивних елементів або раптового швидкого зростання тріщин, які активізуються руйнівними зсувами в фундаментах і несучих конструкціях будівель під час землетрусів або раптовим різким розвантаженням гранично-напружених конструкцій за межею їх критерію міцності внаслідок будь-яких динамічних впливів. Динамічні впливи можуть бути малої потужності (розриви іржавої арматури, наслідки пожеж) або потужними (перша хвиля або афтершоки землетрусів, що повторюються, вибухові хвилі). Впливи великої потужності особливо небезпечні внаслідок їх слабкої прогнозованості та трагічних наслідків. Це призводить до лавиноподібних обвалень конструкцій будівель, що втратили опору в результаті руйнування одного з поверхів.

Стан безпеки будівель та споруд в процесі експлуатації визначається пошкодженнями і тріщинуватістю несучих конструкцій. Накопичення внутрішніх

пошкоджень, зріст тріщин в несучих стінах та фундаментах будівель є однією з найбільш поширених ознак потенційного руйнування в процесі експлуатації. При цьому втрата стійкості конструктивних елементів може відбуватися і без візуально визначених пошкоджень. Тому для безпечної експлуатації будівель та споруд вирішальним є не лише візуальний огляд, а й своєчасний контроль прихованої пошкодженості та тріщинуватості в конструктивних елементах.

Для моніторингу стійкості споруд і діагностики прихованої тріщинуватості найкраще застосовувати геофізичні методи неруйнівного контролю, зокрема віброакустичний, який апробований в різних умовах і дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін перекриттів та інших видів конструкцій. Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень необхідна розробка моделей складних коливань і вдосконалення методів ідентифікації досліджуваних структур. Тому *актуальним науково-технічним завданням* є встановлення закономірностей змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості у будівельних конструкціях, а також удосконалення методів, розробка алгоритмів і моделей керування віброакустичними коливаннями із заданими амплітудними та частотними характеристиками для визначення прихованої пошкодженості в елементах будівельних конструкцій віброакустичним методом, що підвищить безпеку експлуатації будівель і споруд.

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

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до пріоритетних напрямків науково-дослідних робіт, що пов'язані з Концепцією реформування системи управління охороною праці в Україні, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р; Загальнодержавної соціальної програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки; Указу Президента України Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року, виданий 30 вересня 2019 року №722/2019, а також розділу науково-дослідної роботи «Розробка метода управління геотехнічною

системою «породний масив-гірничі виробки» з урахуванням факторів ризику» № ДР 0119U001349 (2024 р.), де здобувач приймав участь в науковій діяльності щодо розробки методичного забезпечення безпеки будівель і споруд.

Мета і завдання дослідження.

Мета роботи – забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості елементів будівельних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- провести аналіз стану та методів оцінки безпеки будівель і споруд в процесі їх тривалої експлуатації та з урахуванням вибухів і пожеж;
- встановити взаємозв'язок змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості та удосконалити метод визначення пошкодженості в елементах будівельних конструкцій;
- розробити моделі та алгоритми складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд;
- провести лабораторні випробування роботи генератора механічних коливань для виробки типових впливів і автоматизації процесу віброакустичного контролю будівель та споруд;
- удосконалити метод оцінки безпеки будівель і споруд при виникненні спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу;
- розробити і впровадити Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації.

Об'єкт дослідження – процеси руйнування і віброакустичного контролю пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд.

Предмет дослідження – закономірності змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості у будівельних конструкціях в процесі експлуатації та під впливом вибухів і пожеж.

Ідея роботи полягає у використанні розроблених методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості будівель і споруд для забезпечення безпеки їх експлуатації.

Методи досліджень: аналітичні методи класичної теорії хвиль і статистики, аналіз та узагальнення експериментальних даних; математичне та комп'ютерне моделювання динамічних процесів; лабораторні дослідження розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю; експериментальні дослідження спектральної щільності акустичних відгуків, стійкості будівель і споруд віброакустичним методом; статистична обробка результатів вимірювань; методологія організації обчислювальних процесів і алгоритмів керування віброакустичними коливаннями із заданими амплітудними та частотними характеристиками для визначення прихованої пошкодженості в елементах будівельних конструкцій; аналіз результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Подальший розвиток отримав метод оцінки пошкоджень і тріщинуватості конструктивних елементів будівель і споруд з урахуванням параметрів віброакустичного контролю руйнування споруд, що дозволяє знизити аварійність об'єктів і своєчасно вжити заходи безпеки.

2. Встановлено закономірності та взаємозв'язок основних віброакустичних параметрів з проявами дефектів та пошкоджень в конструкціях будівель і споруд в залежності від виду матеріалів.

3. Розроблено нові моделі та алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання коливань із заданими амплітудними та частотними характеристиками, що необхідно для створення збурюючого ударного впливу з потрібними параметрами при віброакустичному контролі.

4. Вперше обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності в обчислювальній схемі за алгоритмом J. Crenshaw, що дозволяє керувати виконавчими органами з обмеженою обчислювальною продуктивністю при віброакустичному моніторингу структури, тріщин та порушень однорідності.

5. Вперше для віброакустичного контролю внутрішньої пошкодженості будівель і споруд виконано наукове обґрунтування урахування хаотичної складової процесу руйнування, розроблено програмну модель та структурну схему збуджувача віброакустичних коливань, що описується системами диференціальних рівнянь Лоренца Е. та Чена Х.

6. Вперше для виробки типових впливів в системі віброакустичної діагностики розроблено програмний модуль та генератор механічних коливань із заданим частотним спектром на основі програмованого контролера та сервопривода з використанням елементів людино-машинного інтерфейсу, що створює умови для автоматизації процесу контролю будівель і споруд.

7. Вперше для оцінки рівня пошкодженості будівель і споруд внаслідок впливу комплексу негативних факторів при їх експлуатації запропоновано показники, що відображають інтегральний ризик втрати стійкості споруд за двома основними групами небезпечних факторів. Перша група пов'язана з ризиками впливу зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю, друга група – з ризиками впливу прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом, що у сукупності дозволяє дати оперативну та інтегральну оцінку безпеки конструктивних елементів будівель та споруд.

Наукове значення роботи полягає в теоретичному та практичному обґрунтуванні застосування програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд, що дозволяє оцінити ризики руйнування та визначити заходи безпеки.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується коректною постановкою завдань досліджень; застосуванням апробованих методів теорії хвиль, статистики, теорії ризиків, побудови інформаційних систем; значною кількістю проведених лабораторних експериментів з апробації програмних алгоритмів і технічних засобів автоматичного керування вібраційним збуджувачем; позитивною апробацією і впрова-

дженням на практиці методик та елементів цифрових систем контролю параметрів безпеки.

Практичне значення отриманих результатів полягає в: розробці програмних алгоритмів і технічних засобів автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання коливань із заданими амплітудними та частотними характеристиками, що дає необхідну і достатню базу для автоматизації віброакустичного контролю тріщинуватості в елементах будівель і споруд; розробці і практичної апробації в лабораторних умовах генератора механічних коливань на основі програмованого контролера та сервопривода для виробки типових впливів і автоматизації процесу віброакустичної діагностики будівель і споруд; розробці та впровадженні «Методичних рекомендацій з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації», які встановлюють методи ідентифікації пошкоджень в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, обумовлених тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж.

Розроблені методичні рекомендації впроваджені: в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області (Акт впровадження від 15.03.2024 р., додаток Г2) де використовуються для вдосконалення ризик-орієнтованого управління і підтримання прийнятного рівня ризику при експлуатації будівель і споруд; в навчальний процес кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури МОН України (Довідка від 20.04.2024 р., додаток Г3) де використовуються для підвищення якості підготовки фахівців за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

Особистий внесок здобувача полягає в: формулюванні мети і основних завдань досліджень; обробці даних і аналізі результатів; обґрунтуванні моделей, розробці методів і алгоритмів з визначення полічастотних коливань і лінійних хвиль із заданими амплітудними та частотними характеристиками; участі у лабораторних дослідженнях; розробці методик і рекомендацій з оцінки

пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації. Ідея роботи, наукові положення, висновки і рекомендації, текст дисертації викладені автором особисто.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались й обговорювалися на: Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Інженерні системи будівель, енергоефективність, екологія, безпека життєдіяльності, охорона праці, цивільний захист» (17-18 квітня 2024 р., Дніпро, ПДАБА); XXI Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (16-17 травня 2024 р., Кременчук, КНУ); XX Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of solving global problems of humanity», секція «Архітектура, Будівництво» (20-22 травня 2024 р., Афіни, Греція).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в 8 наукових роботах, у тому числі в 5 наукових статтях у фахових виданнях, 3 – в матеріалах конференцій.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота викладена на 155 сторінках друкованого тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 5 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 131 сторінку друкованого тексту. Робота ілюстрована 9 таблицями, 34 рисунками. Список використаних джерел містить 121 найменувань, з них 65 кирилицею та 56 латиницею.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ БЕЗПЕКИ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

1.1 Стан питання безпеки будівель та споруд при тривалій експлуатації з урахуванням вибухів і пожеж

Сьогодні Україна стикається з безпрецедентними викликами щодо безпеки критичної інфраструктури, будівель та споруд. В умовах старого фонду будівель і великої кількості надзвичайних ситуацій, які активізуються динамічними впливами від вибухів, пожеж та землетрусів, необхідно своєчасно проводити високоякісний контроль стійкості об'єктів з метою оцінки їхньої придатності до подальшої безпечної експлуатації. Це відноситься як до самих інфраструктурних об'єктів безпосередньо, в ролі яких можуть виступати виробничі цехи, споруди, тунелі та інше, так і до житлових будинків і комплексів допоміжних будівель та споруд.

Більше третини від загальних прямих збитків інфраструктури та активів України (понад 54 млрд. доларів станом на кінець травня 2023 року) завдано житловому фонду [1]. При цьому 86 % руйнування припадає на пошкодження багатоквартирних будинків. Загалом постраждало 18,6 тисяч таких домів, з яких 13,2 тисячі пошкоджені частково. Часто пошкодження важко визначити візуальними спостереженнями, необхідні методи та засоби для моніторингу внутрішньої структури конструктивних елементів.

Безпека експлуатації будівель і споруд безпосередньо залежить від їхньої стійкості, здатності конструктивних елементів протистояти силовим статичним та динамічним впливам. Процес втрати стійкості конструктивних елементів можна розділити на два основних типа. Перший процес, це поступове ослаблення несучих конструкцій і об'єкта в цілому внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень, другий – раптове розвантаження гранично-напружених конструкцій внаслідок накопичення до критичного рівня внутрішніх пошкоджень коли для активізації руйнувань достатньо слабкого впливу або високоенергетичних впливів від ударних хвиль і землетрусів.

Стан безпеки будівель та споруд визначається пошкодженнями і тріщинуватістю несучих конструкцій. Як правило, не існує будівельних конструкцій без нульових тріщин [2, 3]. Це дуже поширена і неминуча проблема у будь-якій бетонній будівельній конструкції. На несучій і не несучій частині будь-якої конструкції починають з'являтися різноманітні тріщини. Ці тріщини є результатом небажаних чи хибних дій, вжитих під час будівництва.

Накопичення внутрішніх пошкоджень, зріст тріщин в несучих стінах та фундаментах будівель є однією з найбільш поширених ознак потенційного руйнування в процесі експлуатації. Ці тріщини можуть мати різні форми, розміри та причини виникнення (рис. 1), слід звернути увагу, що вони можуть надати важливу інформацію про стан будівлі та про те, які дії призвели до аварійної ситуації і які дії потрібно вжити для ремонту та зміцнення об'єкта [2-6].



а)



б)

Рис. 1.1 Неструктурні (а) і структурні (б) тріщини у будівельних конструкціях

Граничні стани матеріалів будівельних конструкцій залежать і від типу деформування [7, 8]. Наприклад, при дослідженні розтягування оцінюють більше пов'язані види руйнування, але немає необхідності перевіряти руйнування, пов'язані зі зсувом, стисканням і навпаки. При руйнуванні будівель і споруд головним діючим чинником є зростання тріщинуватих зон і магістральних тріщин.

Звісно, що всі конструкції та матеріали з часом деградують і руйнуються. Як підкреслюють автори [9, 10] єдине, що змінюється, це масштаби руйнувань за конкретні проміжки часу. Протягом усього передбаченого терміну служби конструкція також повинна мати високий рівень безпеки, щоб протистояти силам і навантаженням, яким вона піддається, і навколишньому середовищу. Актуальним питанням є оцінка ризиків від впливу природних та людського чинників для різних будинків та цивільних інженерних споруд різного типу (мостів, шлюзів, тунелів тощо) на основі визначення тріщинуватості.

Фактори та наслідки процесу розвитку систем тріщин, які визначають безпеку експлуатації будівель і споруд приведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Фактори та наслідки розвитку процесу руйнування будівель і споруд

Фактори впливу, наслідки	Тип тріщин, зовнішні ознаки
Усадка ґрунту, перенесення навантажень і деформація структурних елементів	Вертикальні тріщини йдуть уздовж вертикальних площин
Втома матеріалів, вплив вологи або неправильний розподіл навантажень	Горизонтальні тріщини проходять паралельно горизонтальним площинам
Деформації чи неоднорідні напруження у будівлі	Діагональні тріщини мають похилий напрямок
Температурні перепади, втома матеріалів або вібрації	Променеві тріщини розходяться від певної точки
Загальне старіння та деформації будівлі або споруди	Сітчасті тріщини утворюють сітку чи ґрати

Тріщини інтерпретують за такими параметрами та маркерами:

- *ширина тріщини* може вказати на небезпечність, наприклад, вузькі тріщини зазвичай є косметичними, тоді як широкі тріщини можуть свідчити про структурні проблеми;

- *напрямок тріщини* може допомогти у визначенні причини її виникнення, наприклад, вертикальні тріщини можуть бути пов'язані з усадкою однієї частини будівлі щодо іншої частини, а горизонтальні – з деформацією при водонасиченні (корозія, підпор води) або неправильним розподілом навантажень;

- *розташування тріщини* також може надати інформацію про її причини, наприклад, тріщини біля дверних або віконних укосів можуть бути пов'язані з деформацією каркасу будівлі.

Наслідки руйнування будівель і споруд показані на рис. 1.1.

Таким чином, аналіз тріщин у будівлях є важливим етапом для визначення їхнього стану та потреб у ремонті чи зміцненні. Розуміння різних видів тріщин та їх інтерпретація допомагають будівельним інженерам та архітекторам розробляти ефективні стратегії підтримання та обслуговування будівель, забезпечуючи їх безпеку та довговічність. Тому правильна оцінка прихованих тріщин у спорудах є важливим завданням забезпечення їх стійкості.

Недоліки в проектуванні та будівництві можуть мати серйозні наслідки для довговічності та безпеки будинків протягом тривалого періоду їх експлуатації. Ці недоліки включають помилки в розрахунках, неправильне використання матеріалів, невідповідність проведення робіт будівельним стандартам і технічним вимогам, відсутність контролю якості. Розглянемо механізми впливу недоліків у проектуванні та будівництві на стійкість будівель, типові пошкодження, викликані цими недоліками, і методи їх запобігання.

Неправильні розрахунки та невідповідність будівельних матеріалів нормам і стандартам можуть призвести до невідповідності конструкцій вимогам міцності та стійкості, що необхідні для успішної експлуатації в даному регіоні.



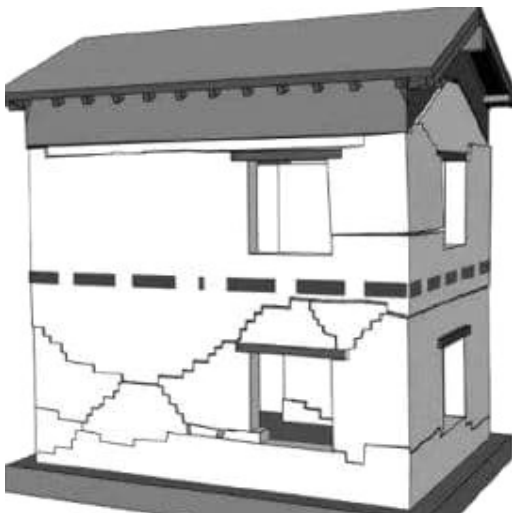
а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1.1 Наслідки руйнування будівель і споруд: а, б, в – тріщини і активне руйнування несучих конструкцій будівель; г, д – тріщини і руйнування нижніх поверхів будинків (за даними [11, 12]).

Неправильне виконання робіт через відсутність необхідних навичок і некваліфікованості виконавців можуть призвести до неправильного монтажу, поганої якості зварювання, недостатньої ізоляції та інших проблем. Недостатній контроль якості з боку інженерів та будівельних організацій зазвичай призводить до непрофесійного виконання робіт та використання неякісних матеріалів.

Помилки в проектуванні та будівництві істотно впливають на безпеку і втрату функціональності будівель та споруд:

- помилки в розрахунках та в результаті використання матеріалів недостатньої міцності, недостатня запроектована жорсткість конструкцій можуть викликати неправильний розподіл силових навантажень, і неприпустимі деформації несучих конструкцій, зниження міцності та стійкості будівлі і, отже, збільшення ризиків її руйнування;

- недостатня міцність з'єднань, неправильне укладання матеріалів або деформації в процесі будівництва можуть призвести до утворення тріщин і порожнин в стінах, стелях і підлогах будівлі, утворюються внутрішні і зовнішні дефекти в його структурі, що викликає погіршення зовнішнього вигляду, стійкості, функціональності, головне, безпечності об'єкта.

Будівлі з недоліками в будівництві та проектуванні більш схильні до прискореного зносу і старіння, що скорочує їх термін служби і вимагає додаткових витрат на ремонт та обслуговування [13, 14]. Недоліки в будівництві роблять будинок більш вразливим до кліматичних умов, вібрацій, впливу води та інших зовнішніх факторів.

Для запобігання недоліків у проектуванні та будівництві слід проводити ретельний аналіз та контроль всіх етапів проектування та будівництва, що допомагає виявити та усунути потенційні помилки на ранніх стадіях [15, 16]. Навчання та сертифікація працівників у будівельній сфері сприяють підвищенню кваліфікації та зменшенню ймовірності припущення помилок. Дотримання будівельних стандартів та нормативів допомагає гарантувати якість і безпеку будівель та споруд. Таким чином, недоліки в проектуванні та будівництві можуть створювати небезпеку для життя та здоров'я людей, які проживають або пра-

цюють у будівлі, що вимагає негайного втручання у вигляді проведення контролю стану стійкості об'єкта та його ремонту.

Фактори, що впливають на руйнування будівель під час вибуху.

Розуміння факторів, які впливають на руйнування будівель під час вибуху, відіграє важливу роль у розробці заходів щодо запобігання та мінімізації збитків. Вибухи можуть призвести до серйозних руйнувань та пошкоджень будівель, залишаючи за собою спустошливі наслідки [17, 18]. Серед факторів, що визначають саме ступінь руйнування будівель під час вибуху розглянемо основні.

Масштаб вибуху є одним із ключових факторів, що впливає на руйнування будівель. Сила вибуху визначається типом вибухової речовини, його кількістю, розташуванням та способом ініціювання. Потужні вибухи здатні викликати найбільші збитки будинкам, тоді як менш потужні вибухи призводять до часткових пошкоджень, тому іноді, їх важко визначити візуально.

Відстань від джерела вибуху до будівлі має значення для визначення ступеня її руйнації. Чим ближче будівля знаходиться до джерела вибуху, тим більша ймовірність того, що вона буде піддана сильним динамічним навантаженням і впливу ударної хвилі, що може призвести до повного або часткового руйнування.

Конструктивні особливості будівлі, такі як тип матеріалів, що використовуються для будівництва, його архітектурний дизайн та специфіка конструкції, відіграють важливу роль для стійкості від впливу вибухового навантаження. Наприклад, будівлі, побудовані з міцніших матеріалів, таких як бетон або сталь, мають більше шансів витримати вибухові навантаження, ніж будинки з крихких матеріалів.

Навколишнє середовище також впливає на руйнування будівель під час вибуху [19]. Наприклад, присутність перешкод або захисних бар'єрів навколо будівлі може пом'якшити вплив ударної хвилі та обмежити збитки. Крім того, природні складові, такі як вітер, можуть впливати на поширення вибухової хвилі та уламків, а значить, відповідно, і на ступінь руйнування будівлі.

Розуміння механізмів впливу вибухових навантажень на руйнування будівель пов'язане з поняттям процесів детонації та дифузії. Детонація є поширення вибухової хвилі з високою швидкістю. Вибухові хвилі, що утворюються при детонації, характеризуються високим тиском і температурою, що призводить до руйнування елементів будівлі. Детонація може викликати коливання та деформації в будівлі, розриви стін та перекриттів, а також викид уламків та дрібних частинок, що збільшує ризик травмування людей усередині та навколо будівлі. Дифузія вибуху є поширенням енергії вибуху на відстань від джерела вибуху. На відміну від детонації, дифузія характеризується більш повільним і рівномірним поширенням вибухової хвилі. Вона викликає стиснення та розтягування конструкцій будівлі, а також тиск на його стіни та фундамент, що може призвести до їх пошкодження чи руйнування.

Під впливом вибухових навантажень будівлі схильні до різних видів руйнувань, що призводить до небезпеки їх подальшої експлуатації:

- високий тиск і температура, що створюються при детонації, можуть викликати механічне руйнування структурних елементів будівлі, таких як стіни, перекриття та фундаменти;
- дифузія вибуху може викликати деформацію та згинання конструкцій будівлі, що призводить до їх пошкодження та втрати несучої здатності.
- вибухові навантаження призводять до утворення уламків і дрібних частинок, які можуть бути викинуті з будівлі з високою швидкістю, що збільшує ризик травмування людей і пошкоджень навколишнього середовища.

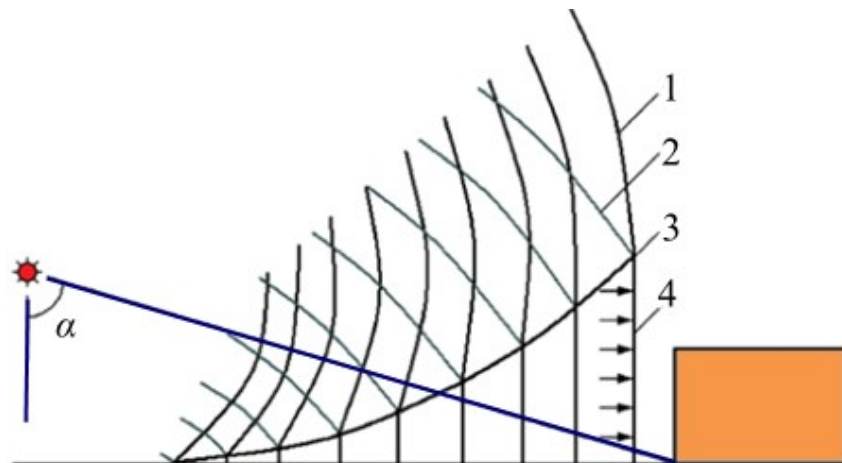
Для захисту будівель від впливу вибухових навантажень [20] можуть застосовуватися різні заходи, такі як зміцнення конструкцій, використання спеціальних матеріалів з високим ступенем стійкості до впливу вибухів, а також створення захисних споруд навколо будівлі.

За великої інтенсивності вибуху пошкодження конструкцій будівлі та вузлів їх з'єднання можуть мати екстенсивний характер і викликати глобальний колапс і руйнування всієї будівлі, тому доцільно ізолювати області руйнування. Зокрема, небезпечні ділянки монолітних залізобетонних плит перекриттів по-

силують зовнішнім армуванням шляхом приклеювання армувальних матів у вигляді тканин, ламелей або сіток з вуглецевого волокна до верхніх зон плит біля вертикальних опор [21].

Встановлено [22], що вибухові хвилі у повітрі характеризуються експоненціальним загасанням по мірі віддалення від центра вибуху. При зустрічі з перешкодою на своєму шляху вони «відбивають» амплітуди багато разів, при цьому процес «відбивання» залежить від потужності повітряного удару та кута нахилу фронту вибухової хвилі по відношенню до споруди [22] (рис. 1.2).

На ділянці меншого і більш рівномірного тиску деформації конструкції обумовлюються параметрами вигину або опорного зсуву. При цьому під час деформування елементів конструкції енергія вибуху гаситься до початку її обвалення [22].

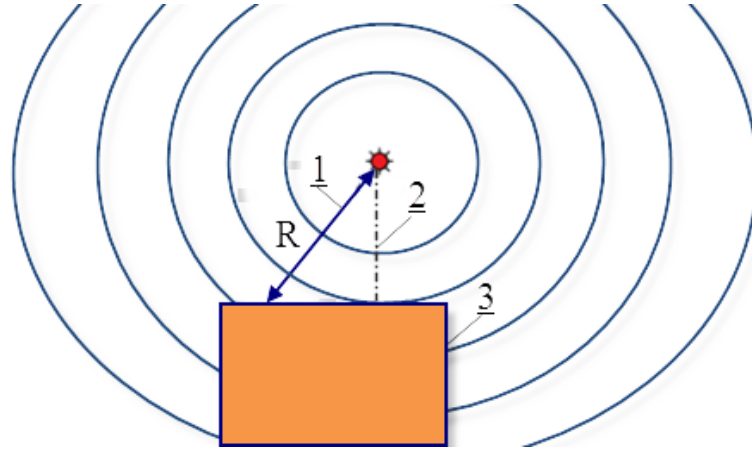


1 – падаюча вибухова хвиля; 2 – відбита вибухова хвиля; 3 – шлях потрійної точки; 4 – фронт головної вибухової хвилі; 5 – центр вибуху.

Рис. 1.2 Принципіальна схема впливу вибуху у повітрі на споруду

У роботі [23] проведено аналіз існуючих робіт, присвячених дослідженню характеристик вибухових навантажень, методам їх прогнозування, а також реакції конструкцій під дією вибухових навантажень. Розглянуто матеріали, що застосовуються для захисту залізобетонних конструкцій. Вивчення реакції конструкцій, навантажених вибуховою хвилею, включає вплив нелінійної непружної поведінки матеріалу, високих швидкостей деформації та нестационарних

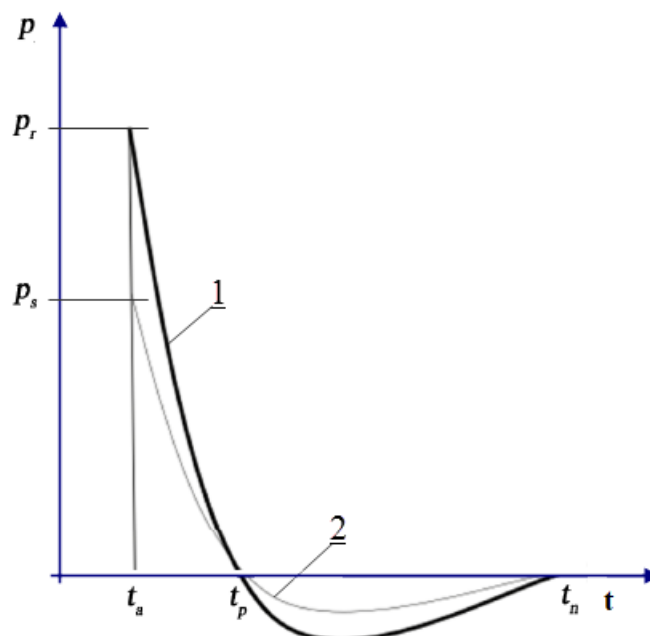
деформацій. Параметри вибухової хвилі при вільному повітряному вибуху є важливими для характеристики навантажень, які використовуються при проектуванні конструкції (рис. 1.3).



1 – постійна відстань; 2 – нормальна дистанція; 3 - споруда

Рисунок 1.3 – Фронт вибухової хвилі під час вільного вибуху

На рис. 1.4 наведено ідеалізовану залежність тиску від часу на поверхні конструкції [23].



1 – падаючий надлишковий тиск p_s ; 2 – надлишковий тиск відбитої хвилі p_r

Рис. 1.4 Зміна тиску у відбитій ударній хвилі при повітряному вибуху

Дослідженню впливу вибухових хвиль на конструктивні елементи будівель та способам їх захисту присвячені роботи [24-32]. Зокрема у роботі [25] контроль впливу вибухів здійснюється за допомогою програмно-технічного комплексу, створеного з урахуванням геофізичного устаткування. Комплекс реєструє параметри сейсмічної хвилі, потім проводиться їх цифрова обробка. Відзначено, що взаємодія вибухової хвилі з перегородкою є складним завданням. Хоча існують інструменти інженерного рівня для прогнозування параметрів вибуху (наприклад, піковий тиск, імпульс і тривалість навантаження).

У роботі [26] розглянуто вплив вибухової хвилі на поверхню конструкції кінцевих розмірів та методи прогнозування параметрів вибухових навантажень. Розглянуто механізм згасання вибуху (дифракція, відбиття, формування вихорів за перешкодою), а також вплив форми і розташування перешкод, жорсткості твердої поверхні. У роботі [27] представлені результати чисельного моделювання та фізичних експериментів з детонації кубоподібних зарядів. Тиск у вибуховій хвилі визначався за рогом будівлі та паралельно його задній стінці. Результати досліджень показали, що на параметри вибухової хвилі впливає розташування детонатора, потужність і маса заряду вибухової речовини, жорсткість поверхні будівлі і навколишнє середовище. У роботі [28] досліджувався вплив поверхневого вибуху масою 1000 кг на характер руйнування будівлі. Характер руйнування показав, що поверхневий вибух більшою мірою вплинув на фундамент і наступний поверх, а не на всю будівлю. При цьому спостерігалися значні пошкодження облицювальних колон та балок.

Робота [33] присвячена експериментальному дослідженню вибухових хвиль, створюваних з допомогою спеціального генератора. Останній являє собою ударну трубу з секціями високого і низького тиску, розділеними металевою діафрагмою. При цьому профіль вибухової хвилі утворюється всередині труби шляхом регулювання довжини секції. Після цього вивчається зміна тиску вибухової хвилі, після її проходження через зразок пінопласту різної товщини.

Вибухові роботи на гірничодобувних підприємствах є причиною численних просадок фундаментів, руйнування фундаментів та несучих елементів буді-

вель та споруд, наприклад, у Кривому Розі [34]. Вплив посилюється водоносними пісками, що розташовані під більшою частиною території міста. Спектральний аналіз сейсмограм показує, що частотний спектр вибухів від 9,1 до 24,7 разів перевищує спектр перших частот власних коливань будівель.

Можна констатувати, що вибухи надають руйнівний вплив на окремі елементи будівель і призводять до наступних наслідків. Вибухова хвиля викликає періодичні циклічні зміни тиску, що зумовлює деформацію матеріалів і пошкодження конструкції. Пошкодження фундаменту впливає на його деформації або руйнування, що особливо критично для висотних будівель або будівель, побудованих на нестійких ґрунтах. Можливе пошкодження внутрішніх систем будівлі, таких як електрична проводка, водопровідні труби та системи опалення, що збільшує ризик загоряння або протікання. Високі напруження і деформації в структурі будівлі спричиняють руйнування їх несучих елементів, таких як стіни, балки та колони, що приводить часткового або повного обвалення будинку (рис. 1.5).

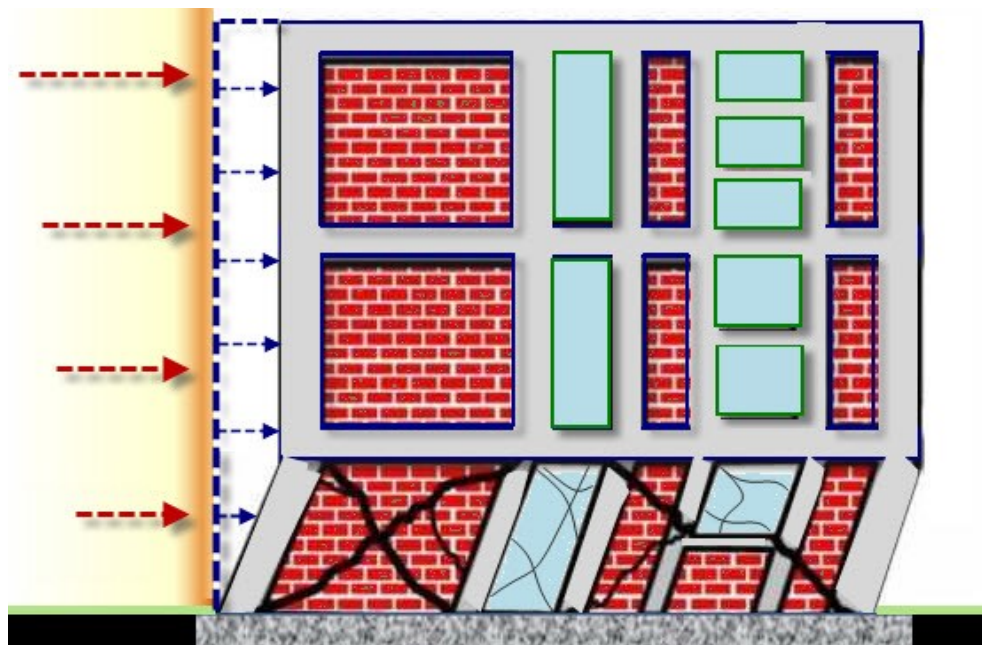


Рис. 1.5 Схема руйнування несучих конструкцій першого поверху від впливу вибухової хвилі

Пожежі є ще одним із найбільш небезпечних для будівель та споруд явищ, здатних призвести до серйозних руйнувань та втрат [35]. Розуміння факторів, що впливають на руйнування будівель під час пожежі, відіграє важливу роль у розробці ефективних заходів щодо запобігання та боротьби з вогнем. Розглянемо основні фактори, які визначають ступінь руйнування будівель під час пожежі.

Структурні особливості матеріалів, архітектурний дизайн та конструктивні рішення, значно впливають на поведінку споруди під час пожежі. Наприклад, будівлі, побудовані з вогнестійких матеріалів, таких як бетон або сталь, мають більше шансів встояти при пожежі, ніж будівлі з матеріалів, що легко займаються.

Теплові навантаження під час пожежі можуть бути дуже великими, перевищуючи температуру кількох сот градусів Цельсія [36]. Це веде до нагрівання навколишніх матеріалів і конструкцій будівлі, що призводить до їх деформації, руйнування або плавлення.

Різні матеріали реагують по-різному на теплові навантаження при пожежі. Наприклад, метали, такі як сталь, втрачають міцність при нагріванні та піддаються деформації або навіть плавленню при високих температурах. Дерево і пластик можуть спалахувати і згоряти, що призводить до втрати несучої здатності конструкцій. Керамічні і бетонні матеріали зазвичай більш стійкі до високих температур, але можуть руйнуватися при значному нагріванні.

Дерево є одним з найбільш поширених будівельних матеріалів завдяки своїй доступності, міцності та легкості обробки. Однак, при пожежі дерев'яні конструкції схильні до різних видів деформацій, які загрожують стійкості будівлі та безпеці його мешканців. Однією з основних проблем є обвуглювання деревини, при якому деревина втрачає свою міцність і стає крихкою. Крім того, високі температури часто викликають викривлення дерев'яних балок, стовпів та інших елементів конструкції, що може призвести до втрати несучої здатності. Хоча бетон і цегла мають високу вогнестійкість, вони також можуть піддаватися тепловим деформаціям при пожежі. При високих температурах бетон може

розширюватися і тріскатися, а цегляні стіни можуть руйнуватися через утворення в них пари та збільшення внутрішнього тиску.

Наявність пожежних стін і перегородок, а також систем пожежогасіння та вентиляції, знижують ризики поширення вогню та обмежують його вплив на будинок.

Способи розповсюдження вогню по будівлі через відкриті вікна та двері, вентиляційні системи, щілини та тріщини у конструкції, також відіграють важливу роль у його руйнуванні. Наприклад, пожежні вентиляційні отвори та канали можуть сприяти швидкому поширенню вогню та диму по будівлі, що збільшує ризик його руйнування. Контроль над шляхами поширення вогню та його ізоляція важливі для мінімізації шкоди.

Наявність або відсутність ефективної системи евакуації у будівлі також суттєво впливають на безпеку людей під час пожежі. Наявність шляхів евакуації, чіткого маркування та сигналізації, а також зручності використання евакуаційних виходів можуть суттєво підвищити шанси людей на порятунок та знизити ризик їх оточення вогнем в будівлі.

Дотримання будівельних і пожежних стандартів, встановлення систем пожежної сигналізації та охорони, регулярна перевірка та обслуговування систем пожежогасіння, а також навчання працівників та мешканців будинків правилам пожежної безпеки, є важливими кроками щодо мінімізації збитків від пожежі та захисту будівель.

Таким чином, фактори, що впливають на руйнування будівель при пожежі, включають структурні особливості будівлі, поширення вогню, наявність систем евакуації та захисні заходи. Розуміння цих факторів та вжиття відповідних заходів щодо їх управління є важливими аспектами забезпечення безпеки людей та збереження будівель з мінімізацією ризику їх руйнування під час пожежі.

1.2 Фактори навколишнього середовища, що впливають на руйнування наземних та поглиблених споруд і створюють небезпечні умови під час їх тривалої експлуатації

Тривала експлуатація будівель і споруд призводить до природних процесів старіння, які відіграють значну роль у їхньому руйнуванні. Перелічимо основні чинники, що впливають на неминучу втрату стійкості споруд.

Корозія являє собою хімічний процес руйнування матеріалів під впливом навколишнього середовища, який має серйозні наслідки для стійкості будівель і безпеки людей. Цей процес часто викликається взаємодією металевих матеріалів з водою, киснем та іншими агресивними речовинами, що призводить до утворення корозійних продуктів і втрати міцності конструкцій.

Механізм розвитку корозії зв'язаний з хімічною реакцією між металевими матеріалами і навколишнім середовищем, переважно вологою і киснем. Цей процес включає в себе кілька етапів, починаючи з ініціювання дефектів на поверхні металу і закінчуючи руйнуванням матеріалу в результаті утворення корозійних продуктів. Перший етап це ініціювання – утворення мікроскопічних дефектів на поверхні металу, які можуть бути спричинені механічними ушкодженнями, подряпинами або іншими зовнішніми впливами. Другий етап це адсорбція, коли волога і кисень із навколишнього середовища адсорбуються на поверхні металу і створюють умови для хімічних реакцій. Далі відбувається ініціація корозії внаслідок хімічної реакції між металом, водою і киснем утворюються корозійні продукти, такі як оксиди, гідроксиди або солі металу. Під час продовження корозії продукти корозії можуть утворювати захисні плівки на поверхні металу, але за наявності агресивних умов (наприклад, високої вологості або наявності кислотних речовин) ця плівка може бути зруйнована, що призводить до подальшого руйнування металу. Далі відбувається поступове руйнування конструкцій, що проявляється в утворенні тріщин, бульбашок, іржі й інших дефектів не тільки на поверхні, а й усередині матеріалу.

Вплив корозії на руйнування будівель і споруд починається з поверхневої корозії. До поверхневої корозії належить, наприклад, піттінгова корозія, яка ха-

рактеризується утворенням дрібних ямочок (пітів) на поверхні металу, що виникає в умовах наявності хлоридів, вологості та кисню. Утворення іржі та інших корозійних дефектів на поверхні металу призводить до порушення естетичного вигляду будівлі та погіршення її зовнішнього стану, але не до ризиків обвалення або руйнування будівлі.

Особливу увагу слід звертати на корозію з розвитком внутрішніх пошкоджень і руйнувань в елементах споруд, що призводить до зниження їхньої міцності, втрати несучої здатності конструкцій, підвищує ризики обвалення будівлі. Відповідно, тривала експлуатація будівлі вимагає регулярного контролю за станом об'єкта, технічного обслуговування і ремонту для підтримання його безпеки. До таких небезпечних видів корозії належить втомна корозія, вона відбувається в разі поєднання циклічного навантаження і корозійного впливу на металеві елементи. Втомна корозія призводить до появи розвитку внутрішніх тріщин і деформації матеріалів, що збільшує ймовірність їхнього руйнування. У зв'язку з цим, ефективний контроль і запобігання корозії є одним з ключових аспектів забезпечення довговічності та безпеки будівель і споруд.

Поступове зниження міцності та пластичності бетонних конструкцій в результаті корозії арматурної сталі показує, що необхідно враховувати зміну сейсмічних характеристик з часом. У роботі [37] представлений ймовірнісний підхід до оцінки сейсмічних характеристик бетонних конструкцій з урахуванням взаємодії сейсмічних та екологічних небезпек. Ефективність запропонованого підходу доведена при його застосуванні до багатопверхових збірних будівель, що піддаються корозії. Результати досліджень [37] показали, що конструкції, спроектовані для однієї й тієї ж сейсмічної дії, можуть мати різні сейсмічні характеристики протягом усього терміну служби в залежності від впливу навколишнього середовища. Ці результати підкреслюють важливість підходу, заснованого на життєвому циклі, як для сейсмічної оцінки існуючих будівель, так і для сейсмічного проектування нових конструкцій.

Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії регламентується вітчизняними та європейськими нормативно-технічними документами [38-

41]. Щоб забезпечити термін служби таких конструкцій авторами [42, 43] проведено розширений перегляд існуючих методів оцінки пошкоджень, які поділено на дві категорії: якісні та кількісні. В результаті робиться висновок, що найбільш вичерпними методиками оцінки є кількісні методи, підкріплені даними, що ґрунтуються на експериментальних дослідженнях.

Зробимо висновок, що корозія може призвести до серйозних наслідків для будівель і споруд, включно з їхнім частковим або повним руйнуванням, втраченою несучою здатністю, підвищеною небезпекою для життя і здоров'я людей, які перебувають усередині будівлі, а також значними матеріальними втратами.

Ще однією групою факторів, які суттєво впливають на стійкість будівель та споруд є суфозія, ерозія та вимивання тіла конструкцій.

Суфозія є процесом руйнування бетонних і кам'яних конструкцій під впливом сульфатів, що проникають у матеріали з навколишнього середовища. Цей процес може призвести до серйозних пошкоджень будівель та інфраструктури, особливо в умовах підвищеної вологості та наявності сульфатвмісних речовин. Механізм суфозії полягає в тому що сульфати, що містяться в ґрунті, воді або атмосферних осадах, можуть реагувати з компонентами бетону (цемент і кам'яна фракція), утворюючи сульфатні сполуки. Ці сполуки збільшуються в об'ємі порівняно з вихідними компонентами, що призводить до деформації та руйнуванню структури бетону. Проникнення сульфатів у пори та тріщини бетону прискорюється в умовах високої вологості, що збільшує швидкість процесу руйнування та зростанню внутрішніх пошкоджень.

Серйозні наслідки суфозії для стійкості будівель та споруд (рис. 1.6):

- руйнування бетонних структур, в результаті реакції сульфатів з компонентами бетону, що призводить до поступового утворення тріщин, руйнування поверхні і навіть обвалення конструкції;
- втрата несучої здатності конструктивних елементів внаслідок впливу сульфатів на зниження міцності бетону та каменю, що збільшує ризик втрати несучої здатності будівель та створює небезпеку для їх експлуатації.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.6 Наслідки впливу обводнення на споруди: а, б – тріщини і корозія в тунелі Амтрак під Іст-Рівер; в – аварійний стан споруди внаслідок тиску ґрунтових вод; г – вивал у тунелі Caldwell внаслідок обводнення

В результаті пошкоджені внаслідок впливу суфозії об'єкти вимагають ремонту і обслуговування, що призводить до значних фінансових і тимчасових витрат на регулярний контроль і ремонт.

Для запобігання суфозії та мінімізації негативних наслідків можуть бути використані такі методи:

- використання високоякісного цементу і кам'яної фракції з низьким вмістом сульфатів;
- нанесення захисних покриттів на бетонні поверхні, що допомагає запобігти проникненню сульфатів і захищає конструкцію від руйнування;
- поліпшення системи дренажу та водовідведення навколо будівель, що допомагає запобігти накопиченню вологи та знижує ймовірність суфозії.

Великий вплив на руйнування будівель протягом їх тривалої експлуатації має вимивання матеріалів несучих конструкцій будівлі. Вимивання матеріалів – це процес втрати частинок або розчинних компонентів з матеріалу під впливом води або інших рідин. Цей процес може мати серйозні наслідки для довговічності та безпеки будівель, особливо в умовах високої вологості або впливу ґрунтових, паводкових, каналізаційних та інших вод і рідин.

Механізми вимивання матеріалів полягає в перенесенні розчинних компонентів матеріалу під впливом потоку води [44]. Цей процес може бути викликаний природними факторами (дощ і ґрунтові води), а також людською діяльністю (втрата води із систем дренажу або водовідведення).

При вимиванні цементу із бетонної структури під впливом води відбувається видалення цементного розчину з порової системи бетону. Цей процес зменшує міцність бетону і може призвести до утворення тріщин та деформацій у конструкції.

Камінь і цегла, також схильні до вимивання своїх мінеральних компонентів під впливом води, що може призвести до поступового руйнування структури матеріалу з яких побудовані стіни, особливо в умовах підвищеної вологості.

Витоки води вимивають розчинні мінерали із ґрунту навколо фундаменту будівлі. Цей процес призводить до утворення порожнин під фундаментом, що загрожує його стійкості і може викликати деформації і обвалення будівлі.

Якщо будівля містить металеві елементи, вони також можуть піддаватися вимиванню під впливом вологи. Це може призвести до корозії та деградації металу, що зменшує міцність конструкції та збільшує ризик руйнування.

Кожен із цих видів вимивання матеріалів може мати серйозні наслідки для довговічності та безпеки будівель.

Для запобігання вимиванню матеріалів та мінімізації його негативного впливу на будівлі можуть бути застосовані такі методи:

- створення ефективної системи дренажу та водовідведення, що допомагає запобігти скупченню вологи навколо будівлі та зменшити ймовірність вимивання матеріалів;
- нанесення гідроізоляційних матеріалів на поверхню будівлі, що допомагає захистити його від впливу води і зменшити ризик вимивання;
- використання матеріалів з високою стійкістю до вимивання, таких як камінь або спеціальні добавки до бетону, що допомагає збільшити довговічність будівлі.

Як спосіб укріплення ґрунтової основи при будівництві автори [45] розглядають силікатизацію. Це процес хімічної фіксації рідким склом, що пропускають крізь ґрунт. Кремнієва кислота в ґрунті перетворюється на гель і зв'язує мінеральні часточки. Було виявлено, що метод силікатизації є більш кращими з точки зору ціни. Визначення та оцінка технічного стану будівель і споруд з урахуванням вимивання ґрунтів регламентується документами [46, 47].

На стан будівель і споруд протягом їх тривалої експлуатації серйозно впливає процес ерозії. Цей процес відбувається під впливом різних екологічних та механічних факторів, таких як вітер, вода, температурні зміни та абразивні частинки [48, 49].

Вітер, вода, температурні зміни і абразивні частки можуть викликати механічні пошкодження матеріалів і поступово, протягом тривалого часу їх руй-

нувати. Вітрова ерозія особливо активна у регіонах із сильними вітрами, де піщані частинки можуть бути перенесені на значні відстані та завдавати поверхневих пошкоджень. Водна ерозія відбувається під впливом дощу, снігу і талих вод, які можуть розмивати і руйнувати матеріали. Термічна ерозія викликається екстремальними температурами, які призводять до термічних деформацій матеріалів та їх руйнування.

Практичні методи запобігання та зменшення впливу ерозії на будівлі та споруди:

- використання захисних покриттів та матеріалів, які стійкі до впливу вітру, води та температурних змін;
- регулярне технічне обслуговування та контроль, що дозволяють виявляти та усувати пошкодження, викликані ерозією, на ранній стадії;
- застосування ландшафтних заходів, таких як насадження рослинності та створення водовідвідних систем, для зниження впливу вітру та води на будівлі.

Автори [48] в своєму дослідженні приділили увагу ерозії поверхні будівель через вплив кліматичних умов. Основні фактори поступової поверхневої ерозії класифіковано за чотирма компонентами втрат: цінності, небезпека, вразливість і вразливість при прогнозуванні. За допомогою рентгеноструктурного аналізу, електронної мікроскопії та ультразвукових методів реєстрації змін властивостей пісковику встановлено, що ерозія під впливом природнього середовища супроводжується розвитком дефектів (тріщин, розколин, отворів), а також утворенням свіжого матеріалу [49, 50]. Була отримана розрахункова модель для визначення точки розмежування різних стадій ерозії.

Постійна дія ерозії призводить до утворення тріщин, сколів та пошкоджень поверхонь будівельних матеріалів. Це не тільки погіршує зовнішній вигляд будівель, але і може призвести до руйнування їх структурної цілісності. Ерозія може викликати значну втрату міцності будівельних матеріалів, особливо якщо вони піддаються механічним і хімічним впливам протягом тривалого часу. З плином часу поверхневі пошкодження переростають у глибокі тріщини і наскрізні руйнування. Це призводить до істотного підвищення ризиків обва-

лення стін, дахів та інших конструкцій. В результаті, пошкодження, спричинені ерозією, скорочують термін служби будівель та споруд, що вимагає додаткових витрат на їх планові ремонти, обслуговування та контроль стану. Крім того, це може призвести до передчасної потреби реконструкції або заміни. Враховуючи значущість цієї проблеми, подальші дослідження в цьому напрямку мають велике значення для забезпечення безпеки у будівельній індустрії.

Наступною групою факторів, які відіграють значну роль у процесі руйнування будівель та споруд протягом їх тривалої експлуатації є теплові цикли та погодні перепади температур. Ці фактори викликають термічні деформації матеріалів, що зрештою призводить до пошкоджень конструкцій. Механізми дії цих факторів полягають у наступному. Теплові цикли і перепади температур погоди впливають на матеріали будівель і споруд шляхом їх розширення і стиснення в залежності від змін температури. Цей процес повторюється протягом дня і ночі, сезонів і років, що призводить до накопичення руйнувань у структурі будівельних матеріалів. Вищі температури викликають розширення матеріалів, а нижчі – стиснення. При постійному повторенні цих циклів матеріали деформуються і стають менш міцними, що збільшує ймовірність їх руйнування. Цей процес особливо активний у регіонах із суворим кліматом, де відбуваються значні зміни температури.

Теплові цикли та перепади температур погоди мають такий вплив на стан будівель та споруд:

- розширення та стиснення будівельних матеріалів під впливом температурних змін викликає появу термічних напружень в структурних елементах будівлі, що призводить до утворення тріщин, деформацій та руйнування матеріалів;
- постійний вплив теплових циклів може спричинити деформацію конструкцій будівель, що призводить до втрати їх міцності та стійкості;
- теплові цикли, що повторюються, можуть викликати знос (втому) будівельних матеріалів, особливо металевих, що теж призводить до втрати міцності.

Для зниження впливу теплових циклів та перепадів температур на будівлі та споруди можна застосовувати ряд практичних методів. По-перше, це використання стійких матеріалів. При проектуванні та будівництві будівель слід вибирати матеріали, які мають хорошу термічну стабільність і здатні витримувати великі перепади температур. По-друге, це використання ізоляції. Ізоляційні матеріали можуть допомогти знизити вплив теплових циклів на конструкції, запобігаючи або зменшуючи розширення та стиснення матеріалів. По-третє, це регулярний контроль та технічне обслуговування, що можуть допомогти виявити та вирішити проблеми, спричинені тепловими циклами на ранніх стадіях, перш ніж вони призведуть до серйозних пошкоджень.

Таким чином, теплові цикли та перепади температур погоди становлять значну загрозу для довговічності та безпеки будівель та споруд. Розуміння механізмів впливу цих факторів та застосування відповідних методів контролю та своєчасного ремонту дозволить забезпечити збереження будівель та споруд на довгі роки експлуатації.

Біологічні чинники також відіграють значну роль у процесі руйнування будівель та споруд протягом їх тривалої експлуатації [51]. Зростання рослин супроводжується їх проникненням в тріщини та щілини будівель, їх коріння можуть розширюватися, послаблюючи та руйнуючи структуру будівельних матеріалів. Мікробіологічні процеси – мікроорганізми, такі як гриби, пліснява та бактерії, можуть розкладати органічні компоненти деревини, ізоляційних матеріалів та навіть бетону. Діяльність комах (терміти, мурахи і клопи) можуть проникати в матеріали будівель і руйнувати їх, харчуючись деревиною, папером та іншими органічними матеріалами.

Біологічні фактори мають такий вплив на стан будівель і споруд:

- пошкодження матеріалів обумовлено проникненням коренів рослин, активністю мікроорганізмів і діяльністю комах, що призводить до руйнування матеріалів будівель, втрати їх міцності та стійкості;

- утворення тріщин і порожнин обумовлено діяльністю біологічних організмів і може призвести до утворення тріщин, порожнин та інших пошкоджень в структурі будівель, що погіршує їх естетичний вигляд та функціональність;
- прискорення процесу старіння матеріалів будівель, що скорочує їх термін служби і вимагає додаткових витрат на ремонт та обслуговування.

Для зниження впливу біологічних факторів на будівлі та споруди можуть бути застосовані ряд методів. Використання захисних покриттів і матеріалів можуть допомогти захистити будівельні матеріали від проникнення в них вологи та організмів. Регулярний контроль та обслуговування дозволяють виявляти та усувати проблеми, викликані біологічними факторами на ранніх стадіях. Застосування хімічних засобів для боротьби зі зростанням рослин, мікроорганізмами і комахами може допомогти запобігти їх руйнівному впливу на будівлі.

Таким чином, біологічні фактори є серйозною загрозою для довговічності та безпеки будівель та споруд. Розуміння механізмів впливу цих факторів та застосування відповідних методів запобігання допоможе зменшити їх негативний вплив та забезпечити збереження та довговічність інфраструктурних об'єктів.

Гравітаційні навантаження є одним з основних факторів, що впливають на міцність і стійкість будівель і споруд протягом їх тривалої експлуатації. Навантаження діють протягом тривалого часу. Ці навантаження походять від ваги самої будівлі та її елементів, а також від зовнішніх впливів, таких як снігові та вітрові навантаження [52]. Впливом тривалих гравітаційних навантажень на руйнування конструктивних елементів будівель не можна нехтувати так як відбуваються ущільнення ґрунту, деформація фундаменту або руйнування конструкцій.

Вплив на руйнування будівель і споруд гравітаційні навантаження здійснюють наступним чином. Виникають деформації і тріщини в конструкціях будівлі, особливо у вразливих місцях (з'єднання та вузли), це наслідок постійної дії вертикальних та горизонтальних навантажень. Навантаження, що повторюються, можуть призвести до втоми матеріалів будівлі, особливо металевих, що зменшує їх міцність і несучу здатність з часом. Втрата стійкості будівлі, що

може призвести до обвалення чи руйнування його конструкцій, може бути наслідком надлишкових навантажень, наприклад, землетрусу, вибуху або неправильного розподілу навантажень.

Для зниження впливу гравітаційних навантажень на будівлі та споруди можуть бути застосовані такі методи:

- будівлі мають проектуватися з урахуванням можливих гравітаційних навантажень із запасом міцності, щоб забезпечити їх стійкість та безпеку;
- навантаження повинні бути рівномірно розподілені по всій конструкції будівлі, щоб уникнути концентрації напружень у вразливих місцях;
- при необхідності посилення та ремонт конструкцій будівлі повинні виконуватися з урахуванням гравітаційних навантажень та запобігання можливим пошкодженням.

Таким чином, гравітаційні навантаження є важливим фактором, що визначає міцність та стійкість будівель та споруд. Розуміння механізмів їх впливу та застосування відповідних методів контролю цілісності будівлі дозволяє своєчасно запобігати їх наслідкам, зменшити ризик руйнувань та забезпечити збереження будівель та споруд.

Всі ці процеси можуть відбуватися поступово протягом десятиліть або навіть століть, але в кінцевому підсумку вони призводять до погіршення стану будівель і споруд і вимагають регулярного контролю їх стійкості, а також своєчасного технічного обслуговування та ремонту, саме такий підхід може забезпечити їх безпечну експлуатацію.

1.3 Методи оцінки стану будівель та споруд

Методи моніторингу, діагностики та оцінки стану будівель та споруд грають ключову роль у забезпеченні їх безпеки, довговічності та функціональності протягом усього періоду експлуатації [53-56]. Методи дозволяють виявити потенційні проблеми, визначити рівень зносу та оцінити ступінь необхідних ремонтних робіт. У цьому розділі ми розглянемо основні методи техніч-

ної експертизи та діагностики, які використовуються для оцінки стану будівель та споруд.

Візуальний огляд є одним із найпоширеніших методів оцінки стану будівель. При цьому процесі експерт оглядає будівлю зовні і всередині, щоб виявити видимі ознаки пошкоджень, деформацій, тріщин, зносу матеріалів та інших потенційних проблем. Візуальний огляд надає базову інформацію про стан будівлі і може бути використаний для визначення необхідності подальших методів діагностики.

Використання технічних засобів відіграють важливу роль в оцінці стану будівель та споруд. До них відносяться різні типи обладнання, такі як ендоскопи, геодезичне обладнання, інфрачервоні тепловізори, ультразвукові дефектоскопи, геофізичні прилади та інші. Ці інструменти і прилади дозволяють проводити більш детальну діагностику і виявляти приховані пошкодження, які можуть бути невидимими при звичайному візуальному огляді.

Лабораторні аналізи та моніторинг застосовуватися для більш глибокої оцінки стану будівель і споруд. До них відносяться методи ультразвукова діагностика, радіографія, випробування на міцність матеріалів, моніторинг деформацій та інші. Проводяться випробування фізико-механічних властивостей матеріалів, що використовуються в конструкції будівлі. Це може містити випробування на міцність, зносостійкість, стійкість до корозії та інші параметри. Ці методи дозволяють отримати точні дані про структуру та стан будівлі, а також виявити приховані дефекти та проблеми, які не можуть бути виявлені іншими способами.

Використання комп'ютерних моделей стало доступним з розвитком методів чисельного моделювання та комп'ютерного аналізу, які використовуються для оцінки стану будівель та споруд. Головне у моделюванні дотримання фізичної, геометричної та інших видів подібності, а також порівняння результатів моделювання з реальним об'єктом. Моделювання дозволяє проводити комплексний аналіз навантажень, деформацій, міцності та інших параметрів конструк-

ції, що допомагає виявити потенційні проблеми та оптимізувати процес обслуговування та ремонту.

Узагальнюючим результатом є технічне обстеження об'єкта [57-60]. Цілі технічного обстеження: оцінка поточного стану будівлі та споруд; виявлення дефектів та пошкоджень конструкцій; визначення рівня зносу та ступеня пошкодження матеріалів; оцінка безпеки та стійкості будівлі; надання рекомендацій щодо проведення ремонтних та відновлювальних робіт.

Процес технічного обстеження включає декілька етапів:

1) Підготовчий етап включає збір та аналіз наявної документації, оцінку історії експлуатації будівлі, а також планування методів та об'єму обстеження.

2) Проведення обстеження включає безпосереднє проведення різних видів досліджень і аналізів, відповідно до заданих цілей і вимог.

3) Аналіз результатів включає обробку та інтерпретацію отриманих даних, виявлення проблем і дефектів, а також формулювання висновків та рекомендацій.

4) Підготовка звіту включає складання докладного звіту про результати обстеження, у тому числі опис виявлених проблем, рекомендації щодо проведення робіт та пропозиції щодо поліпшення стану будівлі.

Технічне обстеження є важливим етапом у забезпеченні безпеки, довговічності та ефективної експлуатації будівель та споруд. Воно дозволяє виявити проблеми і потенційні загрози, розробити стратегії обслуговування і ремонту, а також вжити заходів для забезпечення збереження об'єкта протягом всього терміну служби.

Можна зробити висновок, що методи моніторингу стану та діагностики відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки, довговічності та ефективної експлуатації будівель і споруд. Комбіноване використання різних методів дозволяє отримати комплексну оцінку стану об'єкта та прийняти обґрунтовані рішення щодо його обслуговування та ремонту.

У процесі визначення стану та виявлення руйнувань будівель при їх тривалій експлуатації відіграє важливу роль використання документації та архівів.

Вони надають цінну інформацію про будівництво, обслуговування та попередні ремонти будівлі, що допомагає краще зрозуміти його історію та потенційні проблеми. Розглянемо, як саме можна використовувати документацію та архіви для визначення причин та можливих наслідків руйнувань будівель.

Аналіз проектної документації. Проектна документація містить інформацію про технічні рішення, використовувані матеріали, конструкції та інші аспекти, пов'язані з будівництвом будівлі. При аналізі проектної документації можна виявити потенційні проблеми, пов'язані з недоліками проектування, неправильним вибором матеріалів або конструктивними помилками, які можуть призвести до руйнування будівлі. Крім того, будівельні креслення містять інформацію про геометрію, розміри, розташування конструкцій та інші важливі деталі будівлі. При аналізі будівельних креслень можна виявити потенційні вразливі місця, такі як точки з'єднання конструкцій, переходи між матеріалами або недостатньо міцні елементи.

Використання технічних звітів та записів обслуговування зв'язано з тим, що вони містять інформацію про проведені роботи з ремонту, заміні інфраструктури та обслуговування будівлі. Можуть включати дані про стан конструкцій, виявлені дефекти, використані матеріали і методи ремонту. Аналіз цих документів дозволяє оцінити історію обслуговування будівлі та виявити повторювані проблеми, які можуть призвести до руйнування.

Історія ремонтів і змін в будівлі містить інформацію про попередні роботи з відновлення та посилення конструкцій, заміну матеріалів та інші втручання. Розуміння, які роботи були виконані та з яких причин, дозволяє оцінити ступінь зносу та ризики руйнування будівлі. Тому одним із пріоритетних завдань є оцінка будівель, метою якої є визначення негативних факторів, що збільшують ймовірність невідповідності характеристикам, наприклад, з урахуванням інтенсивності сейсмічних коливань [61]. Таким чином, використання документації та архівів є важливим інструментом для визначення руйнувань будівель при їх тривалій експлуатації. Аналіз проектної документації, технічних звітів, будівельних креслень та історії ремонтів дозволяє виявити потенційні

проблеми, розробити стратегії обслуговування та ремонту, а також вжити заходів для забезпечення безпеки та довговічності будівлі.

1.4 Основні методи неруйнівного моніторингу для діагностики внутрішньої структури різних середовищ

Для безпеки експлуатації будівель і споруд, зниження операційних та екологічних ризиків у випадках часткової втрати стійкості, важливою є своєчасність та швидкість моніторингу внутрішніх пошкоджень їх конструктивних елементів [62, 63]. Моніторинг ґрунтується на знанні фізичних процесів та здійснюється різними контрольовано-вимірювальними засобами, вибір яких визначається властивостями досліджуваних матеріалів. При цьому методи неруйнівного контролю, що здебільшого представлені геофізичними методами, насамперед використовують для задач оцінки стійкості різних об'єктів. Моніторинг будівель та споруд може виконуватися у процесі їх експлуатації без нанесення шкоди бетонним, залізобетонним, цегляним та багатошаровим конструктивним елементам.

Неруйнівний контроль і технічна діагностика будівель і споруд включають геофізичні методи - ультразвуковий, електрометричний, сейсмічний, сейсмоакустичний, електромагнітний, ударнохвильовий та ін. [64-69] Методи дозволяють: оперативно визначати тріщинуватість, якісно оцінювати напруження та параметри аномальних зон, виявляти структурні неоднорідності, зони обводненості, межі розділу різних середовищ та інші. При цьому бажано, щоб контроль був неперервний та оперативний.

При виборі методу контролю враховують такі чинники: завдання, які можна розв'язати шляхом виконання контролю; ступінь інформативності методу; умови виконання вимірів; результати попереднього візуального обстеження; наявність відповідних технічних засобів; прийнятну величину трудових та матеріальних витрат; тривалість всього циклу робіт.

Основний принцип контролю полягає у порівнянні усереднених значень для будь-якого контрольованого конструктивного елемента будівель та споруд

зі значенням, отриманим для незруйнованого конструктивного елемента. Визначаються характерні дефекти та найефективніші варіанти діагностики, конкретизуються граничні умови.

Для задач контролю тріщинуватих зон у конструктивних елементах будівель і споруд добре зарекомендував себе віброакустичний метод, який успішно використовується для експрес-оцінки стану наземних, поглиблених та підземних споруд. Метод показав досить високу ступень інформативності при оцінці тріщинуватості порід, бетонних стін та кріплення тунелів. Частотні параметри ультразвукових коливань менше залежать від напруженого стану середовища, ніж параметри, що визначаються іншими методами. В основному вони визначаються процесами інтерференції, дифракції, дисипації і містять інформацію про існуючі порушення та тріщинуватість. Тому для виявлення систем тріщин доцільно застосовувати саме метод ультразвукових вимірювань з аналізом спектра пружних хвиль, який дозволяє визначати частотні параметри середовища.

На низьких частотах відбувається зменшення згасання хвиль і з'являються резонансні власні коливання, що обмежені тріщинами. Хаотичний розподіл тріщин призводить до безперервного (розпливчастого) спектру, в якому за максимальними амплітудами визначають переважаючі частоти [68, 69]. Залежність коефіцієнтів відбиття і заломлення від довжини хвилі призводить до того, що в спектрі заломленої хвилі найменшим змінам піддаються низькі частоти, у той час як у спектрі відбитої хвилі переважають високі частоти. Тому основні особливості форми заломлюючої поверхні переносяться заломленими хвилями, а відбиті створюють у середовищі лише високочастотний, швидко загасаючий шум. Отже, при частотному аналізі доцільно застосовувати метод прозвучування, який дозволяє встановити діапазони аномального поглинання.

При виконанні віброакустичних робіт в якості реєструючих засобів також можуть бути використані вітчизняні портативні аналізатори спектру (рис. 1.7). Однак можливий і простіший варіант, який включає: фотографування осцилограм цифровим фотоапаратом; перенесення по завершенню експерименту даних у стаціонарний персональний комп'ютер; обробка зображення з виділенням ос-

цилограми, її оцифруванням та виконанням спектрального аналізу за допомогою спеціалізованих програм.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.7 – Приклади вітчизняних засобів ударно-хвильової діагностики, які використовуються для віброакустичного контролю наземних, поглиблених та підземних споруд: а – апаратура «Спектр-1М»; б – індикатор «Дікон»; в – індикатор ІСП-1Ш; г – індикатор «ПВК»

Для встановлення розміру зони тріщинуватості необхідно аналізувати осцилограми, що одержані при прозвучуванні на різних відстанях по довжині елемента конструкції. База прозвучування повинна залишатися постійною, оскільки зі збільшенням відстані максимум спектральної щільності внаслідок різного поглинання на високих та низьких частотах зміщується переважно у бік

низьких частот. Тріщинуваті або зруйновані ділянки будівель і споруд характеризуються безліччю взаємопов'язаних параметрів, що випадково змінюються, тому для їх вивчення необхідний статистико-ймовірнісний підхід. Це дає можливість отримувати інтегральні параметри середовища на основі аналізу системи статистичних оцінок з певною довірчою ймовірністю та точністю. Тому, за винятком великих тріщин, метод ультразвукового прозвучування визначатиме деяку усереднену тріщинуватість з урахуванням пористості та структурних неоднорідностей.

Акустичний метод визначення напружень заснований на вимірі акустичних показників - швидкостей поширення, коефіцієнтів згасання пружних хвиль і порівнянні отриманих характеристик з таруючими залежностями. При стисканні значні зміни швидкості поширення поздовжніх хвиль спостерігаються у напрямі, паралельному навантаженню. Збільшення значень швидкості поширення при одних і тих же тисках коливається від декількох відсотків до 30-40% (причому, чим міцніший матеріал, тим менше приріст швидкості, що пояснюється меншою наявністю в ній пір, тріщин та інших порожнин). Швидкість поширення поздовжньої хвилі в напрямках, перпендикулярних стиску, майже не змінюється.

При розтягуванні швидкості поширення пружних хвиль зменшуються, а коефіцієнти згасання зростають. Максимальне зменшення швидкості поздовжніх хвиль сягає 10-15%. Зменшення швидкості поширення поперечної хвилі вбирається у 2-4 %. Коефіцієнти згасання пружних хвиль при розтягуванні збільшуються на 60-200%. У разі зсуву коефіцієнт загасання зростає незначно. Вплив зсувних напружень на зміну швидкостей хвиль мінімально.

До фізичних обмежень методу відносяться відсутність пристрою, що дає ударний вплив з потрібними параметрами у всіх точках вимірювання, тобто відсутність автоматичного ударного пристрою.

1.5 Висновки, мета, завдання і методи досліджень

В умовах старого фонду будівель і великої кількості надзвичайних ситуацій, які активізуються динамічними впливами від вибухів, пожеж та землетрусів, необхідний контроль стійкості та забезпечення безпеки об'єктів з метою оцінки їхньої придатності до подальшої експлуатації. Це відноситься як до самих інфраструктурних об'єктів безпосередньо, в ролі яких можуть виступати виробничі цехи, споруди, тунелі та інше, так і житлові будинки і комплекси допоміжних будівель та споруд.

Стан безпеки будівель та споруд визначається пошкодженнями і тріщинуватістю несучих конструкцій. Накопичення внутрішніх пошкоджень, зріст тріщин в несучих стінах та фундаментах будівель є однією з найбільш поширених ознак потенційного руйнування в процесі експлуатації. Для моніторингу і діагностики стійкості споруд найкраще застосовувати геофізичні методи неруйнівного контролю, зокрема віброакустичний, який апробований в різних умовах і дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін перекриттів та інших видів конструкцій.

Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень необхідна розробка моделей складних коливань і вдосконалення методів ідентифікації досліджуваних структур. Тому актуальним науково-технічним завданням є встановлення закономірностей змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості у будівельних конструкціях, а також удосконалення методів, розробка алгоритмів і моделей керування віброакустичними коливаннями із заданими амплітудними та частотними характеристиками для визначення прихованої пошкодженості в елементах будівельних конструкцій віброакустичним методом, що підвищить безпеку експлуатації будівель і споруд.

Мета роботи – забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості елементів будівельних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети поставлені та вирішені **наступні задачі**:

- провести аналіз стану та методів оцінки безпеки будівель і споруд в процесі їх тривалої експлуатації та з урахуванням вибухів і пожеж;
- встановити взаємозв'язок змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості та удосконалити метод визначення пошкодженості в елементах будівельних конструкцій;
- розробити моделі та алгоритми складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд;
- провести лабораторні випробування роботи генератора механічних коливань для виробки типових впливів і автоматизації процесу віброакустичного контролю будівель та споруд;
- удосконалити метод оцінки безпеки будівель і споруд при виникненні спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу;
- розробити і впровадити Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації.

Методи досліджень: аналітичні методи класичної теорії хвиль і статистики, аналіз та узагальнення експериментальних даних; математичне та комп'ютерне моделювання динамічних процесів; лабораторні дослідження розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю; експериментальні дослідження спектральної щільності акустичних відгуків, стійкості будівель і споруд віброакустичним методом; статистична обробка результатів вимірювань; методологія організації обчислювальних процесів і алгоритмів керування віброакустичними коливаннями із заданими амплітудними та частотними характеристиками для визначення прихованої пошкодженості в елементах будівельних конструкцій; аналіз результатів.

РОЗДІЛ 2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТРУКТУРНИХ ПОРУШЕНЬ В МАТЕРІАЛАХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ВІБРОАКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

2.1 Визначення задач віброакустичного методу контролю конструктивних елементів будівель і споруд

Актуальність оцінки визначення стану будівель і споруд, насамперед, пов'язана з застарілістю основних фондів, відсутністю своєчасного і якісного їх ремонту. Крім цих факторів на будівлі діють струси і динамічні навантаження під час вибухів і пожеж, що викликає накопичення внутрішніх пошкоджень, значне руйнування матеріалів споруд і виникненням аварійних ситуацій. В таких умовах достовірний і продуктивний моніторинг характеристик надійності та стійкості конструкцій будівель є найважливішим елементом підвищення безпеки людей.

Для оцінки стійкості споруд у роботах [70, 71] запропоновано використовувати метод математичного моделювання, за допомогою якого можуть бути визначені сценарії зміни напружень при зміні умов, що впливають на стійкість об'єкта контролю. Разом з тим прогноз розвитку процесів руйнування вимагає якісного програмного забезпечення, великих обчислювальних витрат і наукоємного аналізу даних. В роботі [72] позначено, що моніторинг просторових та тимчасових варіацій продуктів розпаду радону може допомогти відслідковувати зміни небезпечних руйнівних процесів, що дозволяє знизити ризики втрати стійкості об'єктів.

Вирішення завдань безпеки пов'язане з частковою невизначеністю поведінки об'єкта контролю у певних умовах. Для подолання невизначеностей у роботах [73, 74] запропоновано оперувати діапазонами значень параметрів, межі яких визначаються, зокрема й аналітичними методами з урахуванням різних нечітких моделей. При цьому будь-які оцінки стійкості та безпеки об'єктів контролю мають базуватися на первинних даних, отриманих шляхом якісного та об'єктивного моніторингу.

Разом з тим, для моніторингу і діагностики стійкості споруд найкраще застосовувати геофізичні методи неруйнівного контролю, зокрема віброакустичний [75, 76]. Віброакустика ефективний та інформативний метод, який апробований в різних умовах і дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін перекриттів та інших видів конструкцій.

Суть віброакустичного контролю полягає в аналізі (за допомогою аналогових та цифрових програмно-апаратних технічних засобів автоматизації) сигналів акустичного відгуку контрольованого об'єкта на збурюючий вплив з метою оперативного визначення стану об'єкта на основі зібраної раніше та поточної технологічної інформації [77-79]. При цьому структуру, яка контролюється, можна подати як об'єкт з невідомою функцією передачі та внутрішньою структурою, що підлягають визначенню. Вхідними сигналами для цього об'єкта будуть нормовані збурювальні впливи. Система вихідних координат даного об'єкта є сукупністю сигналів відгуку, знятих в різних геометричних точках або в одній точці протягом одного або декількох циклів контролю.

У найпростішому випадку подається один збурюючий вплив і аналізується один сигнал відгуку. Блок ідентифікації та управління аналізує сигнали, що надійшли від акустичних датчиків, і формує систему сигналів, які можуть бути використані оператором або системою інтелектуальної підтримки як інформаційні для вироблення технологічних рішень. Крім того, сигнали можуть бути керуючими впливами для підлеглих контурів системи управління. Інформаційний сигнал або керуючий вплив виробляються в кожному циклі. У разі потреби виконується корекція амплітуди або просторових координат точки застосування віброакустичного впливу.

Віброакустичний контроль безпеки функціонування будівель і споруд дозволяє вирішувати наступні задачі:

- контролювати структуру, тріщинуватість в процесі їх експлуатації;
- контролювати структуру, тріщинуватість та міцність після обрушення окремих частин конструкції;

- контролювати допустиме навантаження частин конструкції після підсилення;
- визначати потенційні загрози та ідентифікувати ризики втрати стійкості після пожежі та вибухів.

Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень потрібна максимальна автоматизація віброакустичного методу. Для своєчасного контролю стійкості конструктивних елементів будівель і споруд необхідна розробка нових моделей складних коливань, ідентифікація досліджуваних структур та підвищення достовірності оцінок. У зв'язку з цим питання забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з використанням віброакустичного методу потребує подальших досліджень.

2.2 Ідентифікація структурних порушень в матеріалах конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом

Процеси руйнування конструктивних елементів будівель і споруд призводять до виникнення впорядкованої неоднорідності. Ступінь неоднорідності при вимірах умовно поділяють на чотири групи:

- неоднорідності великого масштабу, що включають розриви, зони розвантаження, будівельні об'єкти та споруди;
- неоднорідності структури та складу матеріалів у межах окремого конструктивного елемента, включаючи макротріщинуватість, наявність дрібних дислокацій;
- неоднорідність складу матеріалів у межах елементарного об'єму (наприклад, проба бетону), відмінність у хімічному та мінеральному складі, формі та розмірах зерен, мікротріщин;
- неоднорідності кристалів, дефектність кристалічних решіток, дислокації.

При вивченні землетрусів в основному використовують ударні хвилі (вибух або потужний ударний вплив). Під ударною хвилею розуміють хвилю, що

має стрибок тиску чи інших фізичних параметрів. Ударна хвиля в лінійно-пружних середовищах залишається ударною на всіх відстанях від початкової ділянки. В нелінійно-пружних середовищах основну ударну хвилю називають пластичною, тому що на її фронті відбуваються незворотні явища, а ударну хвилю, що рухається перед нею, пружною. По діапазонах частот пружні коливання класифікують: до 16 Гц – інфразвуки; від 16 до $16 \dots 20 \times 10^3$ Гц – звуки; від 16×10^3 – ультразвуки [80, 81]. Для того, щоб коливання стали незгасаючими, забезпечують постійний приплив енергії до системи.

Хвиля – це поширення коливань у просторі, що відбувається з кінцевою швидкістю. Вона є найшвидшим механізмом перенесення енергії без перенесення речовини, що дозволяє здійснити в системі перехід від не рівноважного стану до рівноважного. Критерієм переходу процесу від коливального руху до хвильового є умови квазістаціонарності:

$$L < vT \text{ – коливальний рух; } L > vT \text{ – хвильовий рух,} \quad (2.1)$$

де – L характерний лінійний розмір системи; v – швидкість поширення впливу (збудження); T – час його помітної зміни.

Коливальний процес відбувається у системі із зосередженими параметрами ($L < vT$), а хвильовий – із розподіленими.

Проведені вимірювання швидкостей пружних хвиль в матеріалах (табл. 2.1), часу зіткнення та реальних розмірів дерев'яних, бетонних і металевих конструкцій (табл. 2.2), як коливальної системи при ударному впливі.

У безмежному лінійному середовищі, де справедливий закон Гука, поздовжні та поперечні хвилі поширюються незалежно:

$$v_p = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(K + \frac{4}{3}G\right)}; \quad v_s = \sqrt{G/\rho}, \quad (2.2)$$

де v_p и v_s – швидкості поздовжніх та поперечних хвиль; K и G – модулі всебічного стиснення та зсуву, ρ – щільність.

Таблиця 2.1

Фізичні властивості матеріалів

Матеріал стін, фундаментів та ін.	Щільність, $\rho \times 10^{-3}$, т/м ³	Швидкості хвиль v , м/с		Коефіцієнт Пуассона μ	Модуль Юнга, $E \times 10^{-10}$. Па
		поздовж- них	попереч- них		
Бетон	2,3-2,5	3800-4400	2100-2400	0,25-0,33	2,5-3,8
Залізо	7,8	5850	3230	0,28	21
Алюміній	2,7	6260	3080	0,34	6,8
Дерево	0,4-1,1	3000-5000	1000-3200	0,20-0,40	0,1-3,0
Базальт	2,8-2,9	5200-5500	3000-3200	0,15-0,25	6,0-7,5
Кварцит	2,8-2,9	4600-6000	2800-3800	0,15-0,22	5,0-9,0
Граніт	2,7-2,8	5200-5500	3000-3300	0,20-0,30	5,6-7,5
Вапняк	2,6-2,7	3100-4700	2000-3100	0,11-0,22	3,5-6,3
Мармур	2,6-2,8	5300-5500	2800-3200	0,24-0,33	5,5-7,5
Гіпс	2,2-2,4	4700-5100	2200-2600	0,30-0,40	3,3-5,7

Таблиця 2.2

Оцінка матеріалів як коливальної системи при ударному впливі

Матеріал стін, фундаментів та ін.	Характерні по- перечні розміри	Час удару	Множення	Умова квазістаціо- нарності
	L , м	$T \times 10^3$, с	vT , м	
Залізо	0,01-0,5	0,2-0,3	1,2-1,8	$L < vT$
Граніт	0,1-0,6	0,2-0,4	1,1 -1,6	$L < vT$
Бетон	0,1-1,0	0,3-0,5	1,1-2,2	$L < vT$
Гіпс	0,01-0,05	0,4-0,6	1,9-2,9	$L < vT$
Алюміній	0,01-0,1	0,3-0,4	1,9-2,5	$L < vT$
Дерево	0,02-0,6	0,4-2	1,2-5,0	$L < vT$
Пластмаси	0,01-0,1	0,5-0,7	1,3-1,9	$L < vT$

Якщо модуль зсуву $G=0$, то середовище поводить ся як рідина чи газ, при цьому поперечні хвилі в ньому не поширюються. За наявності межі поздовжні та поперечні хвилі стають пов'язаними. Так, при розповсюдженні хвилі одного типу на межу твердого тіла відбувається трансформація частини її енергії у хвилю іншого типу. Крім того, виникає комбінація плоских неоднорідних хвиль (поздовжніх і зсувних), що біжать уздовж межі – хвиль Релея. Показники згасання таких хвиль частотно залежні. Товщина приповерхневого шару, в якому зосереджена енергія, тим менше, ніж коротше довжина хвилі.

При наявності прихованої пошкодженні матеріал конструктивних елементів будівель і споруд насичений неглибокими тріщинами, тому високочастотні

складові поверхневих хвиль швидко згасають. Для реальних твердих тіл величина швидкості хвиль Релея близька до швидкості хвиль зсуву ($0,87v_s < v_r < 0,96v_s$).

Коефіцієнт відображення V є відношенням амплітуди відбитої від межі хвилі до амплітуди падаючої хвилі. Коефіцієнт заломлення (проходження) W – відношення амплітуди заломленої хвилі до амплітуди падаючої хвилі. Процес відбиття-заломлення на кожній межі шару може повторюватися, тому необхідно враховувати велику кількість заломлених і відбитих хвиль. Якщо відношення товщини шару h до довжини хвилі, що розповсюджується всередині нього, менше двох ($h/\lambda < 2$), то шар вважається тонким, в іншому випадку – товстим.

Найбільш важливою особливістю тріщинуватих середовищ є складність хвильової картини, оскільки на кожній границі між сусідніми тріщинами утворюються чотири нові хвилі – дві відбиті (поздовжня і поперечна) і дві заломлені, кожна з яких, потрапляючи на іншу границю, стане причиною аналогічного процесу. Навіть у разі утворення всередині шару обмінних хвиль кількість окремих хвиль у хвильовому пакеті буде кінцевою величиною, тому що в наступних відображеннях і заломленнях амплітуда їх значно зменшується навіть без урахування згасання в шарах. Якщо швидкості хвиль у шарах різні, виникає ціла система неоднорідних хвиль.

В залежності від тріщинуватості довжина хвилі змінюється. Це означає, що в спектральному розкладанні сигналу кінцевої тривалості завжди присутні високі частоти, для яких $v_{gp} \approx v_{gf} \approx v_p$, де v_{gp} і v_{gf} – групова і фазова швидкості. Однак частка енергії цих частот у спектрі сигналу відносно мала. Тому передня частина сигналу, так званий перший провісник, має малу амплітуду та високу частоту. Швидкість, з якої прибуває основна частина сигналу, що встановився, завжди менше v_p . Враховуючи його енергетичну значимість, останніми роками різко збільшився обсяг робіт на заломлених і відбитих поперечних хвилях.

Акустичне поле однорідної нормальної хвилі у шарі має вигляд [80]:

$$u_n = A_n \exp \left\{ i\omega \left[t - \frac{x}{v} \left(1 - \left(\frac{n\lambda}{2a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \sin \left(\frac{\pi n}{a} y \right), \quad (2.3)$$

де u – зміщення, функція координат та часу; A – амплітуда, у загальному вигляді комплексна величина; ω – циклічна частота; t – час; x, y – координати; v – швидкість пружних хвиль, n – номер моди, λ – довжина хвилі, a – ширина хвилюєводу.

Рівняння, що відрізняються номером n , описують збудження, що не змінюють свого виду при поширенні в шарі за умови

$$\lambda < \lambda_{кр} = 2a/n, \quad (2.4)$$

де $\lambda_{кр}$ – критична довжина хвилі для моди з номером n , їй відповідає критична частота $f_{кр} = vn/2a$.

На довжинах хвиль $\lambda < 2a$ або частотах $f > v/2a$ у шарі можна викликати будь-яку моду. Найбільшу довжину хвилі має мода з $n = 1$. Коли $\sin \theta = 1$, а $\theta = \pi/2$, шар перетворюється на резонатор, і між стінками утворюється стояча хвиля, амплітуда якої постійна вздовж шару. Виконано розрахунки графіків залежності критичної частоти першої моди від швидкості поздовжньої хвилі та товщини шару в діапазонах зміни аргументів, характерних для тунелів, шахт та підземних споруд. Якщо не виконується умова (2.4), то співвідношення (2.3) набуде вигляду

$$u_n = A_n \exp \left\{ -\frac{\omega}{v} x \left[\left(\frac{n\lambda}{2a} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \exp(i\omega t) \sin \left(\frac{\pi n}{a} y \right), \quad (2.5)$$

тобто зі збільшенням відстані x вздовж осі шару хвиля експоненційно згасатиме.

У зв'язку з цим можна зробити важливий висновок для методики контролю тріщинуватих структур при односторонньому доступі до об'єкту. При збільшенні відстані від джерела збудження, зрештою, фіксуватимуться тільки стоячі хвилі, резонаторами для яких є поверхня конструкції та поверхні тріщин або відшарувань. Таким чином, у приповерхневому шарі утворюються акустичні хвилеводи – ділянки середовища, обмежені в одному або двох напрямках порожнечами, тріщинами або іншими середовищами. Внаслідок цього усувається або зменшується розбіжність хвиль у сторони. Єдиний вид хвилі, що розповсюджується в таких акустичних хвилеводах без зміни своєї структури – нормальні хвилі (моди). Гармонійна бігуча хвиля – однорідна нормальна хвиля, експоненційно загасаюча (2.5) – неоднорідна нормальна хвиля (рис. 2.1).

Довжина хвилі, фазова та групова швидкості в акустичному хвилеводі визначаються фазовим членом у рішенні (2.3) і відповідно дорівнюють [80]:

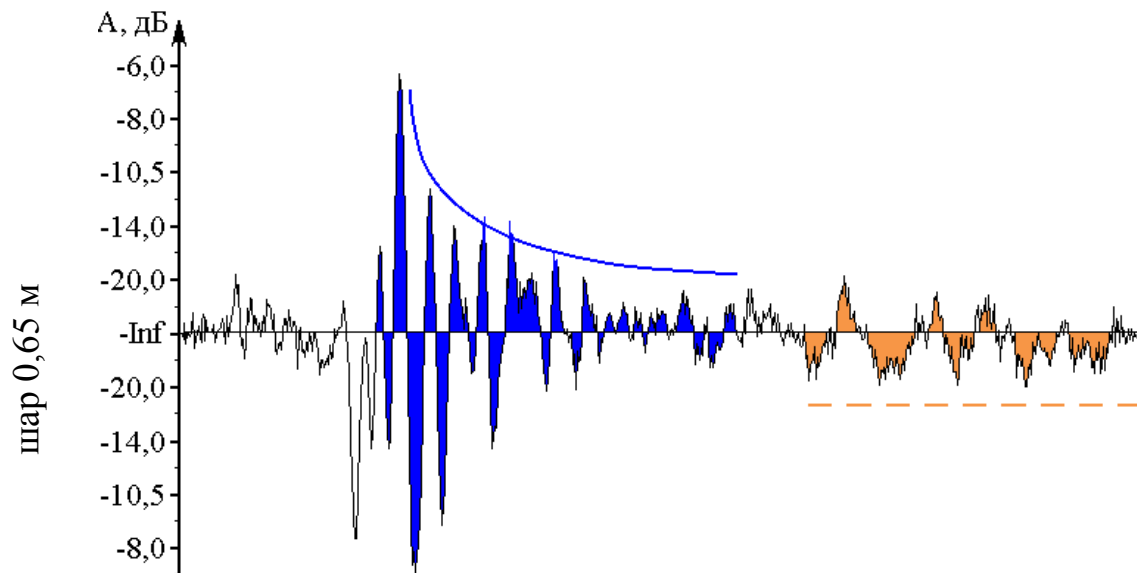
$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}} ; \quad v_{\phi} = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}} > v ; \quad v_{gp} = v \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}} < v . \quad (2.6)$$

Довжина резонуючих хвиль $\lambda = \lambda_{кр} = vn/2a$ (n – номер моди). При збільшенні n зменшується амплітуда. За експериментальними даними перша та друга моди дають найкращий результат. На рисунку 2.2. показано, що при дослідженні бетонних матеріалів завтовшки 0,5-1,0 м можна фіксувати першу моду віброакустичного відгуку на частотах 2000...4000 Гц, в той же час для контролю бетону товщиною більше одного метра можна фіксувати другу моду.

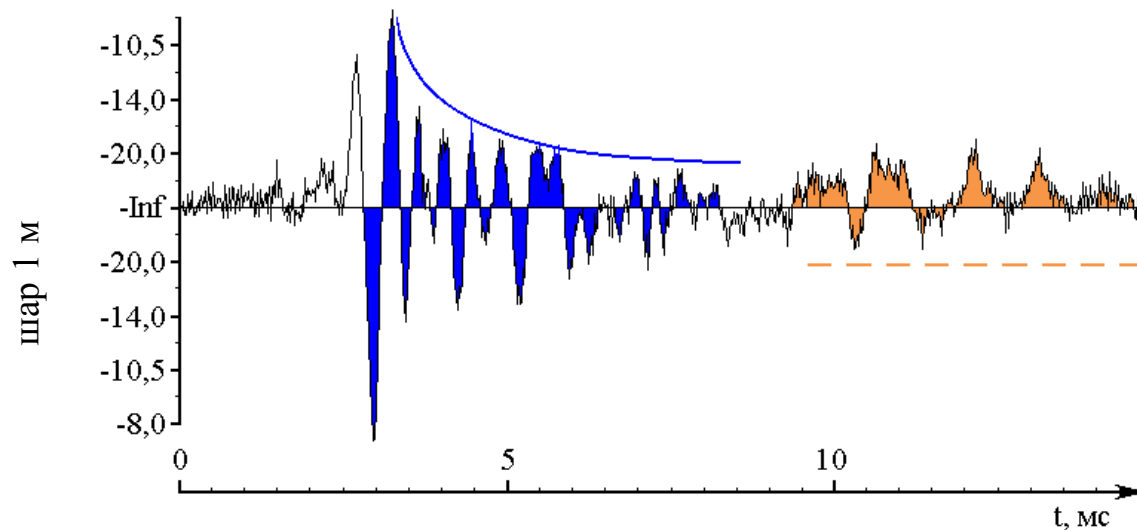
2.3 Оцінка пошкоджень конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом

Незважаючи на широке застосування методів неруйнівного контролю в різних галузях промисловості для виявлення пошкоджень конструктивних елементів будівель та споруд, ще недостатньо обґрунтовані методики моніторингу

з урахуванням специфічних особливостей реакції контрольованих об'єктів на збурюючий вплив, оцінки операційних та екологічних ризиків. Для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень потрібна автоматизація процесу моніторингу.



Більше амплітуда та вище частота поперечних нормальних хвиль



Суцільна лінія – експоненційно загасаючі неоднорідні нормальні хвилі;
пунктирна лінія – коливання, що резонують з вищележачим шаром

Рис. 2.1 Різні типи хвиль у покрівлі різної товщини

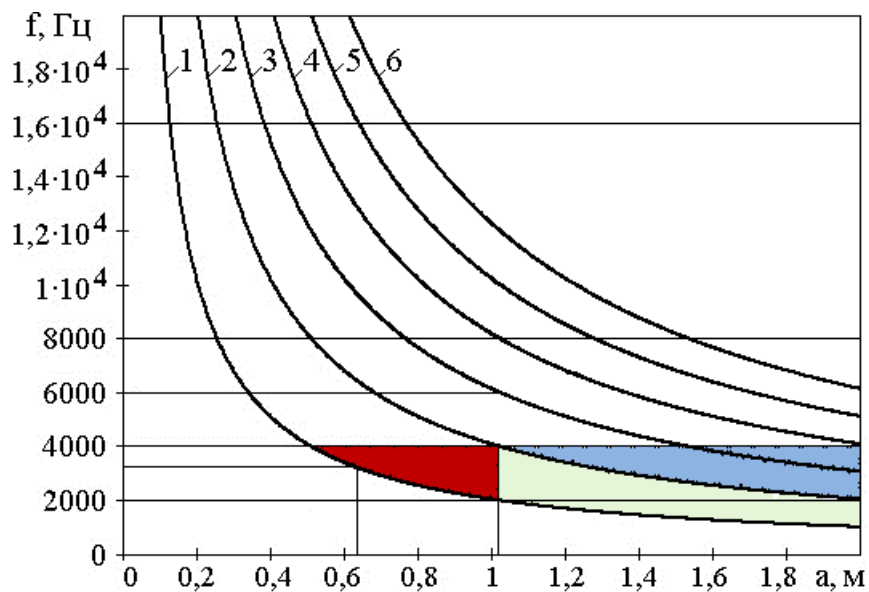


Рис. 2.2 Частоти чутності для структур бетону різної товщини (цифрами позначені номери мод)

Реалізація методу віброакустичного контролю полягає в аналізі сигналів акустичного відгуку на збурюючий вплив. Метод дозволяє проводити моніторинг структури і тріщинуватості матеріалів, на базі чого можна визначати потенційні загрози та ідентифікувати ризики втрати стійкості геомеханічних структур, будівель і споруд [81-83], у тому числі після вибухів і пожеж.

Велику увагу розвитку методології та апаратури віброакустичного контролю приділяють у США, Великобританії, Німеччині та інших країнах. Основна тенденція розвитку технології контролю спрямована на автоматизацію отримання, передачі, збирання та обробки інформації.

Методика віброакустичного моніторингу, в основному, передбачає використання ударних хвиль, які збуджуються ударним впливом. Особливістю неруйнівного контролю є те, що він не змінює механічні властивості будівельних матеріалів. Це обумовлено тим, що силу удару підбирають мінімальною, а ударну хвилю, в цих умовах, можна вважати пружною. Однак цієї енергії цілком достатньо для збудження коливань в матеріалах.

Зниження енергії поздовжніх хвиль a , отже, і амплітуда зафіксованого приймачем відгуку, залежить від довжини хвилі і тріщинуватості середовища,

структурної будови і мінливості фізичних властивостей досліджуваних структур. Тому передня частина сигналу має малу амплітуду та високу частоту.

Виконано розрахунки критичної частоти першої моди від швидкості поздовжньої хвилі та товщини шару. Акустичне поле однорідної нормальної хвилі у шарі має вигляд (2.5). Для контролю будівель і споруд віброакустичним методом при односторонньому доступі до конструктивних елементів, фіксуватися тільки стоячі хвилі, резонаторами для яких є поверхня та береги тріщин. Закриті тріщини переводять однорідну нормальну хвилю в неоднорідну, що експоненційно загасає.

Для контролю пошкоджень будівель та споруд раціонально використовувати відношення амплітуд або енергій сигналу у двох певних частотних смугах, коефіцієнт загасання конкретних гармонійних складових та ін. Зокрема, для автоматизованого оперативного контролю необхідні методи та алгоритми цифрового перетворення сигналу з тимчасової області на частотну (розбиття віброакустичного сигналу на інтервали).

Для автоматизації контролю пошкодженості об'єкта в режимі реального часу загасаючий аперіодичний сигнал $\varphi(t)$ представимо як суперпозицію добутоків періодичних сигналів $\varphi_{p_i}(t)$ на одиничні прямокутні імпульси $\Pi_i(t_i, T_{u_i})$, рис. 2.3:

$$\varphi(t) = \sum_i \varphi_{p_i}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{u_i}), \quad (2.7)$$

де t_i - момент часу, що відповідає середині i -го прямокутного імпульсу, T_{u_i} - його тривалість.

Для формули (2.7) справедливий такий вираз:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p \cdot \Pi)_i}(f), \quad (2.8)$$

де $\Phi_{(p \cdot \Pi)_i}$ – перетворення Фур'є доданку, що стоїть під знаком суми у формулі (2.8) i -ї періодичної функції, помноженої на прямокутний імпульс:

$$\varphi_{p_i}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{u_i}) \leftrightarrow \Phi_{(p \cdot \Pi)_i}(f); \quad \Phi(f) = \sum_i \Phi_{p_i}(f) * e^{j2\pi f t_i} \frac{\pi f T_{u_i}}{\pi f}. \quad (2,9)$$

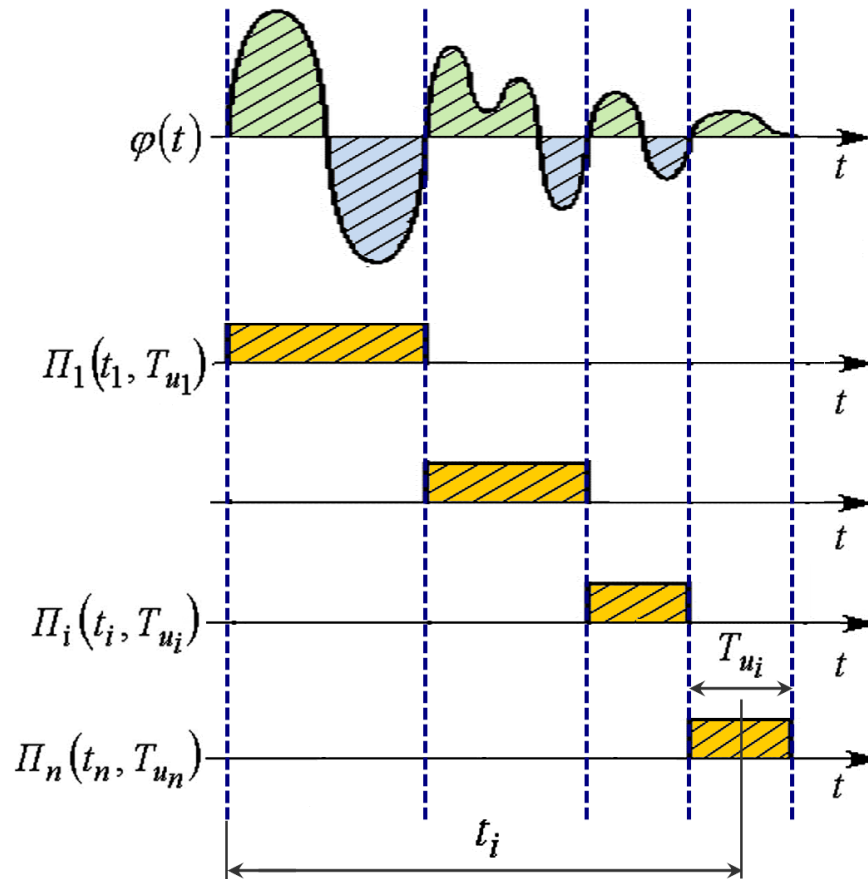


Рисунок 2.3 – Приклад розбиття віброакустичного сигналу на інтервали для автоматизації контролю пошкодженості об'єкта в режимі реального часу

Таким чином, спектр імпульсного сигналу реакції структури контролюваного об'єкта на збурюючий ударний вплив може бути представлений сумою скінченного числа одиничних прямокутних імпульсів, що дозволяє автоматизувати контроль пошкодженості об'єкта в режимі реального часу на основі спектрів виділених періодичних сигналів.

Розглядаючи гармонійний склад виділених періодичних складових сигналу відповідно до співвідношення (2,9), у ряді випадків можна вдосконалити ал-

горитми цифрової обробки акустичних імпульсів відгуку на ударний вплив. Зокрема, можна відмовитися від застосування сигнальних процесорів на користь мікроконтролерів загального призначення. Таке рішення особливо ефективне у цифрових приладах оперативного контролю. Запропонований метод дозволяє окремо послідовно розглядати гармонійний склад поздовжньої передхвилі, поперечних резонансних мод і згинальних низькочастотних коливань (рис. 2.4).

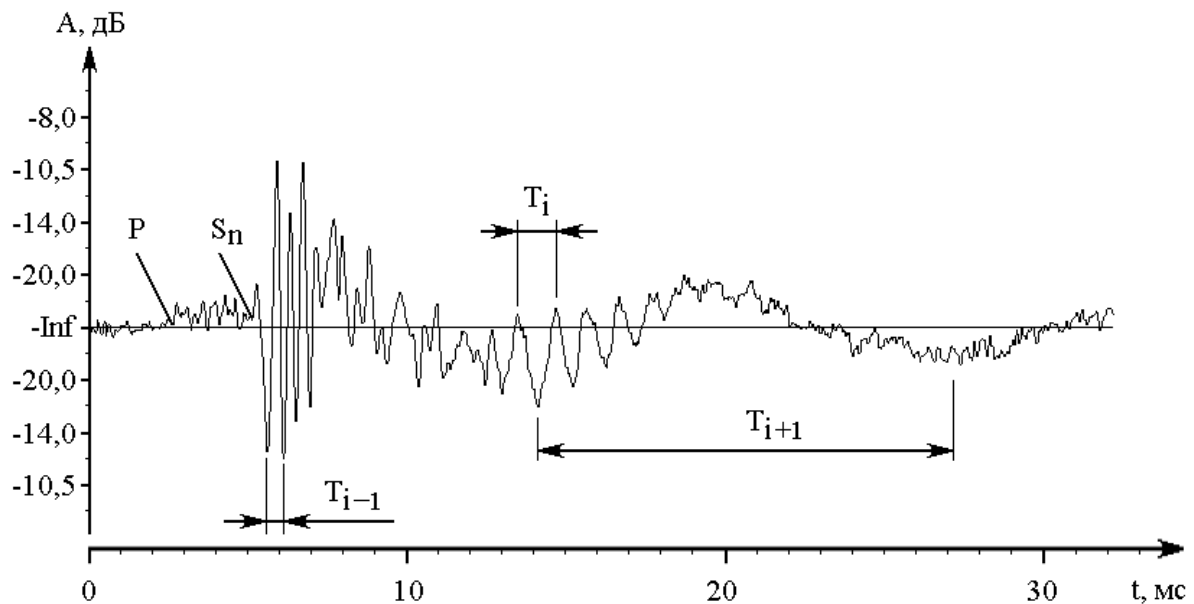


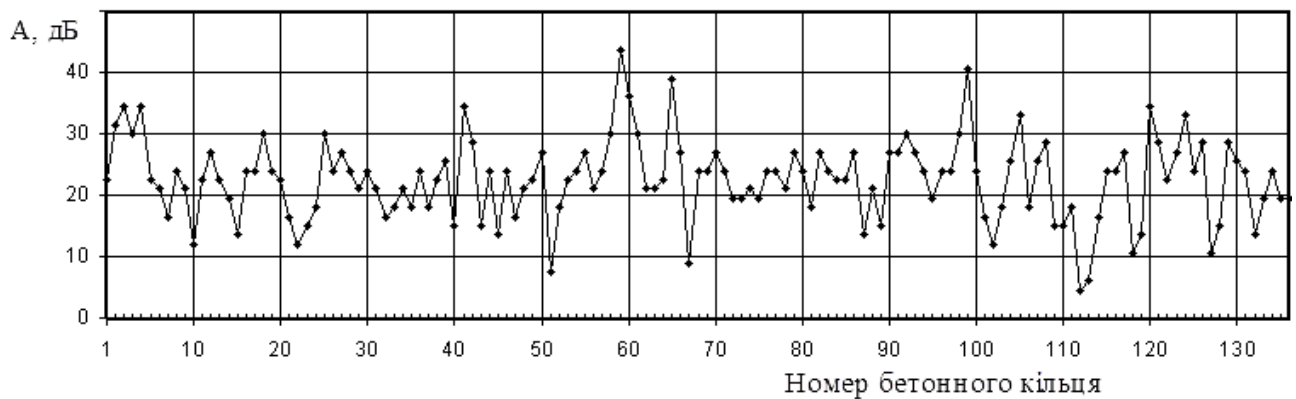
Рис. 2.4 Утворення у часі інформативних частот $f_i = 1/T_i$ в віброакустичних імпульсах при одиночних ударних впливах (до обґрунтування методу цифрової обробки сигналів)

Урахування особливостей акустичних сигналів відгуку на ударний вплив та алгоритми їх перетворення в керуючі прямокутні імпульси для цифрових систем дозволяє автоматизувати процес контролю пошкодженості будівель і споруд, підвищити точність та інформативність віброакустичного методу.

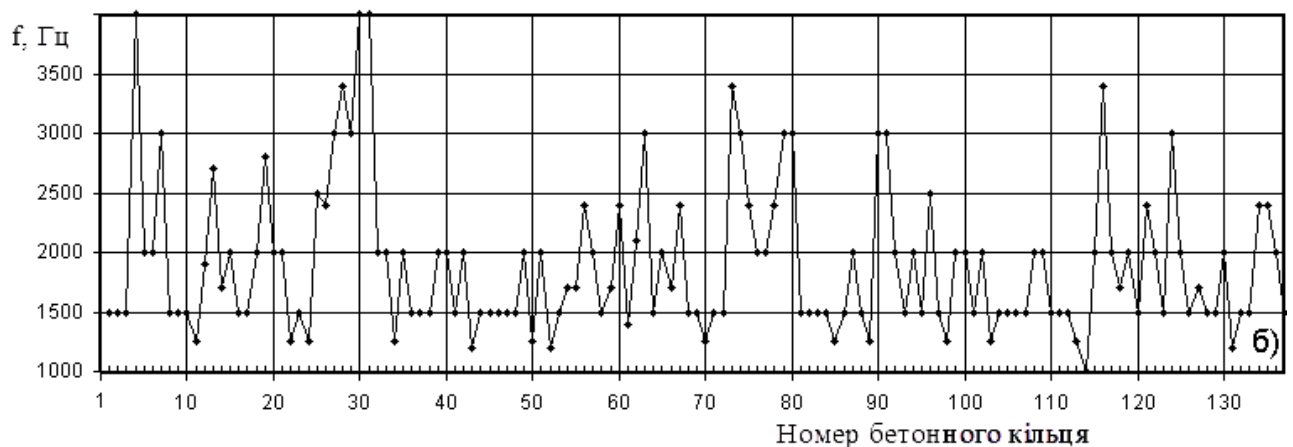
Апробацію методу проведено на прикладі досліджень бетонних тюрбінгів Лоцманського залізничного тунелю, який перетинає вододіл річок Дніпро та Мокра Сура. Тунель розташований у льосоподібних суглинках. У безпосередній близькості розташовані висотні будинки, які в будь-якому випадку потрапляють у зону можливих зрушень. Це вказує на потенційну небезпеку для буді-

вель внаслідок можливої втрати стійкості тунелю від видавлювання пливуну або від обвалення ґрунтів у порожнини, що утворилися в результаті постійного винесення ґрунту в дренажні штольні та тунель.

На рис. 2.5 представлені усереднені результати віброакустичних досліджень вздовж тунелю. Вимірювання виконані одночасно двома приладами з різними вхідними датчиками (на частоті 25 кГц і 40 кГц), щоб унеможливити вплив незначних випадкових тріщин, включень або інших аномалій. У разі виникнення будь-яких проблем у показаннях приладів проводилися повторні виміри.



а)



б)

Рис. 2.5 Зміни величини максимумів (а) та частот (б) спектральної щільності акустичних відгуків бетонних тубінгів

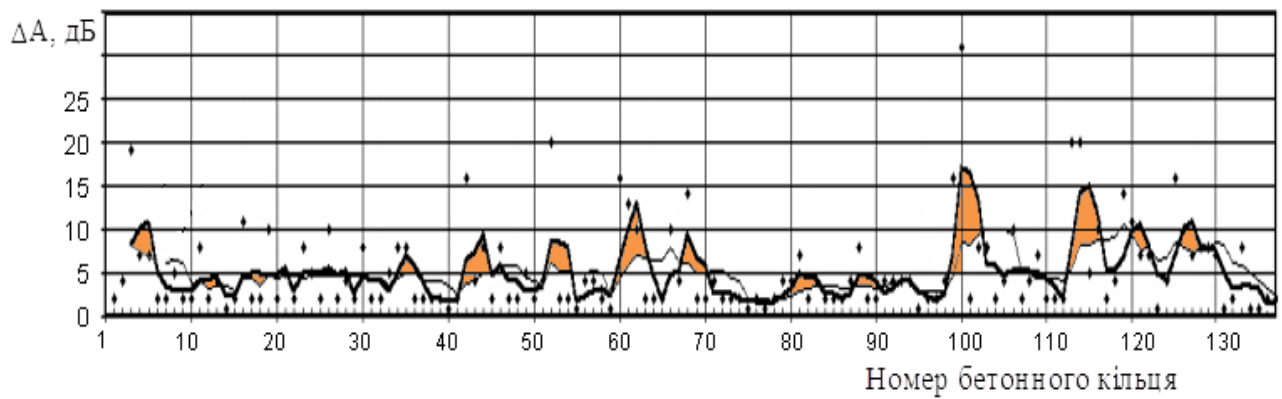
Як впливає з рис. 2.5, б, основні відхилення частоти максимуму спектральної щільності сигналу від домінуючих середніх значень відбуваються у бік високих частот. У бік низьких частот спостерігаються незначні відхилення. Це свідчить про наявність ділянок з високими напруженнями в бетоні і, водночас, про задовільну безпеку споруди та відсутність великих заколів в тюрінгах. Таких заколів не виявлено і при візуальному огляді.

Для характеристики локальної мінливості властивостей конкретних ділянок на фоні загальної закономірності зміни середніх параметрів по всьому тунелю побудовано графіки абсолютних відхилень (та їх модулів) величини амплітуди та частоти відповідних середніх значень (рис. 2.6). Якщо абсолютні відхилення характеризують зміну параметрів обробки по всій довжині, то максимальні значення модулів відхилень локалізують найбільш нестабільні (небезпечні) ділянки.

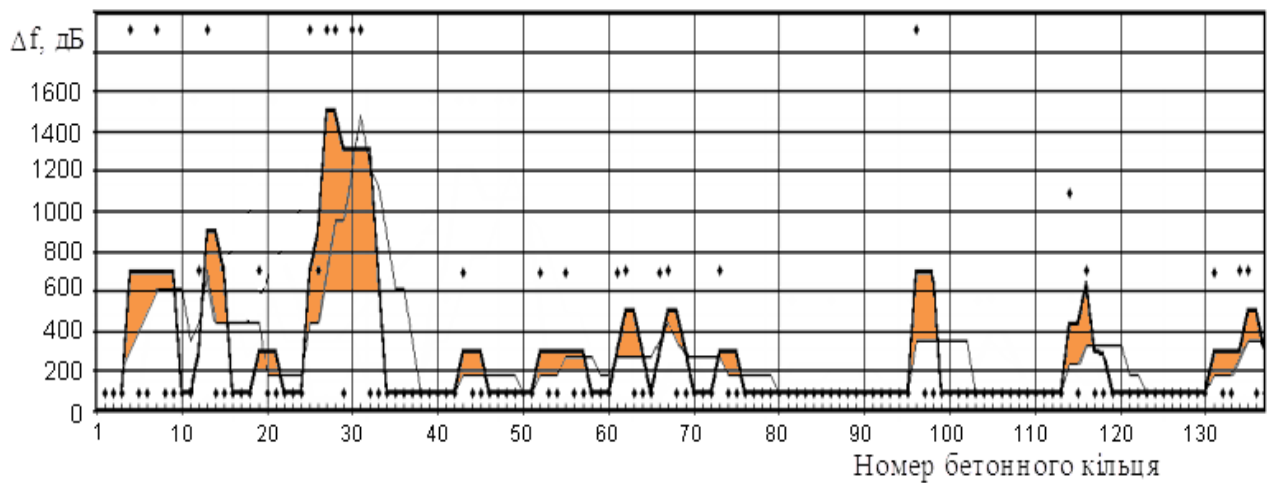
В результаті віброакустичних досліджень визначено ділянки з підвищеними напруженнями, зони прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні. Хороші результати показала статистична обробка вимірювань, яка дозволила ідентифікувати великі порожнечі, що утворилися внаслідок вимивання ґрунтів (рис. 2.6, б).

Для характеристики локальної мінливості властивостей конкретних ділянок на фоні загальної закономірності зміни середніх параметрів по всьому тунелю побудовано графіки абсолютних відхилень (та їх модулів) величини амплітуди та частоти відповідних середніх значень (рис. 2,6). Якщо абсолютні відхилення характеризують зміну параметрів обробки по всій довжині, то максимальні значення модулів відхилень локалізують найбільш нестабільні (небезпечні) ділянки.

В результаті віброакустичних досліджень визначено ділянки з підвищеними напруженнями, зони прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні. Хороші результати показала статистична обробка вимірювань, яка дозволила ідентифікувати великі порожнечі, що утворилися внаслідок вимивання ґрунтів (рис. 2.6, б).



а)



б)

Рис 2.6 Зміни величини максимумів (а) та частот (б) спектральної щільності акустичних відгуків бетонних тюбінгів

Виконано аналіз результатів досліджень та запропоновано різні варіанти обробки технологічної інформації та акустичних сигналів при виявленні прихованих заколів, відшарувань та прихованих тріщин у бетоні, картуванні порожнин, дана оцінка достовірності отриманих результатів.

Таким чином, при пошкодженні конструктивних елементів будівель і споруд виникають впорядковані та хаотичні системи тріщин, розміри яких, у випадках часткового (прихованого) внутрішнього руйнування, значно нижче області контролю. Це середовище можливо вважати квазіоднорідним, в якому системи тріщин виявляють свої властивості лише інтегрально. Тому запропоновано визначати інтегральні показники пошкодження елементів конструкцій, які

зв'язані з зонами акустичної чутності нормальних резонансних мод. Ці хвилі фіксуються приймачем з октавними фільтрами, які пропускають низькі частоти для структур різних матеріалів. На базі цих показників вже можливо ідентифікувати ризики втрати стійкості об'єкта контролю.

Висновки за розділом 2

1. При пошкодженні конструктивних елементів будівель і споруд виникають впорядковані та хаотичні системи тріщин, розміри яких, у випадках часткового (прихованого) внутрішнього руйнування, значно нижче області контролю. Це середовище можливо вважати квазіоднорідним, в якому системи тріщин виявляють свої властивості лише інтегрально. Тому запропоновано визначати інтегральні показники пошкодження елементів конструкцій, які зв'язані з зонами акустичної чутності нормальних резонансних мод. На базі цих показників вже можливо ідентифікувати ризики втрати стійкості об'єкта контролю.

2. При односторонньому доступі до об'єкту, а саме, при збільшенні відстані від джерела збудження фіксуватимуться тільки стоячі хвилі, резонаторами для яких є поверхня конструкції та поверхні тріщин або відшарувань. У приповерхневому шарі утворюються акустичні хвилеводи, обмежені порожнечами, тріщинами або іншими середовищами. Для контролю тріщинуватих структур слід використовувати нормальні хвилі, які розповсюджуються без зміни своєї структури.

3. При зниженні верхньої межі частотного діапазону реєстрації акустичного сигналу відгуку структури на ударний вплив діапазон можливих баз прозвучування розширюється. В межах цього діапазону реєструється перша мода нормальних резонансних коливань.

4. На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль в матеріалах, часу зіткнення та реальних розмірів дерев'яних, бетонних і металевих конструкцій проведена оцінка матеріалів як коливальної системи при ударному впливі. Контроль системи забезпечується за умови ідентифікації локальних пошкоджень об'єктів як систем із зосередженими параметрами.

5. На основі прямих перетворень Фур'є запропоновано алгоритми трансформації спектрів виділених періодичних віброакустичних сигналів відклику структури контрольованого об'єкта на збуджуючий ударний вплив в керуючі прямокутні імпульси для цифрових систем що дозволяє автоматизувати контроль пошкодженості будівель і споруд в режимі реального часу, підвищити точність та інформативність віброакустичного методу.

6. Для оцінки пошкодження конструктивних елементів будівель і споруд запропоновано використовувати апробовані методи віброакустичного контролю – поздовжнього профілювання та вертикального акустичного зондування. Методичні параметри діагностики відпрацьовано в ході експериментальних досліджень бетонних тюбінгів.

7. Встановлено, що абсолютні відхилення параметрів характеризують зміну пошкоджень по всій довжині досліджуваної ділянки, а максимальні значення модулів відхилень параметрів локалізують найбільш нестабільні (небезпечні) ділянки. Віброакустичними дослідженнями визначено ділянки з підвищеними напруженнями, зони прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні. Задовільні результати показала статистична обробка вимірювань, яка дозволила ідентифікувати великі порожнечі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА АЛГОРИТМІВ СКЛАДНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

3.1 Підвищення продуктивності та достовірності віброакустичного контролю будівель і споруд за рахунок автоматизації ударної дії з заданими параметрами на базі розробки динамічних моделей складних коливань

Механічні коливання – фізичне явище, яке є одним з характерних станів природних матеріалів, а також спостерігається в роботі значущої кількості механічних та електромеханічних систем. Збудження коливань із заданими енергетичними, кінематичними, динамічними та геометричними параметрами є основною задачею приводів (зокрема, електричних) вібраційних систем, які широко застосовуються в усіх галузях промисловості та в прикладних наукових дослідженнях (рис. 3.1).

В рамках вирішення питання забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд, вкрай важливим є своєчасність та швидкість контролю об'єктів. В переважній більшості для віброакустичного контролю при збудженні механічних коливань використовуються удари, що проводяться вручну з різною інтенсивністю та амплітудою. Це негативно впливає на якість одержуваних результатів. Зрозуміло, що необхідна автоматизація процесу збудження коливань, створення різних форм і амплітуди вібраційних впливів на контрольований об'єкт.

Автоматизацію і підвищення якості процесу контролю можна виконати з використанням, наприклад, приводу з електричною машиною обертового руху, редуктором, передачею та механізмом перетворення обертового руху на коливальний (хитання, прямолінійний або пласко-паралельний рух, рис. 3.2). В різних вібраційних системах комбінація ланок цього ланцюга передачі та перетворення руху може варіюватися. Електропривод або нерегульований, або регульований з низькою якістю керування і кількістю регульованих величин від однієї до трьох в деяких випадках. Такі системи приводу характеризуються ря-

дом суттєвих недоліків, серед яких: значна маса передачі та неможливість зміни параметрів коливань, характер яких визначається конструктивно кінематикою механізму перетворення руху.

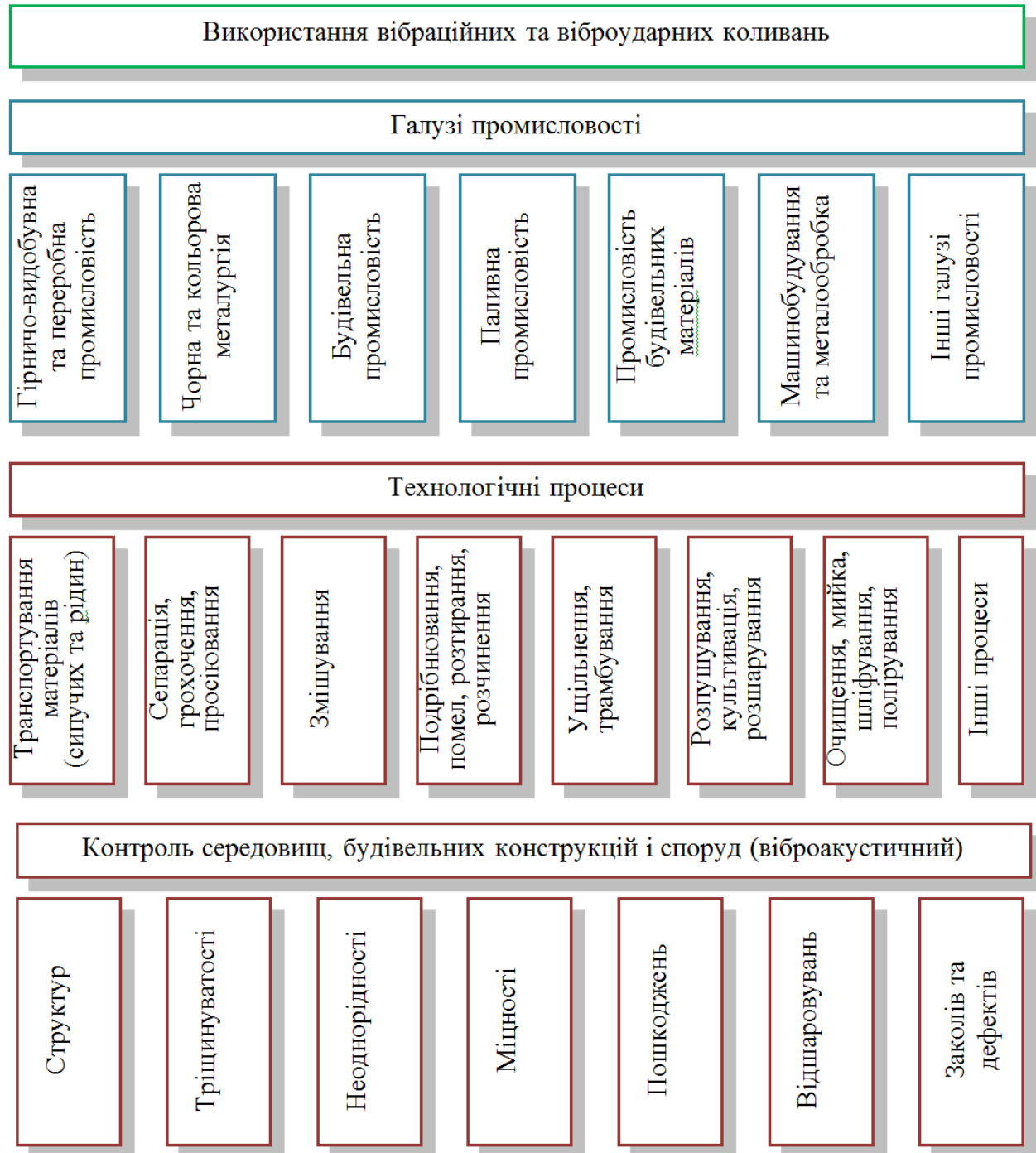
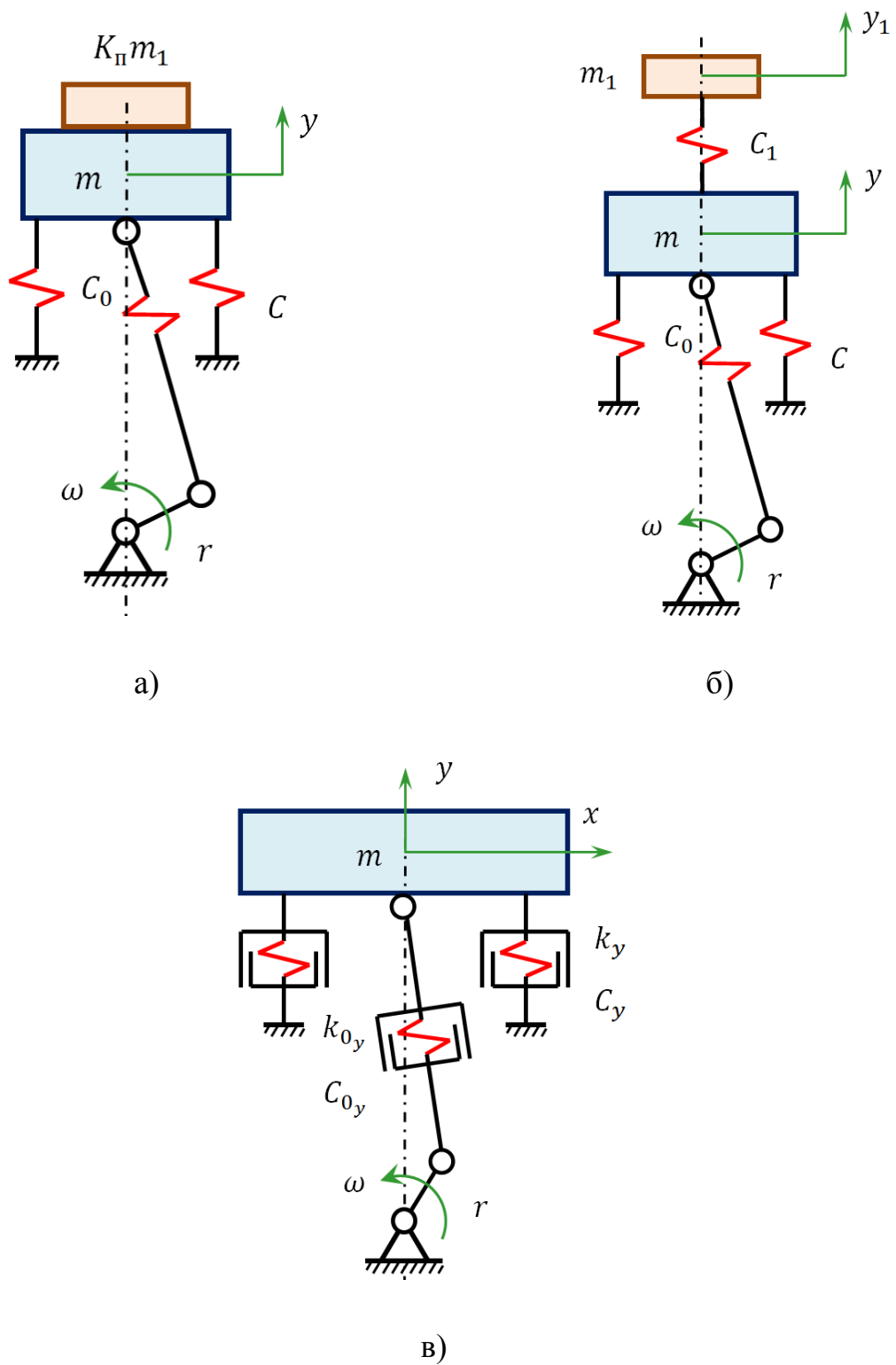


Рис. 3.1 Застосування вібраційних коливань у виробничій сфері та наукових дослідженнях



C_y , C_{0y} – жорсткості вздовж вісі y ; k_y , k_{0y} – коефіцієнти гістерезисних в'язких опорів.

Рис. 3.2 Типові динамічні моделі збуджувача механічних коливань: а, б – з урахуванням технологічного навантаження; в) з нелінійним демпфером

Таким чином, найслабшою ланкою є саме цей механізм. Тому запропоновано прямий керований привод (генератор-збуджувач коливань), який дозволяє виключити цю ланку і не тільки позбутися зазначених недоліків, а й покращити технологічні характеристики вібраційної системи, а також розширити сферу застосування такого привода.

Можливі такі способи застосування запропонованого генератора – збуджувача коливань:

- дослідження сейсмостійкості фізичних моделей будівель, промислових та гідротехнологічних споруд, їх окремих конструкцій та елементів (фундаментів, каркасів, арок, балок, стін, перекриттів тощо);

- дослідження лінійно-протяжних та висотних споруд, схильних до виникнення коливань, резонансів та розповсюдження хвиль (мостів, шляхопроводів, підвісних канатних та монорельсових доріг, трубопроводів, тунелів, стволів, виробок, висотних будівель, башт, елеваторів, доменних печей, димових труб, градирень) тощо;

- генерація електричного задаючого сигналу та збудження механічних коливань в мобільних комплексах віброакустичної сейсморозвідки, стаціонарних системах та в автономних приладах віброударного та віброакустичного контролю оздоблення тунелів, контролю стійкості будівель і споруд для забезпечення безпеки їх експлуатації.

В загальному випадку це дослідження відгуку природних та штучних технічних об'єктів та їх масштабних плоских і просторових фізичних моделей на імпульсні, коливальні гармонічні і негармонічні та хаотичні збуджуючі впливи [84, 85], спостереження резонансних та інтерференційних явищ, а також розробка методів та алгоритмів пасивної та/або активної корекції/компенсації при автоматизованому керуванні такими об'єктами.

Розглянемо типові динамічні моделі класичних вібраційних систем (рис. 3.2, а, б). Ці моделі є лінійними коливальними системами. Перша з них (рис. 3.2, а). враховує технологічне навантаження як приєднану масу m_1 з еквівалентним коефіцієнтом приєднання K_n до основної приведенної маси m . Друга

модель (рис. 3.2, б) враховує пружні та інерційні властивості технологічного навантаження. Диференційні рівняння руху цих систем запишемо як суперпозицію усіх сил, що прикладені до центрів мас:

$$(m + K_n m_1) \ddot{y} + C_y = C_0 r \sin \omega t, \quad \begin{cases} m \ddot{y} + C_y + C_1 (y - y_1) = C_0 r \sin \omega t, \\ m_1 \ddot{y}_1 + C_1 (y_1 - y) = 0. \end{cases}, \quad (3.1)$$

де C – приведена жорсткість основних пружних зв'язків; C_0 – жорсткість пружних елементів; r – радіус ексцентриситету привода; ω – кутова швидкість обертання привода віброзбуджувача.

Амплітудні значення коливань робочого органу визначаються наступним чином:

- без урахування технологічного навантаження

$$A = p_0^2 r / (p^2 - \omega^2); \quad (3.2)$$

- з урахуванням технологічного навантаження, як приєднаної маси

$$A = p_0^2 r / (p^2 - [1 + K_1 K] \omega^2); \quad (3.3)$$

- для системи, що враховує пружні та інерційні властивості технологічного навантаження у вигляді зосередженої маси та пружного елемента:

$$A_1 = \frac{p_0^2 r}{K m \omega^4} \left(1 - \frac{K m \omega^2}{C_1} \right) \times \left(C_1 - \left[\frac{K C}{C_1} + K + 1 \right] \omega^2 + p_1^2 \right), \quad (3.4)$$

де $p^2 = C/m$, $p_0^2 = C_0/m$, $p_1^2 = C_1/m$ – квадрати парціальних частот, $K = m_1/m_2$ – співвідношення маси технологічного навантаження до маси частин системи, що коливаються [86, 87].

Друга модель (рис. 3.2, б) точніше описує вплив навантаження на коливальні процеси в системі, оскільки, на відміну від першої, враховує характер взаємодії основної приведеної маси з масою навантаження як пружний зв'язок. Однак навантаження розглядається як зосереджена маса, що є значним припу-

щенням для більшості технологічних процесів і вібраційних систем. Система рівнянь (1) описує рух центрів мас лише уздовж однієї вісі. А лінійність системи обумовлює гармонічний характер коливань в ній. Подальше уточнення моделей може полягати в урахуванні розосередженого характеру навантаження та електромеханічної системи, опису коливань в просторі в трьохкоординатній системі відліку.

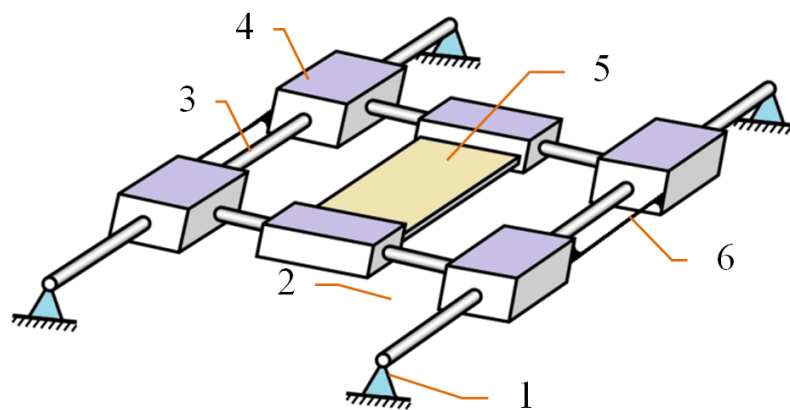
Ефективність роботи вібраційних систем визначається якістю збуджуваних коливань робочого органа установки. Тому необхідно вирішення наступних задач:

- уточнення динамічних моделей існуючих вібраційних систем;
- розробки нових кінематичних схем та механізмів для вібраційних систем;
- розробки нових методів та алгоритмів автоматичного керування рухом вібраційних збуджувачів з метою отримання полічастотних та хаотичних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів із заданими амплітудними та частотними характеристиками з дотриманням метрологічних вимог.

Для збудження полічастотних асиметричних коливань відомий ексцентриковий нелінійний пружно-в'язкий привод (рис. 3.2, в). Він спроектований на основі класичної кінематичної схеми ексцентрикового привода, і складається з ексцентрикового вала, що встановлений на опорній рамі віброустановки, та прикріплених гумовими елементами до робочого органу шатунів. Нелінійний елемент передає на робочий орган змінні збуджуючі зусилля, які хаотизують коливання робочого органу і його навантаження, впливають як на частотні характеристики, так і на характер руху.

Проте очевидно, що напрям та величина збуджуючих зусиль (і, відповідно, характер коливань) визначається конструкцією системи, її кінематичною схемою та конструктивним виконанням демпфера. Це не є критичним для вібраційної установки, яка вбудована в технологічний процес підприємства на установленому виробництві, але неефективно при змінному навантаженні і неприйнятно для стендів, апаратури контролю, наукового обладнання, тощо.

Також механізми вібраційних систем з обертальним рухом приводної ланки, в яких робочий орган виконує лінійні зворотно-поступальні рухи, підлягають прямій заміні керованим лінійним електроприводом, хоча це рішення є дорогим та доцільне лише для лабораторно-діагностичного, медичного та іншого високотехнологічного обладнання (рис. 3.3). Механізми вібраційних систем з коливальним рухом приводної ланки та лінійним зворотно-поступальним рухом робочого органу (як то механізми Ватта, Чебишова, Хойкена, Ліпкіна-Посельє) також можуть бути замінені керованим лінійним електроприводом.



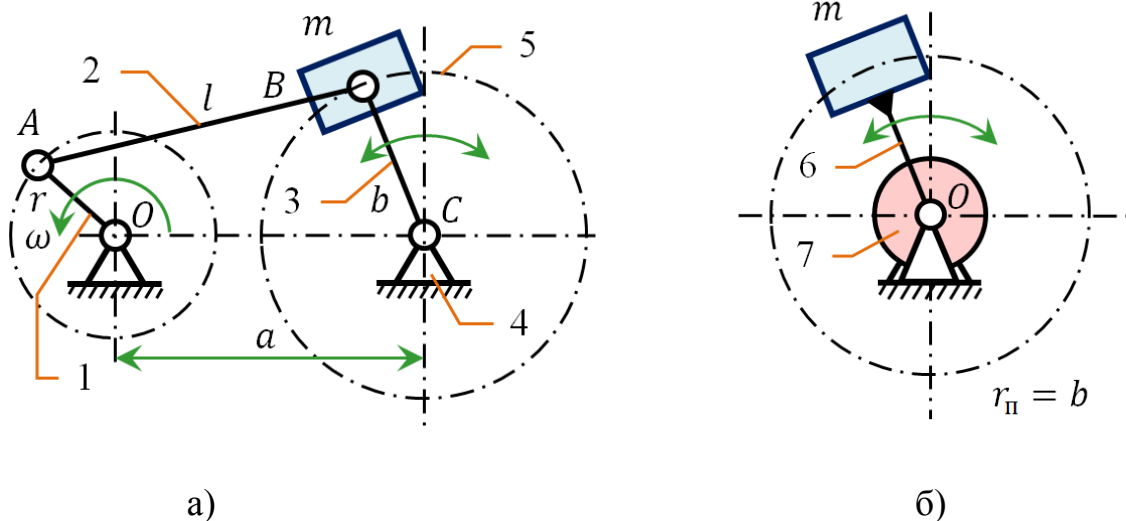
1 – станина; 2 – опора; 3 – напрямна; 4 – лінійний двигун або приводний механізм; 5 – рухома платформа; 6 – ланка жорсткості

Рис. 3.3 Спрощена кінематична схема вібраційної системи з прямим лінійним приводом

На рис. 3.4 приведені кінематичні схеми механізмів вібраційних систем, що підлягають прямій заміні на керований електропривод за умови забезпечення динамічних характеристик та рівня керованості. Зокрема таким є кривошипно-коромислова система (рис. 3.4, а).

Під «рівнем керованості» маємо на увазі спроможність системи керування реалізувати заданий закон керування, який забезпечить необхідні швидкісні діаграми руху робочого органу. Для випадку вхідної (початкової) швидкісної діаграми робочий орган системи з прямим електроприводом має рухатися так само, як робочий орган системи-прототипу. При цьому необхідно розробити ві-

дповідний закон керування прямим електроприводом. В разі використання нових швидкісних діаграм є можливість отримання якісно нових властивостей для спеціалізованого обладнання (наприклад, отримання детерміновано-хаотичної траєкторії коливань для автоматизації віброакустичних досліджень без використання нелінійних механічних елементів).



1 – кривошип (корба) довжиною $|OA|=r$; 2 – гонок довжиною $|AB|=l$; 3 – балансир довжиною $|BC|=b$; 4 – станина з відстанню $|OC|=a$ між осями обертання; 5 – дугова напрямна радіусом b ; 6 – важіль; 7 – привод; O – центр вісі обертання ведучої ланки.

Рис. 3.4 Типові кінематичні схеми механізмів вібраційних систем, що підлягають прямій заміні на електропривод прямої дії: а – з обертальною ведучою ланкою; б – з прямим приводом

Необхідний рівень керованості забезпечується достатньою обчислювальною потужністю цифрової системи керування, заданою точністю та динамічним діапазоном подання сигналів та величин, точністю вимірювань фізичних величин датчиками з урахуванням перетворювачів, достатньою пропускнуною спроможністю каналів даних, шин та інтерфейсів і, в залежності від закону ке-

рування, наявністю зворотних зв'язків за координатами (положенням, швидкістю).

Система керування вібраційним збуджувачем в загальному випадку може складатися з підсистем людино-машинного інтерфейсу, програмованого логічного контролера, збору і обробки інформації. В разі необхідності система доповнюється підсистемою забезпечення безпеки і запобігання нештатних ситуацій.

Розглянемо для прикладу пряму заміну системи на рис. 3.4, а керованим електроприводом прямої дії. Для реалізації прямим приводом таких самих швидкісних діаграм руху робочого органу, які були до модернізації, встановлюємо, що зв'язок між кутом φ_3 повороту балансиру та кутом φ_1 повороту кривошипа визначається на основі співвідношень через розміри балансиру і є передавальною функцією механізму:

$$\varphi_3 = \arctg \frac{r \sin \varphi_1}{r \cos \varphi_1 - a} + \arccos \frac{l^2 - b^2 - a^2 - r^2 + 2ar \cos \varphi_1}{2b \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \varphi_1}} \quad (3.5)$$

Для визначення системою керування поточної кутової координати робочого органу в реальному часі за виразом (3.5) необхідно обрати алгоритми обчислення обернених тригонометричних функцій $\alpha = \arctg x$ та $\alpha = \arccos x$, де α – довільний кут, рад. Що важливо, алгоритми обов'язково повинні забезпечувати задану точність для роботи виконавчих органів пристроїв та швидкість обчислень. При використанні контролерів з високою обчислювальною продуктивністю доцільно застосовувати числові ІЕС-оператори (International Electrotechnical Commission, Міжнародна електротехнічна комісія) тригонометричних функцій. Програма користувача розробляється текстовими мовами програмування: мовою Структурованого Тексту (Structured Text, ST), мовою Списку Інструкцій (Instruction List, IL); або графічною мовою програмування, яка дозволяє вільно розташовувати програмні елементи та охоплювати їх зворотними зв'язками – мовою Безперервних Функціональних Схем (Continuous Function Chart, CFC). Для мікроконтролерів загального призначення традиційно використовуємо мову програмування C++ з розробкою найбільш критичного обчислювального

блоку програми мовою Асемблера. Такий інструментарій надає зручні засоби розробки програмних застосунків та забезпечує необхідну обчислювальну продуктивність і швидкодію системи, яка має працювати в режимі реального часу.

Найбільш складним варіантом є розробка та реалізація збуджувача коливань на основі мікропроцесорної системи саме з обмеженими обчислювальними можливостями та апаратними ресурсами (наприклад, на основі одноплатної міні ЕОМ з однокристальним мікроконтролером або цифровим сигнальним процесором). У той же час даний варіант представляє найбільший інтерес, тому що дозволяє отримати компактний автономний недорогий пристрій, що не вимагає ліцензійного системного програмного забезпечення. А досвід, отриманий при розробці такого пристрою, може бути корисним у подальшому багатьом проектантам, що працюють в галузі створення компактних високотехнологічних пристроїв, наприклад, цифрових вимірювальних приладів, діагностичних комплексів, систем керування тощо.

Відомо, що значення тригонометричних функцій можна визначити з використанням рядів Маклорена з будь-якою необхідною точністю, проте для апаратних засобів з обмеженою обчислювальною продуктивністю (до яких може бути віднесена апаратура віброакустичного контролю), існують алгоритми швидких обчислень. Такими є алгоритми Jack W. Crenshaw [88], які дозволяють обчислювати зокрема деякі прямі та зворотні функції. За одним з них маємо:

$$\alpha = \frac{x(A + Bx^2)}{1 + Cx^2}, \quad (3.6)$$

де $A=0,9999990202289$, $B=0,2579776588114$, $C=0,5912045052131$ – коефіцієнти, що задаються як константи подвійної точності, причому $\alpha \leq 15^0$ з похибкою не більшою за 4×10^{-7} одиниць.

Існує ще одна реалізація цього алгоритму (Jack G. Ganssle):

$$\alpha = \frac{x(k_1 + k_2x^2)}{k_3 + x^2}, \quad (3.7)$$

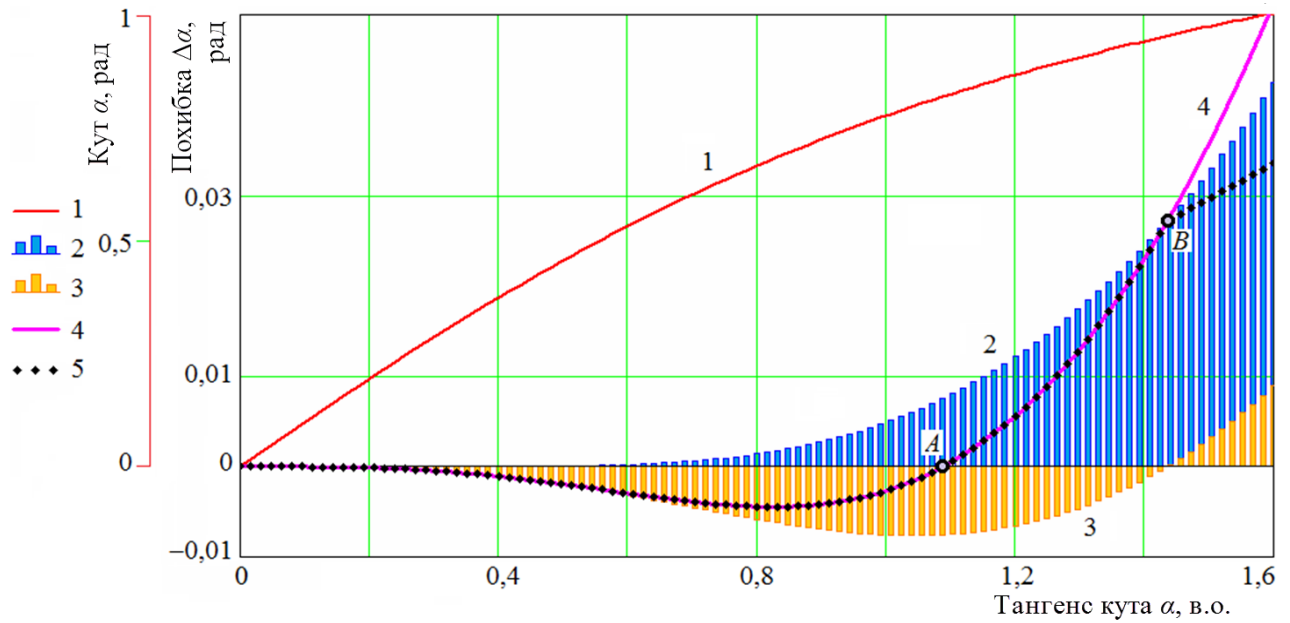
де $k_1=1,6867629106$, $k_2=0,4378497304$, $k_3=1,6867633134$, причому $\alpha \leq 15^\circ$.

Для більшості реальних практичних застосунків (в технічних системах) така точність є надмірною та ресурсномісткою. Тому виконано дослідження впливу розрядності перелічених коефіцієнтів на значення абсолютної похибки $\Delta\alpha$ обчислення кута α за допомогою алгоритмів Jack W. Crenshaw (рис. 3.5). Для співставлення значень похибок обчислення кута α з початковими значеннями коефіцієнтів (графік 2, рис. 3.5,а) та з коефіцієнтами зменшеної до двох десяткових знаків розрядності (графік 3, рис. 3.5,а). Отримано абсолютні похибки (графік 4, рис. 3.5,б) та різниці їх модулів (графік 5, рис. 3.5,б).

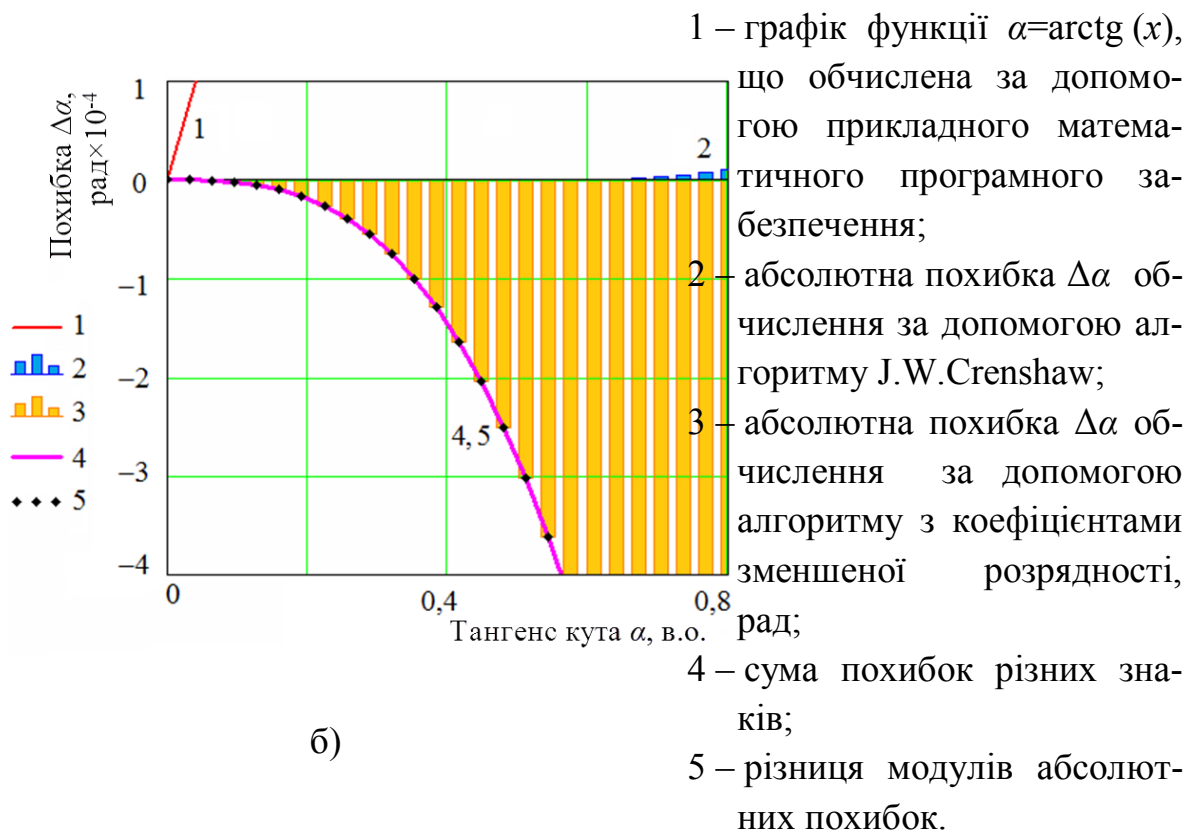
Як можна побачити, до значення аргументу $\operatorname{tg}\alpha=1,07$ (т. А на вісі абсцис) обчислення кута α з початковими значеннями коефіцієнтів дає меншу абсолютну похибку, аніж обчислення з коефіцієнтами зменшеної розрядності, але її значення при цьому не перевищує 0,01 рад, що задовольняє вимогам для використання в будь-яких технічних системах, окрім деяких метрологічних та науково-дослідницьких (для яких формулюються жорсткі вимоги і питання точності обчислень потребує додаткових досліджень).

При більших значеннях аргументу обчислення з коефіцієнтами меншої розрядності забезпечує навіть більшу точність визначення кута. При значенні аргументу $\operatorname{tg}\alpha=1,45$ (т. В на рис. 3.5, а) абсолютна похибка обчислень з коефіцієнтами зменшеної розрядності змінює знак. Таким чином, в околиці цієї точки маємо найбільшу точність визначення кута. В подальшому при збільшенні аргументу абсолютні похибки визначення кута α зростають і з використанням початкових значень коефіцієнтів і з коефіцієнтами зменшеної розрядності, що обмежує область визначення (на вісі аргументу).

Отже обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності в схемі обчислення за алгоритмом Jack W. Crenshaw в більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж з початковими значеннями коефіцієнтів в технічних системах керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю.



а)



б)

Рис. 3.5 Аналіз алгоритмів обчислення похибок для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю: а – абсолютні похибки (діапазон 0...1,6 в.о.) графіки функції, б – порівняння результатів абсолютних похибок (діапазон 0...0,8 в.о.)

Використання коефіцієнтів зменшеної розрядності необхідно при створенні виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного моніторингу структури, тріщин та порушень однорідності несучих конструкцій будівель і споруд.

Апробація розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю проведена в лабораторних умовах (рис. 3.6)



Рис. 3.6 Апробація розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю в лабораторних умовах

Процес розробки збуджувача коливань включає: вибір системи рівнянь, що описують коливання; визначення діапазонів зміни параметрів; вибір конкретних значень параметрів для реалізації; проведення кореляційного аналізу

вихідних сигналів при заданих параметрах з метою визначення якості; визначення амплітудних діапазонів зміни вихідних величин і окремих компонентів рівнянь; складання раціональної обчислювальної схеми розв'язання рівнянь; алгоритмізацію обчислювальної схеми.

Після цього виконується програмування, налагодження та оптимізація програми. Слід зазначити, що наведена вище схема не є строго лінійною, тому виконання будь-якого з етапів може повторюватися.

3.2 Розробка алгоритмів керування віброакустичними коливаннями для оцінки безпеки споруд критичної інфраструктури

Об'єктами критичної інфраструктури згідно із Законом України (від 15.06.2022р.) є об'єкти інфраструктури, системи, їх частини та їх сукупність, які є важливими для економіки, національної безпеки та оборони, порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво важливим національним інтересам [89-91]. В умовах надзвичайних ситуацій, викликаних землетрусами, вибухами та пожежами вкрай необхідно проводити контроль стійкості та безпеки об'єктів для оцінки їхньої придатності до подальшої експлуатації. Це відноситься як до самих інфраструктурних об'єктів безпосередньо (в ролі яких можуть бути виробничі цехи, споруди, тунелі та ін.), так і до комплексів допоміжних будівель та споруд.

Зниження стійкості будівель та споруд внаслідок випадкових динамічних впливів призводить до необхідності врахування особливостей хаотизації процесів. Процес зародження мікротріщин у матеріалах несучих конструкцій на першому етапі, подальше зростання і поширення тріщинуватих зон також має хаотичний характер. Хаотичне зростання мікротріщин призводить до утворення однієї або декількох магістральних тріщин, що сприяє втраті стійкості та руйнуванню будівельних конструкцій (стін, фундаментів). Для віброакустичного контролю внутрішньої пошкодженості наземних споруд [92] необхідне наукове обґрунтування та розробка нових методів моделювання з урахуванням хаотичної складової процесу руйнування.

Завдання дослідження: розробка методів і алгоритмів автоматичного управління віброакустичними коливаннями із заданими амплітудними та частотними характеристиками є актуальним і затребуваним завданням, рішення якого дозволяє своєчасно оцінити стійкість споруд критичної інфраструктури та підвищити безпеку при їх експлуатації.

Споруда або будівля, при впливі різних факторів як динамічна система може втратити стійкість поступово чи раптово [93]. При поступовій втраті стійкості системи встановлюється коливальний періодичний режим. При раптовій втраті стійкості система переходить в інший коливальний періодичний режим стрибком. Установлені режими руху отримали назву атракторів (притягувачів), оскільки вони начебто «притягують» сусідні режими (перехідні процеси). Після втрати стійкості режим рівноважного стану, що встановився, називається незвичайним атрактором (не рівновага і не граничний цикл, рис. 3.7). Такий режим означає, що у системі спостерігаються складні турбулентні неперіодичні коливання.

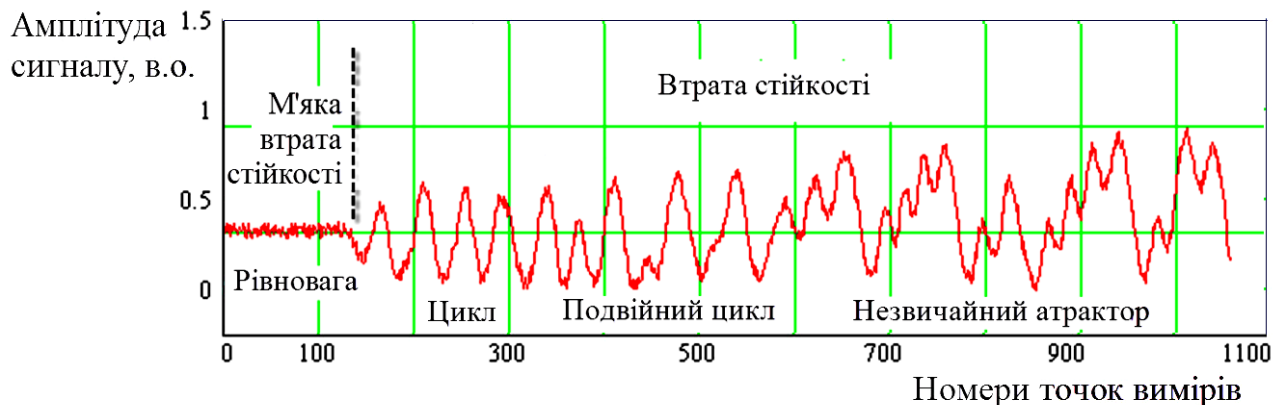


Рис. 3.7 Сценарій хаотизації динамічної поведінки системи у процесі втрати стійкості

Сценарій теорії катастроф використано для обґрунтування інформативних параметрів прогнозування можливості виникнення процесів розвитку руйнування з урахуванням процесів детермінованого хаосу. Для цього немає необхідності доводити реальні чи експериментальні об'єкти до їх катастрофічного

руйнування, достатньо виконати аналіз при виникненні коливальних та хвильових процесів у шаруватих дисипативних середовищах.

Виходячи із «сценарію» хаотизації (див. рис. 3.7), найбільш простим і доступним способом контролю «м'якої» втрати стійкості є аналіз акустичних та електричних сигналів, а інформативними параметрами послідовно можуть бути: розвиток стійкого граничного циклу (біфуркація Гопфа), подвоєння періоду (біфуркація Пітчфорка), подвоєний цикл, втрата стійкості подвоєного циклу, незвичайний атрактор [94, 95], а також їх спектри. Контроль та прогноз у випадках «жорсткої» втрати стійкості (землетрусів, вибухів) на фінішному етапі практично неможливий, тому на практиці зазвичай здійснюється попередній контроль та прогноз із застосуванням необхідних запобіжних, але не завжди достатніх заходів [96, 97].

В даний час найбільш простий та доступний спосіб дослідження процесів в реальних динамічних системах можливий за допомогою математичного, комп'ютерного, натурного або напівнатурного моделювання, викликаючи обурення у таких моделях спеціалізованим генератором коливань.

Розглянемо реалізацію системи збуджувача коливань на основі генератора динамічного хаосу, що описується системою диференціальних рівнянь Е. Лоренца (Lorenz system):

$$\begin{cases} \dot{x} = -\sigma(x - y); \\ \dot{y} = -xz + rx - y; \\ \dot{z} = xy - bz; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} x(t) = -\sigma[x(t) - y(t)]; \\ \frac{d}{dt} y(t) = -x(t)z(t) + rx(t) - y(t); \\ \frac{d}{dt} z(t) = x(t)y(t) - bz(t), \end{cases} \quad (3.8)$$

де $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ – похідні за часом відповідних поточних змінних (вихідних координат генератора) $x(t)$, $y(t)$ та $z(t)$, що визначають траєкторію руху робочого органу збуджувача коливань в просторі; σ , r , b – параметричні коефіцієнти.

Система є класичною тривимірною, такою, що забезпечує двопетлевий атрактор; коливальні властивості системи визначаються дійсними параметрич-

ними коефіцієнтами σ , r та b . Для реалізації математичної і програмної моделей запишемо систему рівнянь в скінчених різницях і розв'язок для дискретного часу:

$$\begin{cases} \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} = -\sigma[x(t) - y(t)]; \\ \frac{\Delta y(t)}{\Delta t} = -x(t)z(t) + rx(t) - y(t); \\ \frac{\Delta z(t)}{\Delta t} = x(t)y(t) - bz(t); \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x(t) = -\sigma[x(t) - y(t)]\Delta t; \\ \Delta y(t) = [-x(t)z(t) + rx(t) - y(t)]\Delta t; \\ \Delta z(t) = [x(t)y(t) - bz(t)]\Delta t; \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x(t_{i+1}) = x(t_i) + \Delta x(t_i) = x(t_i) - \sigma[x(t_i) - y(t_i)]\Delta t; \\ y(t_{i+1}) = y(t_i) + \Delta y(t_i) = y(t_i) + [-x(t_i)z(t_i) + rx(t_i) - y(t_i)]\Delta t; \\ z(t_{i+1}) = z(t_i) + \Delta z(t_i) = z(t_i) + [x(t_i)y(t_i) - bz(t_i)]\Delta t, \end{cases} \quad (3.9)$$

де Δt – скінчене значення приросту часу або інтервал квантування за часом, i – номер поточної точки дискретного часу.

На основі співвідношення (3,9) розроблено програмну модель збуджувача віброакустичних коливань в середовищі для математичного моделювання:

$$Lor(x, y, z, \sigma, r, b, h, n) := \left(\begin{array}{l} (x_0 \leftarrow x \ y_0 \leftarrow y \ z_0 \leftarrow z) \\ for\ i \subset 1..n \\ \left[\begin{array}{l} [dx_i \leftarrow \sigma(y_{i-1} - x_{i-1})\ h \ x_i \leftarrow x_{i-1} + dx_i] \\ [dy_i \leftarrow (-x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} - y_{i-1})\ h \ y_i \leftarrow y_{i-1} + dy_i] \\ [dz_i \leftarrow (x_{i-1}y_{i-1} - bz_{i-1})\ h \ z_i \leftarrow z_{i-1} + dz_i] \\ s_{1_i} \leftarrow -x_{i-1}z_{i-1} \\ s_{2_i} \leftarrow -x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} \\ s_{3_i} \leftarrow -x_{i-1}z_{i-1} - y_{i-1} \\ s_{4_i} \leftarrow -rx_{i-1} - y_{i-1} \\ s_{5_i} \leftarrow -x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} - y_{i-1} \\ s_{6_i} \leftarrow x_{i-1}y_{i-1} \\ s_{7_i} \leftarrow x_{i-1}y_{i-1} - bz_{i-1} \end{array} \right. \\ \left. aug\left(\frac{dx}{h}, x, \frac{dy}{h}, y, \frac{dz}{h}, z, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7\right) \right) \end{array} \right) \quad (3.10)$$

де $h = \Delta t$ – крок інтегрування за часом; n – кількість розрахункових точок; dx , dy , dz – скінчені прирости за вихідними координатами; $s_1, s_2, s_3, \dots, s_7$ – окремі складові виразів для приростів вихідних координат за різних комбінацій доданків; augment – оператор об'єднання векторів миттєвих значень змінних (розмірність векторів співпадає).

Окремі складові виразів для приростів вихідних координат за різних комбінацій доданків використовуємо для оцінки необхідної розрядності комірок пам'яті для зберігання цих проміжних добутків та сум в разі реалізації обчислень за допомогою однокристального мікроконтролера за допомогою програми, що написана мовою асемблера, або для вибору типу даних у випадку, якщо програма буде написана мовою високого рівня.

Те ж саме для системи Чена (Chen system):

$$\begin{cases} \dot{x} = -\sigma(x - y); \\ \dot{y} = -xz + rx - sy; \\ \dot{z} = xy - bz; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} x(t) = -\sigma[x(t) - y(t)]; \\ \frac{d}{dt} y(t) = -x(t)z(t) + rx(t) - sy(t); \\ \frac{d}{dt} z(t) = x(t)y(t) - bz(t). \end{cases} \quad (3.11)$$

Система Чена є гомотопічно подібною до системи Е. Лоренца, проте їх атрактори топологічно різні [98, 99]. Система рівнянь генератора Чена в скінченних різницях та в дискретному часі:

$$\begin{cases} x(t_{i+1}) = x(t_i) - \sigma[x(t_i) - y(t_i)]\Delta t; \\ y(t_{i+1}) = y(t_i) + [-x(t_i)z(t_i) + rx(t_i) - sy(t_i)]\Delta t; \\ z(t_{i+1}) = z(t_i) + [x(t_i)y(t_i) - bz(t_i)]\Delta t. \end{cases} \quad (3.12)$$

Програмна модель генератора Чена (для спрощення – без окремих складових виразів для приростів вихідних координат за різних комбінацій доданків):

$$Chen(x, y, z, \sigma, r, s, b, h, n) := \left\{ \begin{array}{l} (x_0 \leftarrow x \ y_0 \leftarrow y \ z_0 \leftarrow z) \\ for\ i \in 1..n \\ \left[\begin{array}{l} [dx_i \leftarrow \sigma(y_{i-1} - x_{i-1})h; x_i \leftarrow x_{i-1} + dx_i] \\ [dy_i \leftarrow (-x_{i-1}z_{i-1} + rx_{i-1} - sy_{i-1})h; y_i \leftarrow y_{i-1} + dy_i] \\ [dz_i \leftarrow (x_{i-1}y_{i-1} - bz_{i-1})h; z_i \leftarrow z_{i-1} + dz_i] \end{array} \right. \\ \left. aug\left(\frac{dx}{h}, x, \frac{dy}{h}, y, \frac{dz}{h}, z\right) \right\} \quad (3.13).$$

Структурні схеми генераторів Лоренца Е. та Чена Х., що отримані на основі диференційних рівнянь, які описують відповідні системи, наведена на рис. 3.8.

Система керування вібраційним збуджувачем в загальному випадку може складатися з таких підсистем (рис. 3.9). Людино-машинний інтерфейс (ЛМІ) реалізує функції взаємодії оператора з системою, зокрема запуск/зупинку руху робочого органу, вибір режимів роботи, введення параметрів коливань та часових параметрів, як то тривалість роботи, кількість поштовхів, тощо, а також функції індикації поточних значень параметрів та режиму функціонування. Програмований логічний контролер (ПЛК) або однокристальний мікроконтролер (ОМК) генерує сигнали завдання для системи керування електроприводом (СКЕП) на основі даних, що отримані від ЛМІ циклічно в режимі реального часу (рис. 3.9, а) або завчасно обчислює масив значень для визначеного часового інтервалу траєкторії руху робочого органу віброзбуджувача (рис. 3.9, б).

Система керування електроприводом (СКЕП) здійснює безпосереднє керування перетворювачем частоти, обчислює і контролює внутрішні координати електропривода. Підсистема збору і обробки інформації (СЗОІ) накопичує і архівує технологічні або експериментальні дані.

В разі необхідності система (рис. 3.9) доповнюється підсистемою забезпечення безпеки і запобігання нештатних ситуацій (на рисунку не показана). Слід зазначити, що кожна з підсистем працює циклічно, раз по раз виконуючи свою програму в машинному циклі (англ. Scan), а цикл, що показаний на рис. 3.9 є зовнішнім функціональним циклом вищого рівня.

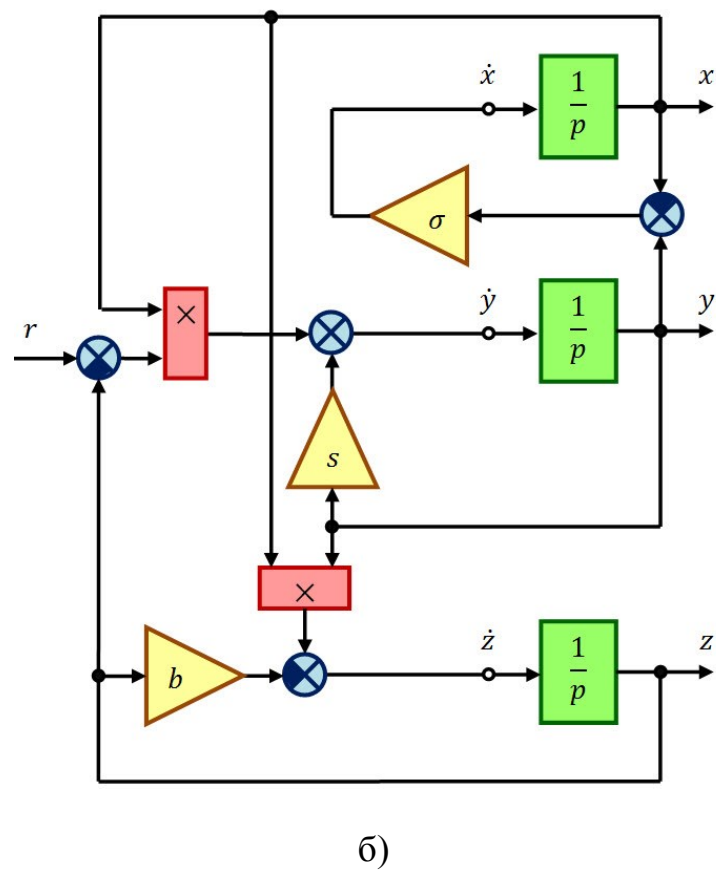
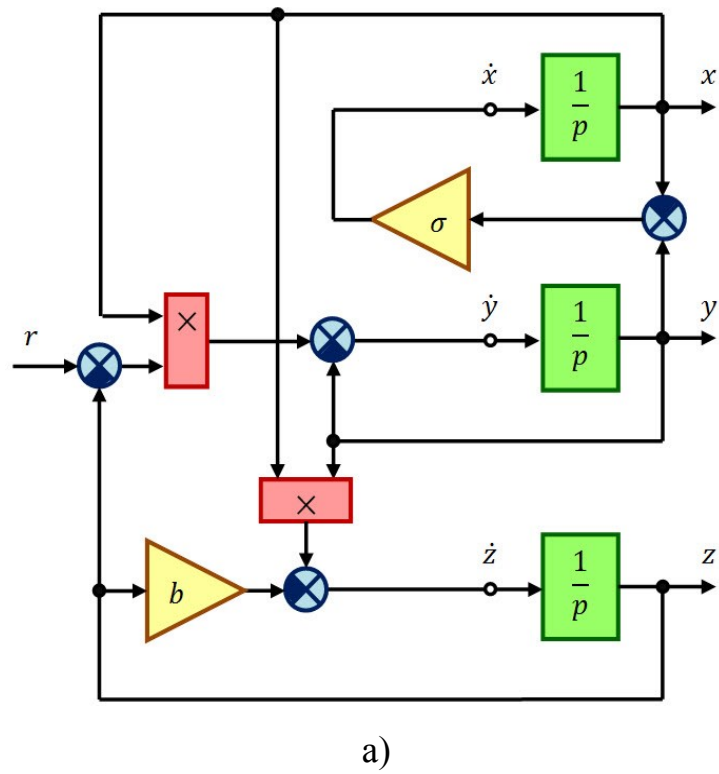


Рис. 3.8 Структурні схеми генераторів Е. Лоренца (а) та Х. Чена (б), що отримані на основі диференційних рівнянь

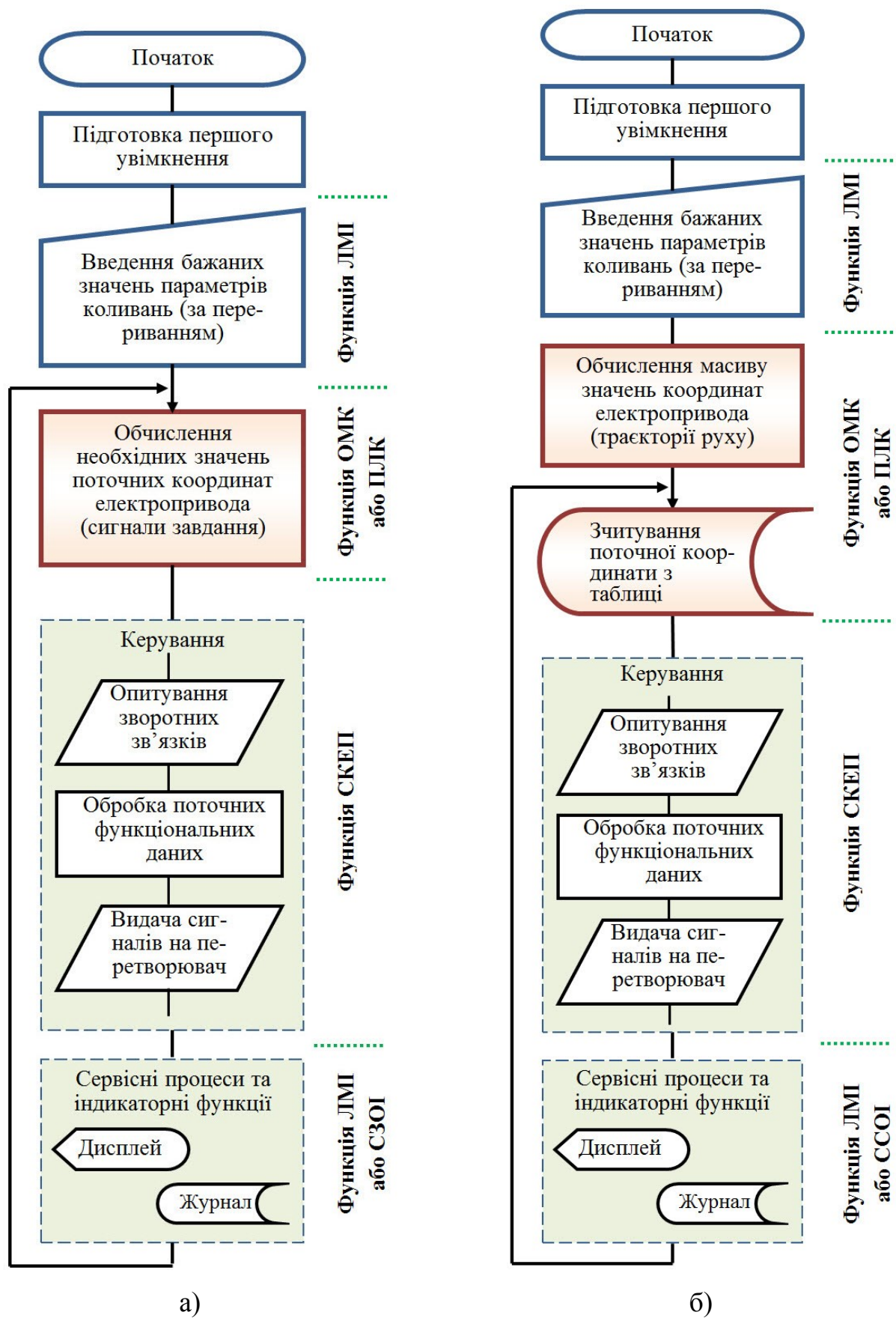


Рис. 3.9 Укрупнений алгоритм функціонування системи керування: а) в режимі реального часу; б) із завчасним розрахунком траєкторії

Функціональний цикл полягає в обміні даними між підсистемами і може ініціюватись ПЛК чи ОМК або іншими підсистемами за таймером або за подією (тобто за перериванням). При цьому в залежності від джерела переривання, в залежності від топології побудови системи, в залежності від типів інтерфейсів можливий обмін між всіма підсистемами або між окремими парами підсистем (вузлами в мережі).

Для збереження стійкості та оцінки безпеки споруд критичної інфраструктури необхідний оперативний чи безперервний контроль, який хоч і не дозволяє виключити аварійний збіг обставин, але може попередити про зміни та небезпечні порушення, а при прийнятті своєчасних експертних рішень – підвищити поріг стійкості [100]. В ідеалі можливе урахування всіх причинно-наслідкових зв'язків, в тому числі, і тенденцій накопичення випадкових пошкоджень, що необхідно для завчасного ремонту та відновлення системи.

Висновки за розділом 3

1. Розроблено моделі та алгоритми складних коливань, які дозволяють підвищити достовірність контролю і реалізувати нові закони керування, неможливі для класичних вібраційних систем але необхідні для систем автоматизованого віброакустичного контролю будівель та споруд.

2. Обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності в схемі обчислення за алгоритмом J. Crenshaw в більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж з початковими значеннями коефіцієнтів для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю. Це необхідно при створенні виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного моніторингу тріщин та порушень однорідності несучих конструкцій будівель і споруд.

3. Розроблено нові методи і алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання полічастотних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів із заданими амплітудними та частотними характеристиками. Це дає необхідну і достатню базу для удосконалення оцінки зміни структури сере-

довища внаслідок прояву тріщин та порушення однорідності за допомогою віброакустичного моніторингу.

4. Розроблено і апробовано в лабораторних умовах збуджувач коливань для системи автоматизованого віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд.

5. Для віброакустичного контролю внутрішньої пошкодженості наземних споруд виконано наукове обґрунтування та удосконалено методи моделювання з урахуванням хаотичної складової процесу руйнування.

6. Для віброакустичного контролю внутрішньої пошкодженості наземних споруд (стін, фундаментів) виконано наукове обґрунтування урахування хаотичної складової процесу руйнування. Розроблено програмну модель для збуджувача віброакустичних коливань в середовищі для математичного моделювання, що описується системами диференціальних рівнянь Лоренца Е. та Чена Х. Побудовані структурні схеми генераторів, що отримані на основі диференціальних рівнянь.

7. Удосконалено методи і алгоритми автоматичного керування збуджувачем коливань для отримання полічастотних коливань, лінійних хвиль із заданими амплітудними та частотними характеристиками, що дозволяє своєчасно оцінити стійкість споруд критичної інфраструктури та підвищити безпеку при їх експлуатації.

РОЗДІЛ 4

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД З УРАХУВАННЯМ МЕТОДІВ, ПРОГРАМНИХ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

4.1 Ідентифікація прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд для зниження ризиків їх руйнування

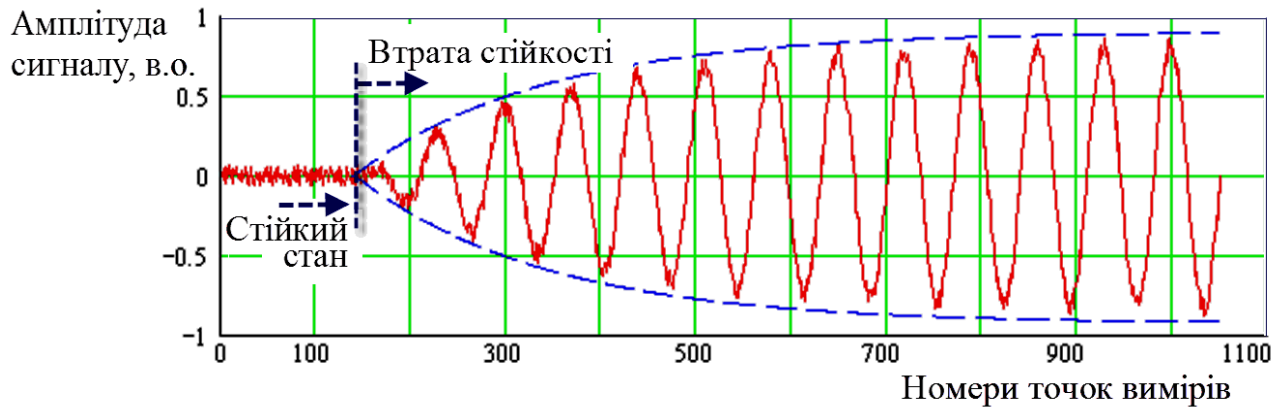
Безпека експлуатації будівель та споруд в першу чергу залежить від виникнення та розвитку процесів руйнування в бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементах несучих конструкцій. Моніторинг стану конструкцій надає корисну інформацію про цілісність та працездатність конструкції. Критичним аспектом будь-якої методології оцінки стійкості будівель та споруд є діагностика пошкоджень, яка включає виявлення пошкоджень, локалізацію, класифікацію типу пошкодження або кількісну оцінку. Для цих цілей використовуються моделі та експериментальні методи [101-107].

Залежно від ступеня пошкодження втрата стійкості може бути м'якою або жорсткою [84, 108, 109]. При поступовій втраті стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які часто пов'язані з допущеними при проектуванні помилками, підтопленнями фундаментів або недотриманням правил експлуатації, які проявляються в поступовому ослабленні несучих конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень.

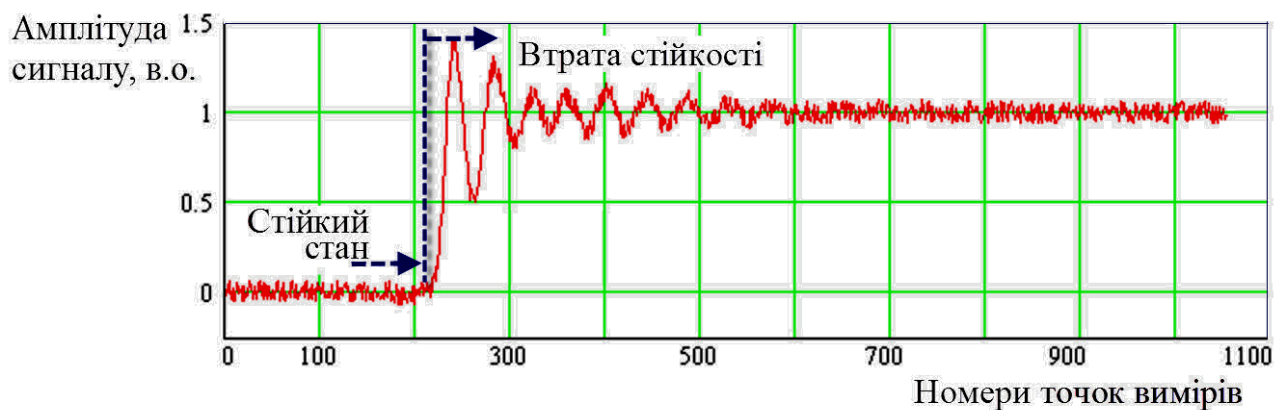
При поступовому ослабленні несучих конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень встановлюється коливальний періодичний режим, який супроводжується зростанням пошкодженості (кількості та величини тріщин) та на початковому етапі мало чим відрізняється від стану рівноваги (рис. 4.1, а).

Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості пошкоджень конструктивних елементів або раптового швидкого зростання тріщин, які активізуються зсувами основ будівель під час

землетрусів або раптовим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів.



а)



б)

Рис. 4.1 Зміна динамічної поведінки елементів будівель і споруд в процесі втрати стійкості: а – поступове ослабленні несучих конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень; б – раптове розвантаження гранично-напружених конструкцій

Динамічні впливи можуть бути малої потужності (розриви іржавої арматури, наслідки пожеж) або потужними (перша хвиля або афтершоки землетрусів, що повторюються, вибухові хвилі). Впливи великої потужності особливо небезпечні внаслідок їх слабкої прогнозованості та трагічних наслідків. Це при-

зводить до лавиноподібних обвалень конструкцій будівель, що втратили опору в результаті руйнування одного з поверхів.

При раптовому розвантаженні (за межею міцності) гранично-напружених конструкцій будівель і споруд втрата стійкості відбувається стрибком, коли система переходить із стаціонарного режиму рівноваги в інший режим, як правило, коливальний періодичний режим, що встановився, але на іншому енергетичному рівні (рис. 4.1, б).

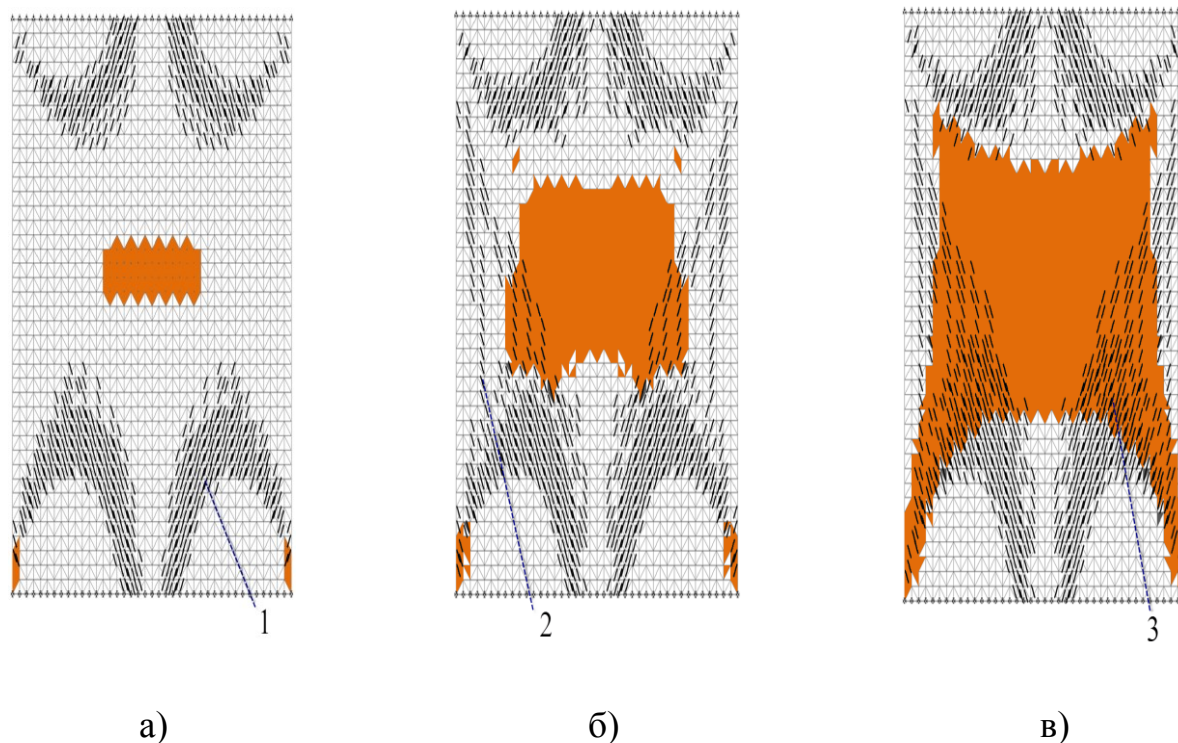
Слід зазначити, що при всіх типах втрата стійкості конструктивних елементів може відбуватися і без суттєвих візуально визначених пошкоджень. Тому для безпечної експлуатації будівель та споруд вирішальним є не лише візуальний огляд, а й своєчасний контроль прихованої пошкодженості та тріщинуватості в конструктивних елементах.

Утворення тріщин в елементах будівель і споруд відбувається внаслідок крихкого руйнування на мікро- або макрорівні. Тріщини відриву розвиваються у напрямі перпендикулярному розтягуванню матеріалу. В результаті розвитку мікротріщин утворюються тріщини сколювання, які орієнтуються в напрямку максимального дотичного напруження під кутом до осі стиснення або розтягування. Пошкодженість елементів конструкцій відбувається шляхом зростання мережі мікротріщин з формуванням областей непружних деформацій і магістральних тріщин.

Моделювання процесу руйнування методом скінченних елементів [103, 104] переконливо показало (рис. 4.2), що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель і споруд (для розрахунків використано обчислювальний комплекс «GEO-RS» [105, 106]).

Для визначення локалізації тріщин у товстих бетонних та інших монолітних конструкціях використовуються методи віброакустичної діагностики [107-115]. Метод віброакустичного контролю запропоновано використовувати для

вирішення проблеми превентивної оцінки стійкості будівель та споруд тріщинуватості та прихованої пошкодженості їх конструктивних елементів.



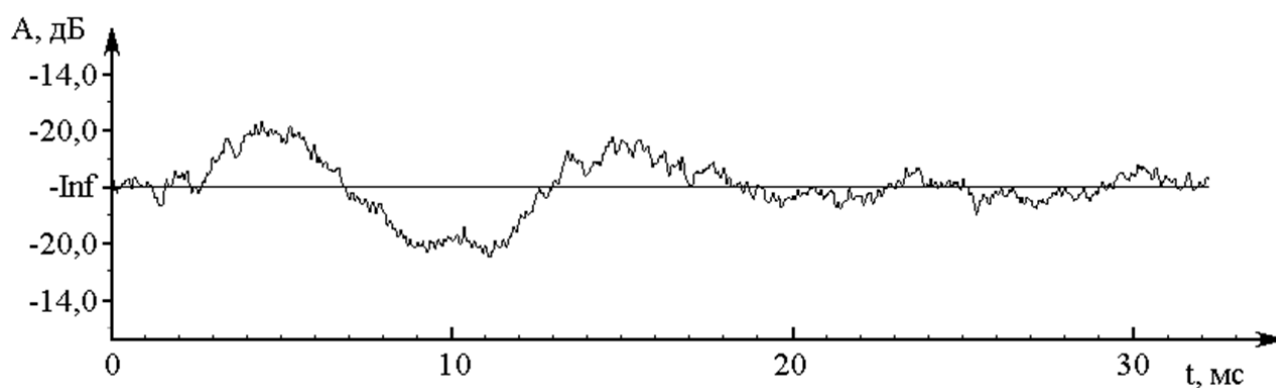
1 – зони формування орієнтованих мікротріщин; 2 – об'єднання мікротріщин у спрямовані магістральні тріщини; 3 – об'єднання мікротріщин у пошкодженій зоні (поява можливості поверхневого сколу в нижній частині споруди)

Рис. 4.2 Процес утворення тріщин в стінових конструкціях будівель і споруд при зростанні навантаження (а, б, в) за даними математичного моделювання напружено-деформованого стану

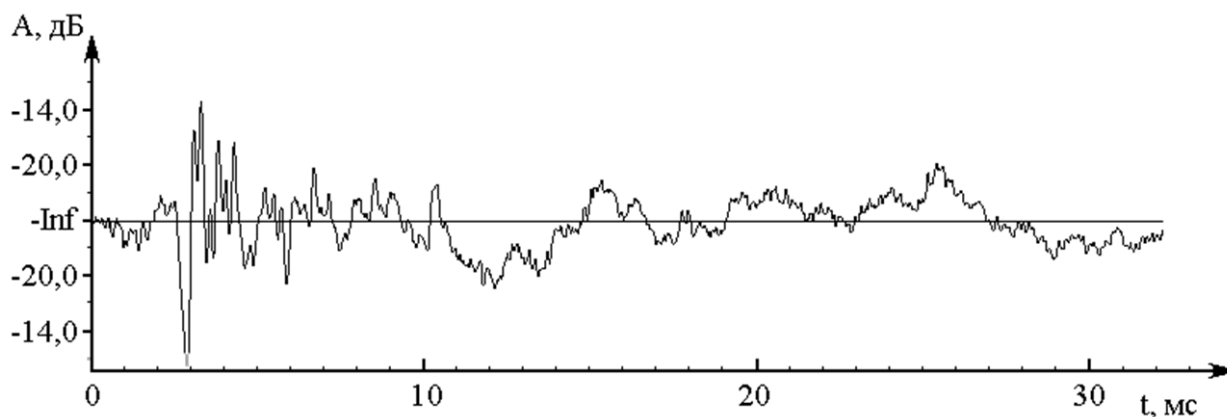
Основна особливість неруйнівного контролю полягає в тому, що він не повинен змінювати (погіршувати) вихідні механічні властивості об'єкта, тому силу удару підбирають мінімальною, для якої ударну хвилю можна вважати пружною. Однак цієї енергії цілком достатньо для порушення коливань у блокових структурах та будівельних конструкціях.

На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль (див. п. 2.2, табл. 2.1), цілісний матеріал об'єкту контролю можна віднести до системи з розподіленими параметрами, частково або повністю зруйнований – до систем із зосередженими параметрами [112].

Передній фронт акустичного сигналу завжди поширюється зі швидкістю поздовжніх хвиль, тобто з максимальною швидкістю. Розсіювальні властивості матеріалів залежно від довжини хвилі пояснюються шаруватістю та тріщинуватістю середовища, кристалічною будовою та температурним рухом частинок, мінливістю фізичних властивостей та речовинного складу, наявністю включень та порожнин, структурних блоків та плоскопаралельних структур. Конструктивні елементи будівель виступають у ролі класичних акустичних хвилеводів, тому поширення їх вздовж шарів відбувається з меншим ослабленням, ніж у необмеженому однорідному або неоднорідному середовищі (рис. 4.3).



а)



б)

Рис. 4.3 – Відмінність віброакустичних коливань в цілику (а) і в тріщинуватому середовищі (б) на прикладі гіпсової плити

Вид хвиль, що розповсюджуються в таких акустичних хвилеводах без зміни своєї структури – нормальні хвилі (моди). Закриття тріщин, відшарувань у матеріалі однозначно переводить однорідну нормальну хвилю в неоднорідну, що експоненційно загасає, і навпаки (див. п. 2.3).

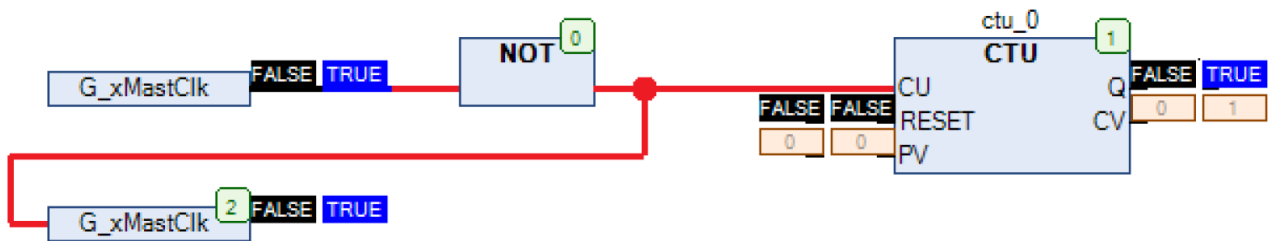
Таким чином, при проведенні моніторингу віброакустичним методом встановлюються межі зон підвищеної тріщинуватості в конструктивних елементах будівель та споруд, які служать, у тому числі, і для уточнення результатів візуальних спостережень та зовнішніх оглядів.

4.2 Практична реалізація генератора коливань для засобів віброакустичного контролю на основі програмованого контролера та сервопривода

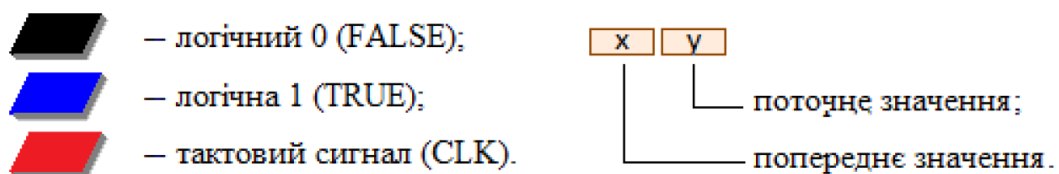
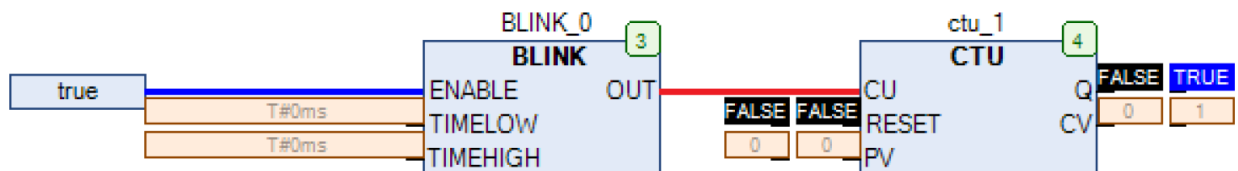
Для оновлення значень завдання на швидкість (MC_FB_LXM.Velocity), на відносне переміщення (MC_FB_LXM.Distance), на абсолютну координату (MC_FB_LXM.Position), на струм (MC_FB_LXM.Torque), або значень іншої уставки (MC_FB_LXM.Setpoint) на вхід (MC_FB_LXM.Execute) відповідного функціонального блоку MC_FB_LXM слід подавати передній фронт додатного імпульсу (запуск на однократне виконання функціонального блоку) або прямокутний сигнал максимально можливої частоти (постійне оновлення поточного значення завдання). Максимально можлива частота природним чином обмежена половинним значенням частоти зміни машинних циклів контролера, за якого двійковий сигнал (або булева змінна) інвертується в кожному машинному циклі. Для генерації такого сигналу розроблено програмний модуль, лістинг якого наведений на рис. 4.4.

Тактовий сигнал формується в глобальній змінній двійкового типу g_xMastClk. Вміст глобальної змінної доступний з будь-якої програмної одиниці проекту. На рис. 4.4 позначені функції та функціональні блоки: NOT – функція логічного заперечення, BLINK – функціональний блок (ФБ) мультівібратора, CTU – ФБ інкрементного лічильника; входи/виходи: CU – інкрементний лічильний вхід (Count Up), RESET – вхід скиду (початкової ініціалізації), PV – вхід зчитування значення уставки (Preset Value), Q, OUT – дискретні виходи,

CV – вихід поточного значення вмісту лічильного регістра (Current Value),
 ENABLE – вхід дозволу роботи, TIMELOW – уставка тривалості паузи (FALSE на виході OUT), TIMEHIGH – уставка тривалості імпульсу (TRUE на виході OUT).



а)



б)

Рис. 4.4 Варіанти реалізації генератора тактових імпульсів: а – інверсією глобальної змінної; б – з використанням функціонального блоку BLINK

Перший варіант реалізації (рис. 4.4, а) використовує функцію логічного заперечення і не створює екземпляр функціонального блока та набір змінних функціонального блока. Проте для вихідного сигналу оголошується глобальна змінна і резервується місце в пам'яті даних контролера. Варіант (б) можна вважати більш наочним, він дозволяє зменшувати частоту вихідного двійкового сигналу, проте функціональний блок BLINK використовує блок TP таймера, що функціонує в режимі одновібратора, який надається бібліотекою standard.library програмної системи CoDeSys. Таким чином для кожного входу/виходу кожного

екземпляра обох функціональних блоків автоматично декларуються змінні відповідного типу. Перелік оголошених констант, змінних та використаних типів даних наведено в табл. A1 (додаток A).

Для отримання перехідних функцій досліджуваних об'єктів або їх фізичних моделей, вивчення їх реакції на типові впливи, а також для забезпечення універсальності програмного запропонованого забезпечення розроблені схеми формування сигналів прямокутного меандру із заданими параметрами та чистої синусоїди. Аргументом для функції синусоїди є сигнал дискретного часу $g_rDiscrTime$ у формі пили, який лінійно зростає із заданим кроком $g_rDelT \Delta t$ протягом одного періоду 2π синусоїди і формується схемою, яка подана на рис. 4.5, а.

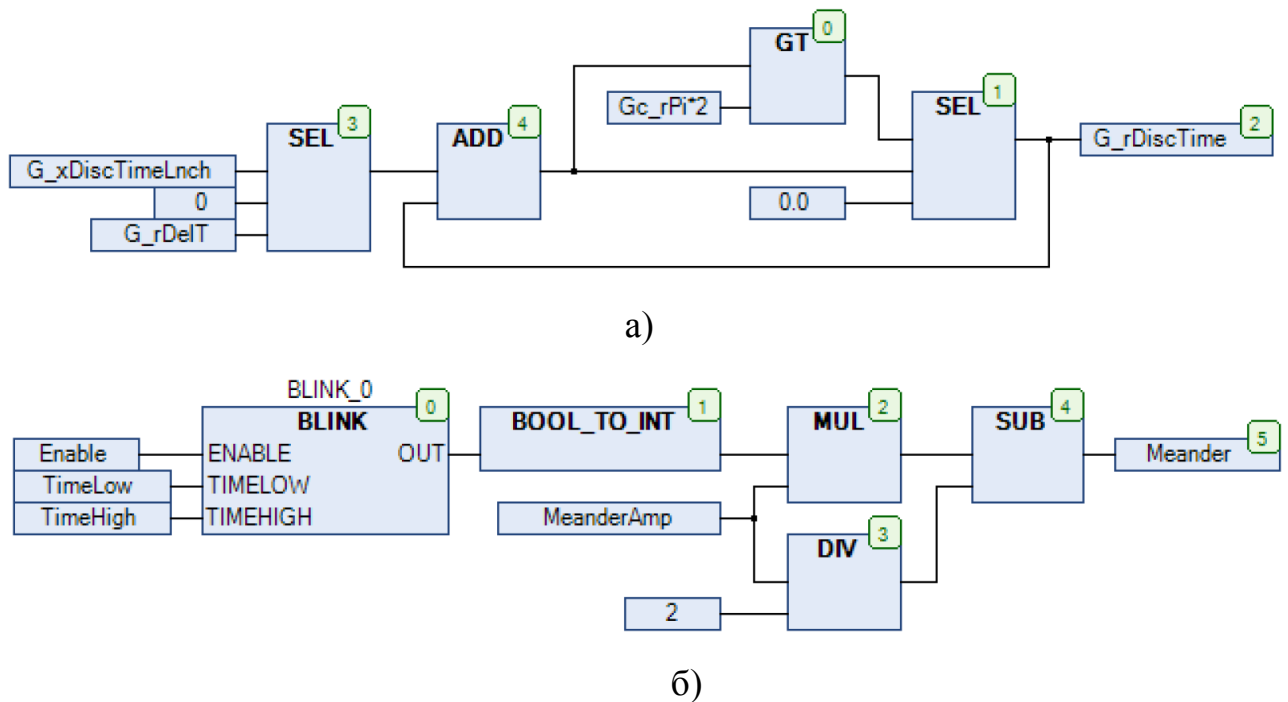


Рис. 4.5 Схема формування сигналу поточного значення дискретного часу протягом одного періоду першої гармоніки (а), прямокутного меандру (б) та чистої синусоїди

Запускає роботу схеми (а, відповідно і відлік дискретного часу) сигнал $g_xDiscTimeLnch$, який при початковій ініціалізації скидається в пасивний стан, а далі керується оператором за допомогою елемента **Button** (кнопка, що перемикає) інтерфейсу візуалізації. Сигнал меандру генерується схемою на

рис. 4.5, б, яка оформлена програмною одиницею POU_SQMeandr як функціональний блок.

Окрім описаних вище функціональних блоків, входів/виходів та функцій в цій схемі використовуються: SEL – керований двохпозиційний перемикач (мультиплексор 2×1), ADD – суматор, GT – функція порівняння «більше», BOOL_TO_INT – функція перетворення типу даних (з двійкового в цілочисельний), MUL/DIV – функції множення/ділення, SUB – функція арифметичного віднімання. Блоки в лістингу програми пронумеровані за потоком розповсюдження даних («by flow»). Призначення входів/виходів, змінних та використаних типів даних наведено в табл. Б1 (додаток Б). Використані такі позначення: Application – застосунок, розроблений проект, POU_SQMeandr – функціональний блок генератора меандру; VAR_GLOBAL, VAR_INPUT, VAR_OUTPUT – глобальна, вхідна та вихідна змінні; CONSTANT – незмінна константа; REAL, UINT, INT – дійсний, беззнаковий цілочисельний та звичайний цілочисельний числовий типи; BOOL – логічний двійковий тип; TIME – часовий тип даних; ARRAY...OF... – масив елементів вказаного типу.

Окрім типових впливів в системах діагностики та в дослідницькому обладнанні широке застосування отримали функціональні генератори, що виробляють сигнал із заданими спектральними характеристиками. В переважній більшості це електронні прилади, які використовуються в електроніці та радіофізиці. Донедавна впровадженню таких генераторів у віброакустичну діагностику, в механіку, в гірничу справу тощо заважала відсутність точно керованих електроприводів із заданими статичними та динамічними характеристиками, пристроїв мікропроцесорного керування та швидких інтерфейсів і промислових мереж. Розроблено генератор (синтезатор) механічних гармонічних коливань із заданим частотним спектром на основі програмованого логічного контролера та сервопривода з використанням промислової мережі CANopen та елементів людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ, англ. HMI, Human-Machine Interface).

Зовнішній вигляд лабораторної установки генератора представлено рис. 3.6 (див. п.3.1). Програмна реалізація генератора виконана користувацьким

функціональним блоком POU_HarmSynth (рис. 4.6) мовою структурованого тексту (ST, Structured Text) з двома входами: HarmAmp – вхід для одномірного масиву arrHarmAmp вектора значень амплітуд гармонік та HarmPh – вхід для одномірного масиву arrHarmAmp вектора значень початкових фаз гармонічних складових.

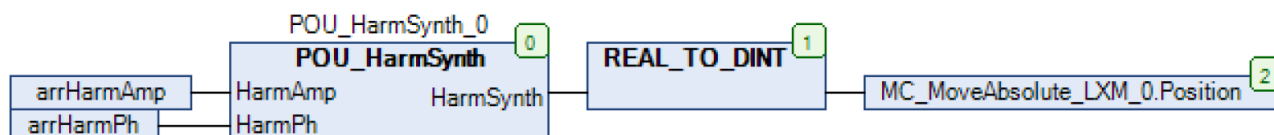
```

1  FUNCTION_BLOCK POU_HarmSynth
2  VAR_INPUT
3      HarmAmp: ARRAY [1..16] OF INT := [16(0)]; // Амплітуди гармонік
4      HarmPh: ARRAY [1..16] OF INT := [16(0)]; // Початкові фази гармонік
5  END_VAR
6  VAR_OUTPUT
7      HarmSynth: REAL := 0; // Вихідний синтезований сигнал
8  END_VAR
9  VAR
10     uiCounter: UINT; // Лічильник циклів
11 END_VAR

1  HarmSynth := 0; // Накопичувач суматора гармонік
2  FOR uiCounter := 1 TO 16 BY 1 DO
3      HarmSynth := HarmSynth + HarmAmp[uiCounter] * SIN(G_rDiscTime *uiCounter
4      + HarmPh[uiCounter]);
5  END_FOR

```

а)



б)

Рис. 4.6 Програмна реалізація генератора гармонічних механічних коливань із заданим спектром (а), виклик відповідного функціонального блока генератора (б)

Синтезований сигнал подається на вихід HarmSynth функціонального блока генератора. Синтез сигналу виконується в циклі із визначеною кількістю повторів, яка обраховується в лічильнику циклів uiCounter і дорівнює кількості гармонік спектра. Окрім цього, в програмі використовується функція перетворення типу REAL_TO DINT (з дійсного в цілочисельний подвійної точності)

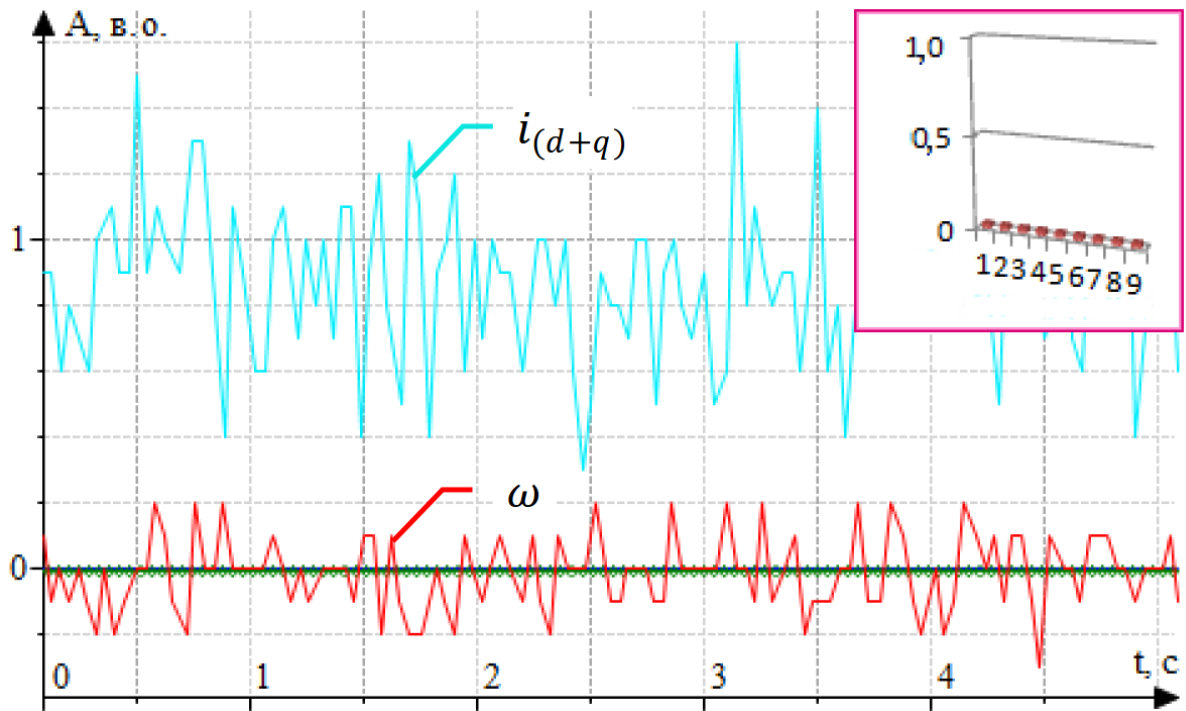
для подальшого використання в якості завдання на кутове переміщення (Position) сервопривода.

Лістинги програмних одиниць POU блоків скидання помилок сервопривода, увімкнення/вимикання силового каскаду, подачі значень величин завдання на кут переміщення, кутову швидкість обертання, кутове прискорення, зчитування актуальних поточних значень керованих величин струму двигуна, швидкості, переміщення та інших координат електропривода за індексною адресацією зведені до додатку Б.2.

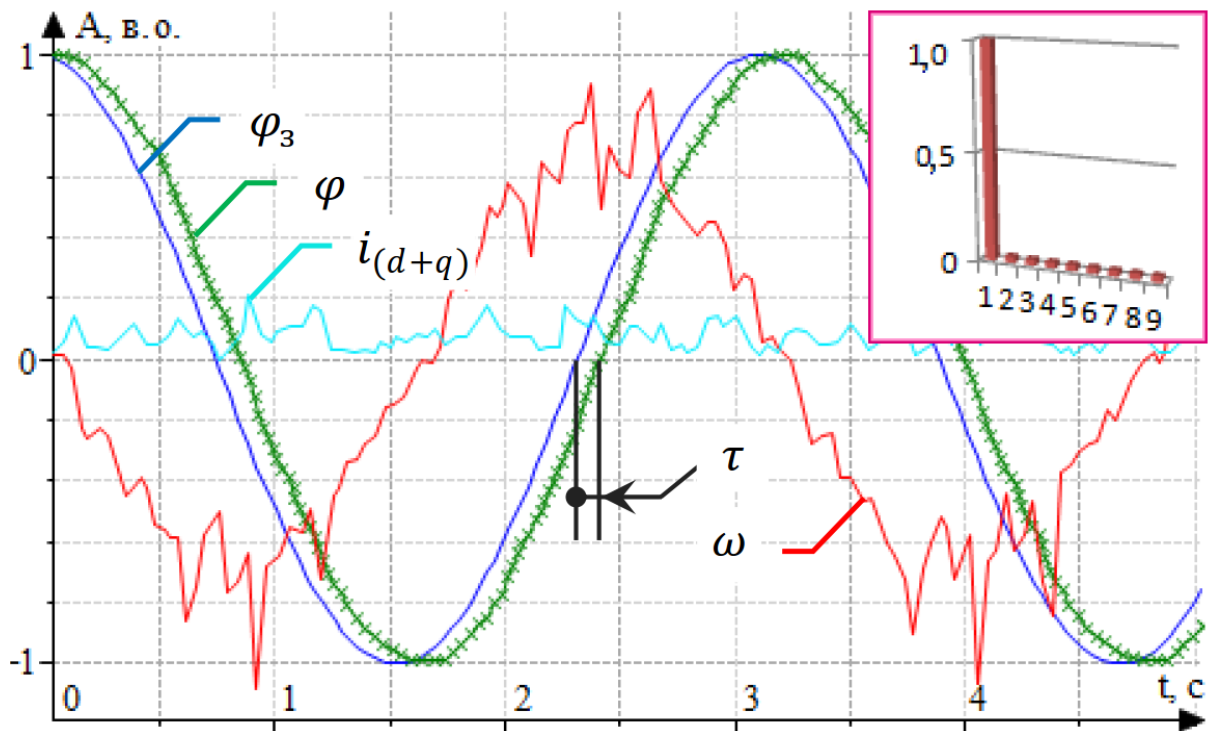
Лабораторна установка генератора складається з ПЛК Modicon M241CEC24T/M, перетворювача сервопривода Lexium LXM05AD10M2, електродвигуна BSH0701P01A2A та панелі LMI Magelis XBTGT2120. Кнопковий пульт керування з емуляцією кінцевих вимикачів та потенціометрами аналогових входів, перетворювач та двигун встановлені на стійці, яка кріпиться до станини швидкоз'ємними затискачами WURTH.

Виконано практичну апробацію генератора механічних коливань на основі гармонічного синтезу. Для цього лабораторна установка запущена в режимах: відтворення першої гармоніки та обертонів (чисті синусоїди до 9-ї гармоніки); синтезу та відтворення насиченого обертонами періодичного сигналу (9, 12 та 16 гармонік); синтезу та відтворення типових впливів (прямокутний меандр шпаруватістю 2, несиметрична пила та симетричний трикутний сигнал). Лабораторний експеримент підтвердив працездатність генератора та відповідність очікуваним технічним характеристикам.

На рис. 4.7, а приведені осцилограми, які ілюструють роботу генератора за нульових значень амплітуд усіх гармонік (всі графіки у відносних одиницях за віссю ординат). Обчислена величина завдання на кут повороту вала двигуна φ_z дорівнює 0 (синій графік). Фактична величина кутового переміщення φ (зелений графік) змінюється в межах чисельної ваги одного...трьох молодших розрядів регістра поточного значення енкодера навіть при нерухомому валу двигуна, що спричиняється його великою роздільною здатністю. Енкодер чутливий до незначних вібрацій вала або станини, на якій встановлено двигун.

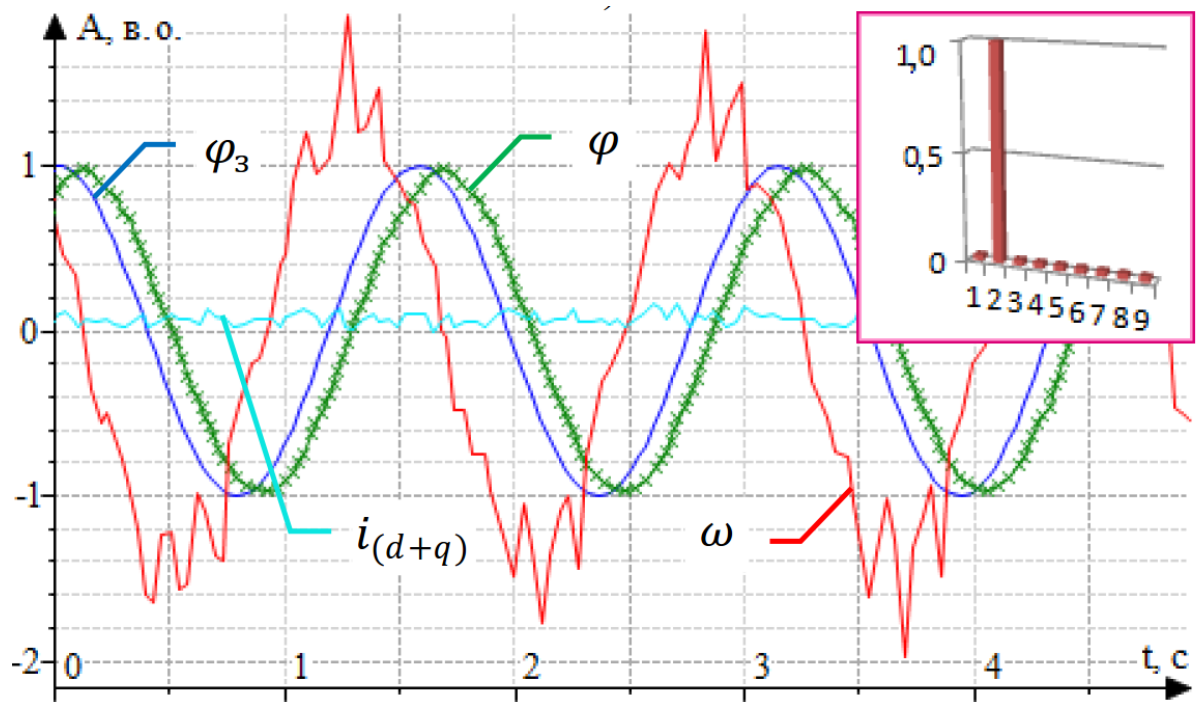


а)

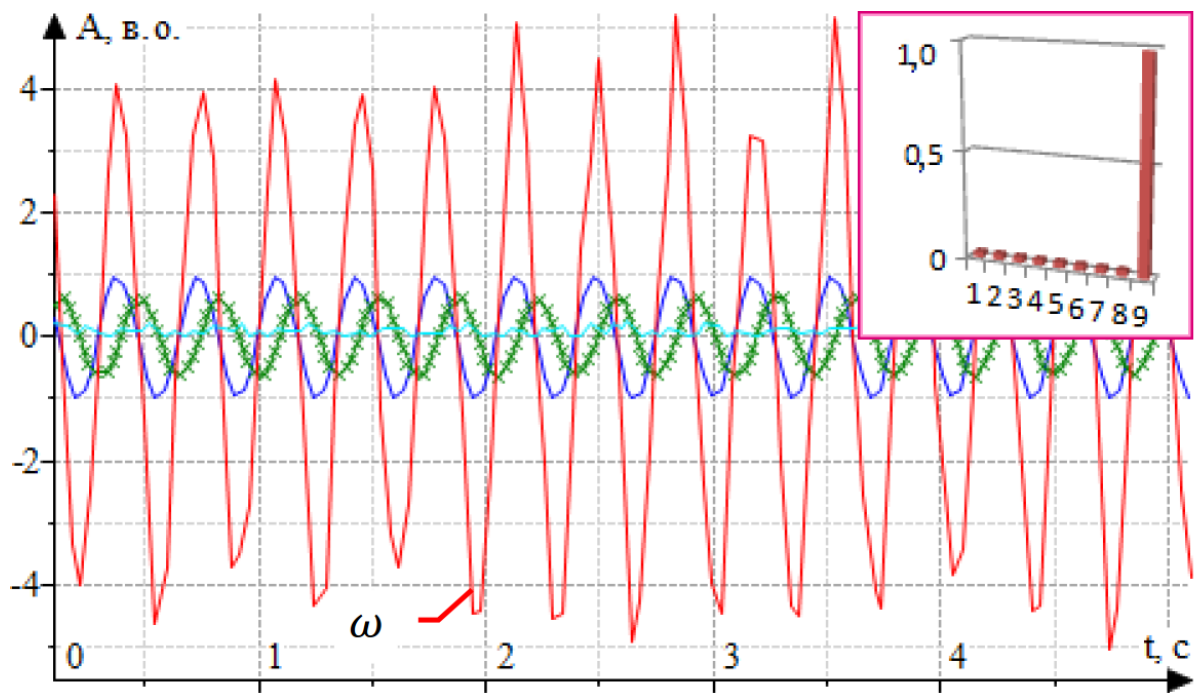


б)

Рис. 4.7 Лист 1 Практична апробація роботи генератора механічних коливань на основі гармонічного синтезу: а) нульове завдання; б, в, г) 1-ша гармоніка та обертони



b)



г)

Рис. 4.7 Лист 2

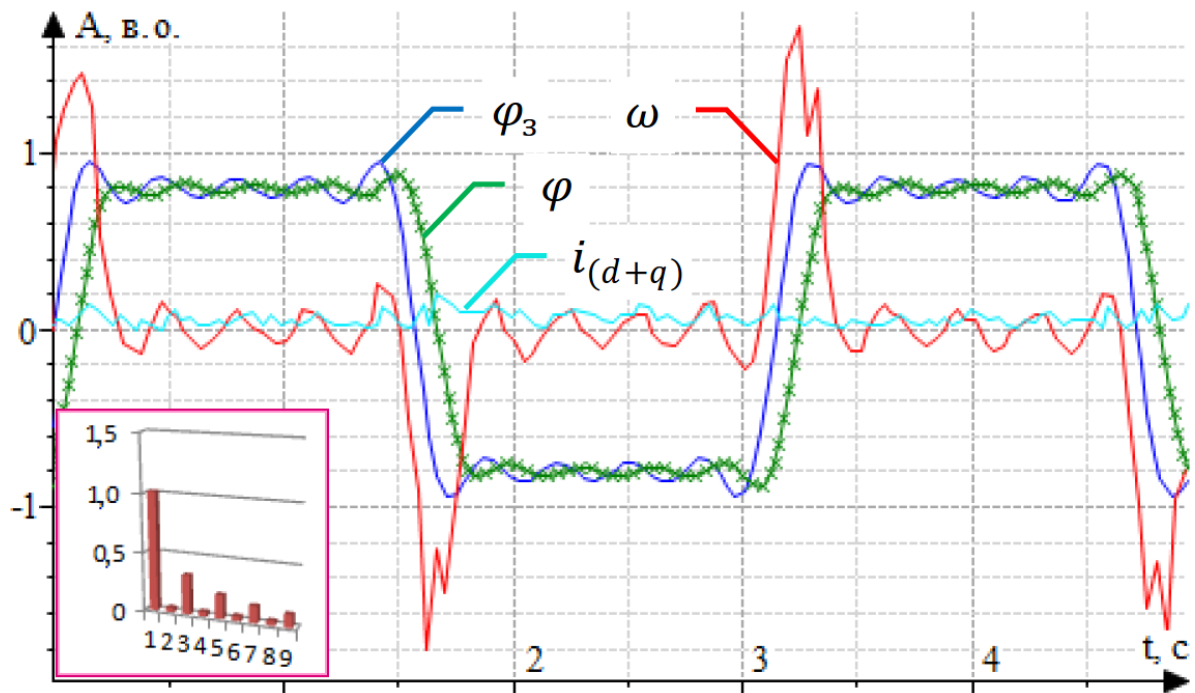
В практичних задачах цим відхиленням можна знехтувати, оскільки нерухомий вал не здійснює вплив на технологічне устаткування, особливо за наявності люфтів та пружних елементів, зокрема муфт. Також на рис. 4.7, а наведено графік кутової швидкості вала ω (червоний графік) у збільшеному за амплітудою масштабі (М50:1).

Коливання поточного значення навколо вісі абсцис спричинено тими самими чинниками (див. вище). Осцилограма струму двигуна (блакитний графік) відображає зміну поточного значення повного струму за осями «d» та «q» в масштабі М 100:1 за амплітудою.

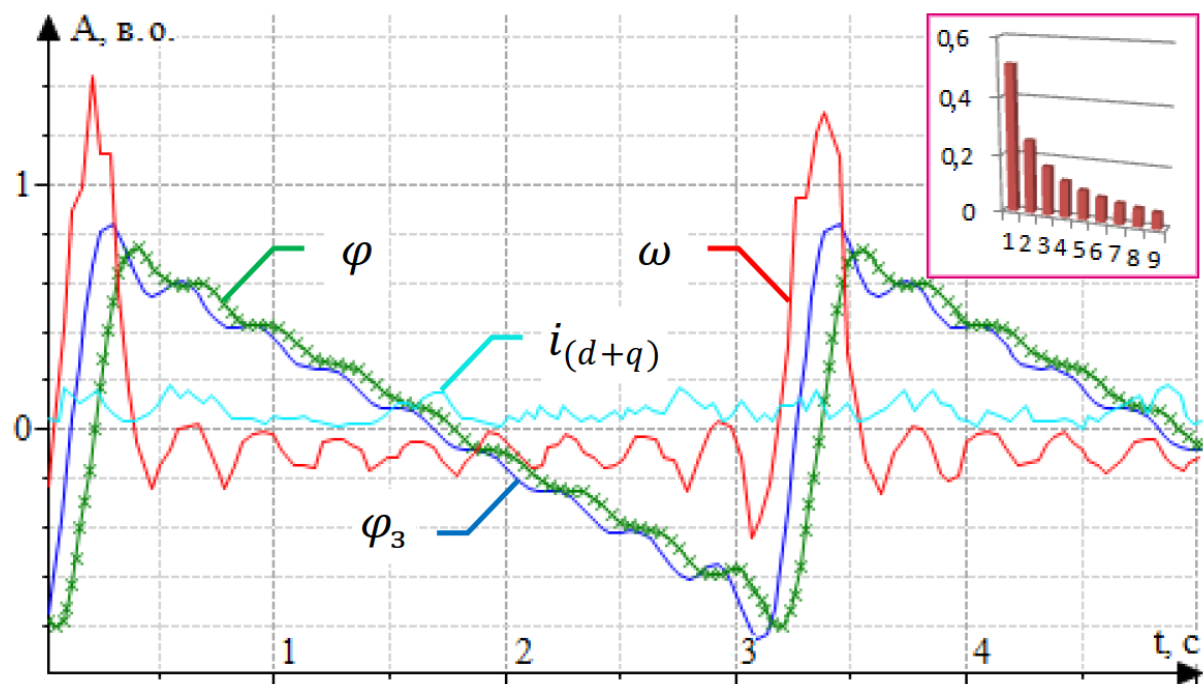
На рис. 4.7, б наведені графіки відпрацювання чистої синусоїди основного тону, а на (в) та (г) – обертонів другої та дев'ятої гармонік з масштабом відображення швидкості за амплітудою М100:1. Графіки дають змогу оцінити динамічні властивості електропривода та якість відтворюваних механічних коливань. В квадратних рамках приведені гістограми амплітудних спектрів зображених сигналів.

Практична апробація роботи генератора механічних коливань для виробки типових впливів для автоматизації процесу віброакустичного контролю будівель і споруд показана на рис. 4.8. Лабораторні випробування пройшли успішно, були згенеровані прямокутний меандр, несиметрична пила, трикутний сигнал та періодичні гармонічні коливання. Встановлено, що генератор забезпечує виконання заданих характеристик, а механізм сервоприводу виконує запрограмоване завдання.

Лабораторні дослідження проведені за безпосередньою участю автора на базі кафедри електроприводу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» в співпраці з науковцями ІГТМ НАН України.

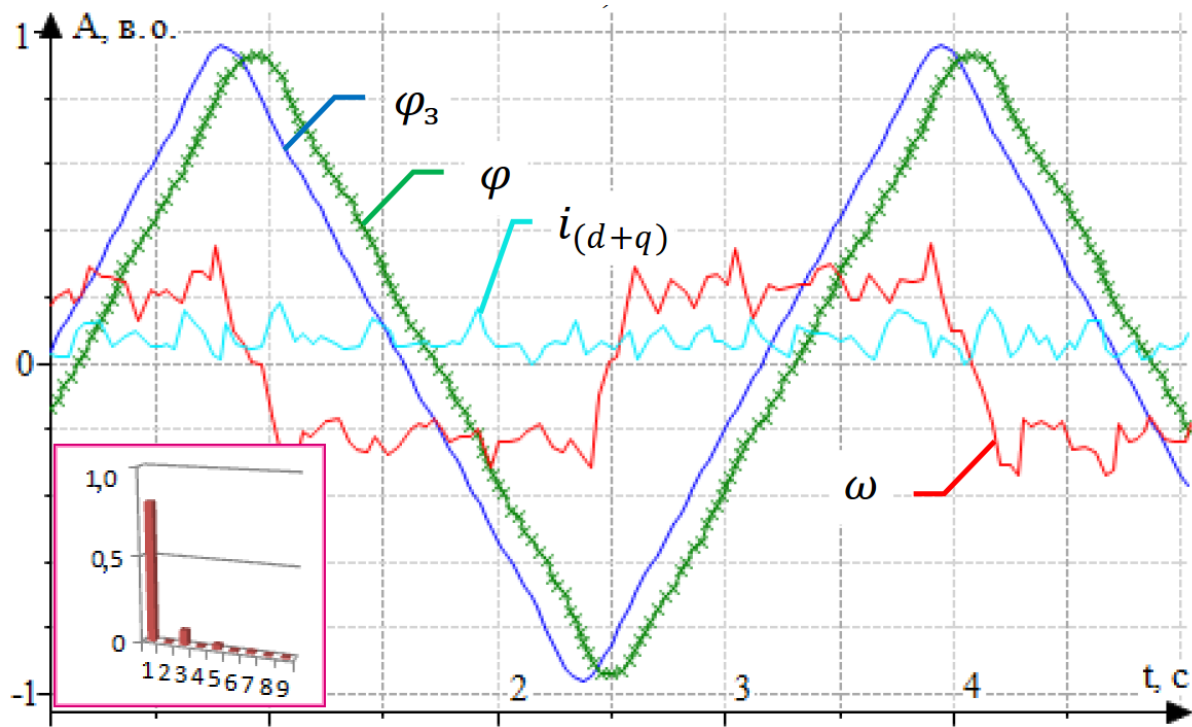


а)

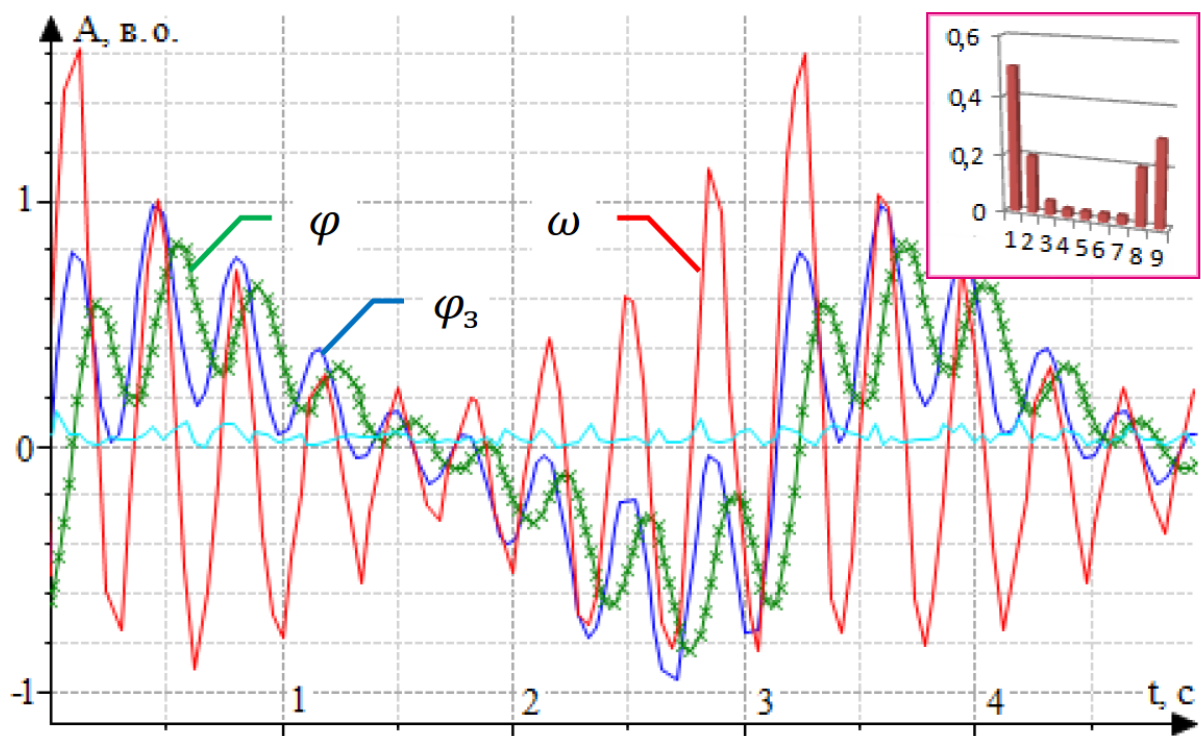


б)

Рис. 4.8 Лист 1 Практична апробація роботи генератора механічних коливань для виробки типових впливів: а) прямокутний меандр, б) несиметрична пила; в) трикутний сигнал, г) періодичні гармонічні коливання



B)



Г)

Рис. 4.8 Лист 2

4.3 Розробка методичних рекомендацій з визначення прихованої пошкодженості будівель і споруд для забезпечення безпеки їх експлуатації

Для отримання оперативної інформації про стан будівель та споруд необхідно здійснювати комплекс заходів щодо контролю параметрів, які адекватно визначають стійкість об'єктів. Часто пошкодження важко визначити візуальними спостереженнями, необхідні методи та засоби для моніторингу внутрішньої структури конструктивних елементів. До цих параметрів відносяться деформації конструкцій, тріщини та відколи в елементах будівель та споруд, які зведено в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами

Методи контролю	Процеси, що контролюються	Параметр контролю та ідентифікації
Спостереження за станом будівель і споруд	Зовнішні пошкодження	- зміщення і деформації елементів конструкцій у місці пошкодження; - межі найбільш небезпечних зон, що візуально спостерігаються
Спостереження за руйнуваннями	Магістральні тріщини та вивали матеріалів	- розкриття і протяжність тріщин; - об'єми, розташування та ступінь небезпеки вивалів будівельних матеріалів
Нівелювання	Зміщення елементів конструкцій	- взаємні зсуви та зміщення елементів конструкцій
Віброакустичний контроль конструктивних елементів	Приховані пошкодження, межі відшарувань	- розташування та ступінь небезпеки прихованих пошкоджень; - глибина, поздовжній та поперечний розміри відшарувань

У випадку необхідності визначення прихованої порушеності елементів конструкцій або недостатнього об'єму даних виконується віброакустичний контроль. Ця методика ефективна, оскільки структурні порушення і руйнування,

що відбуваються в будівлях і спорудах, можуть бути зафіксовані значно раніше, ніж проявляються візуально.

В процесі контролю конструктивних елементів будівель і споруд виконуються наступні завдання. При візуальному контролі експерт проводить огляд будівлі зовні і всередині, щоб виявити видимі ознаки пошкоджень, деформацій, тріщин, зносу матеріалів та інших потенційних проблем. Основні завдання попередніх спостережень полягають у оцінці зовнішніх пошкоджень елементів конструкцій, визначенні меж найбільш небезпечних зон, визначенні можливості використання методів неруйнівного контролю, уточнення особливих вимог щодо техніки безпеки. Візуальний огляд надає базову інформацію про стан будівлі і може бути використаний для визначення необхідності подальших методів діагностики.

Віброакустичний контроль безпеки функціонування будівель і споруд дозволяє виявити приховані пошкодження і вирішувати наступні задачі: контролювати структуру, тріщинуватість в процесі їх експлуатації; контролювати структуру, тріщинуватість та міцність після обрушення окремих частин конструкції; контролювати допустиме навантаження частин конструкції після підсилення; визначати потенційні загрози та ідентифікувати ризики втрати стійкості після пожежі та вибухів.

Оцінка прихованої пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом. Основні положення методики і параметри віброакустичного методу полягають у наступному.

1) Віброакустичний (ударно-хвильовий) метод засновано на реєстрації власних коливань досліджуваних конструктивних елементів будівлі або споруди, збуджених ударом. Для прийому коливань використовують контактні датчики п'єзоакселерометри або сейсмоприймачі.

2) Основними інформативними параметрами при діагностиці є: максимальна амплітуда коливань, тривалість коливального процесу, спектральний склад коливань, що реально визначається дискретним набором амплітуд на фіксованих середніх частотах.

3) Характер відгуку контрольованого елемента будівлі або споруди на ударне збудження визначається резонансними явищами та згасанням пружних коливань у конструкції та ґрунті.

4) Глибина дослідження визначається потужністю ударного впливу та відстанню між точкою прийому та точкою збудження. База контролю повинна бути не меншою за товщину досліджуваної конструкції або споруди.

5) Дефекти конструкції, зокрема, порожнини всередині шару або на межі шарів з різними властивостями, тріщини, заколи та інші призводять до збільшення амплітуди та тривалості коливань і появи в спектрі різко виражених резонансів.

6) Дефекти матеріалу конструктивного елемента споруди, що знижують його міцнісні та пружні характеристики, виявляються у зниженні амплітуди та тривалості коливань і зміщенні максимуму спектральної щільності у бік низьких частот.

7) Зменшення механічного зв'язку між суміжними елементами, наприклад бетонними або залізобетонними блоками призводить до значного зменшення амплітуди пружних коливань. Збільшення напруг у досліджуваних конструкціях обернено пропорційно амплітуді в діапазоні частот від 0,06 кГц до 0,6 кГц.

До застосування методу є наступні передумови.

1) До виконання віброакустичних досліджень проводиться візуальний огляд конструктивних елементів будівель та споруд. Характерними ознаками, які свідчать про доцільність застосування віброакустичного методу, є наявність тріщин на поверхні бетону і заколів, а також ознак корозії бетону та нещільність прилягання бетону чи кам'яної кладки.

2) У місцях з внутрішніми прихованими дефектами матеріалів віброакустичний контроль використовується для виявлення заколоутворення, тріщин, порожнин з метою попередження раптових обвалів, а також для обґрунтування необхідності застосування тимчасових заходів при великому відставанні ремонту у часі.

3) Віброакустична діагностика може вводитися до складу технологічного процесу з оцінки якості виконання будівельних та ремонтних робіт з метою визначення наявності неоднорідностей у конструкції та ступеня її зв'язку з навколишніми елементами будівлі або споруди.

4) На ділянках зі значною асиметрією навантаження, викликаній як природними умовами, так і частковими просіданням фундаментів, віброакустичний метод використовується для відносної оцінки розподілень напружень в несучих конструкціях..

Схеми віброакустичного контролю пошкодження конструктивних елементів будівель та споруд. Для ідентифікації пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд використовують методи віброакустичного профілювання та зондування. На рис. 4.9, а показано схеми поздовжнього та взаємноперпендикулярного профілювання на одній або різних рівновеликих базах. Поздовжнє акустичне профілювання може виконуватися вздовж криволінійного профілю, наприклад, уздовж криволінійної несучої конструкції.

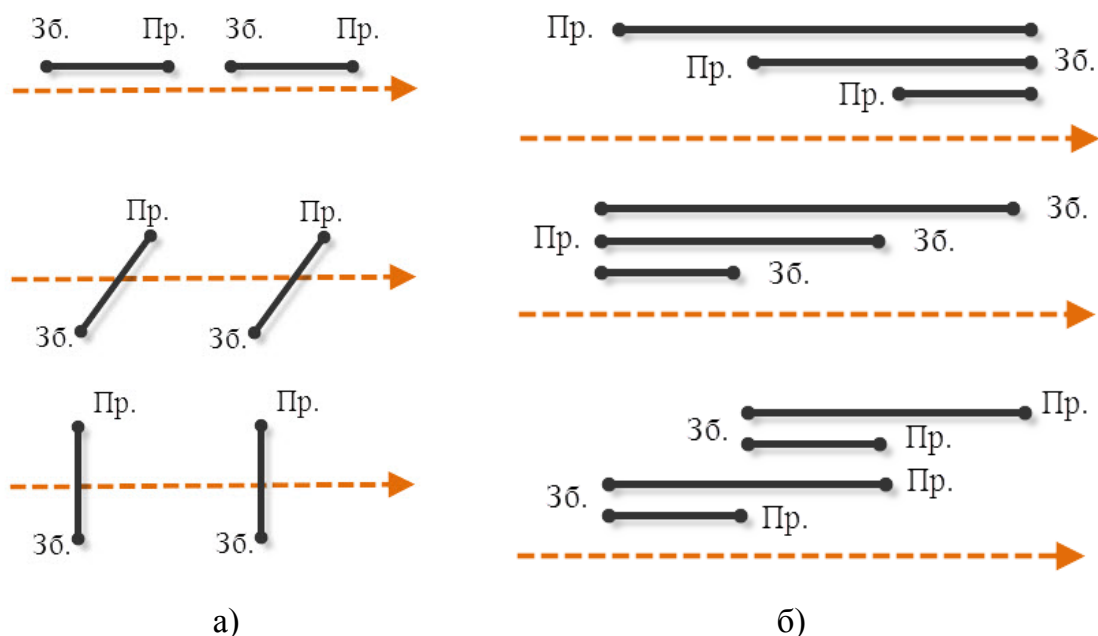


Рис. 4.9 Схеми віброакустичного контролю пошкодження конструктивних елементів будівель та споруд: а – профілювання; б – лінійне зондування («Зб.» – збудувач, «Пр.» – приймач)

Детальність контролю (крок, база) визначаються поставленим завданням, конкретними умовами та його мінливістю. Методичні параметри діагностики відпрацьовуються в ході експериментальних досліджень та обмежуються необхідною достатністю.

На рис. 4.9, б показані методи вертикального акустичного зондування з трьома можливими варіантами – зі зміщенням збуджувача, приймача, ударника і приймача одночасно і симетрично. Вертикальне акустичне зондування відрізняється методикою його проведення та інтерпретацією результатів вимірів. Наприклад, заміна місць удару та прийому акустичних коливань може повністю змінити результати показань приладу на протилежні. Глибина контролю залежить від величини бази, оцінка переважно здійснюється у зоні приймача.

Оцінка пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд.

1) Вимірювання виконують після визначення початкової точки і розбивки профілю з лінійним кроком, наприклад, в 1 м. Наступні профілі в межах ділянки, що обстежується, розбиваються паралельно з кроком по вертикалі, рівним також 1 м.

2) При віброакустичній діагностиці з метою виявлення прихованих дефектів конструктивних елементів будівель та споруд або нещільного механічного зв'язку між ними, збудження та прийом коливань здійснюють у вузлах отриманої сітки, послідовно зрушуючи базу контролю на один крок у горизонтальній площині.

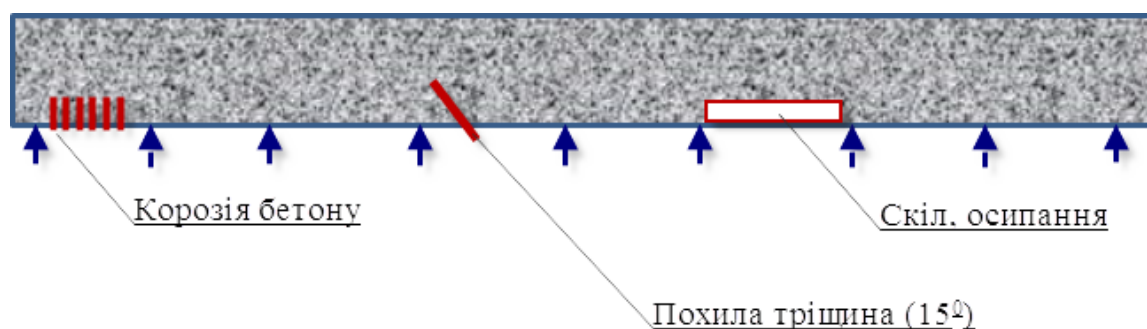
3) При діагностиці, метою якої є оцінка глибини тріщини на поверхні або визначення якості механічного зв'язку між окремими елементами конструкції, базу контролю обирають симетричною щодо тріщини або межі розділу елементів.

4) При обстеженні ділянок, де кріплення має регулярну просторову структуру (наприклад, бетонні блоки, тубінги), визначення інформативного параметра виконуються для кожного з елементів. Крок контролю у разі визначається кроком установки конструкцій.

5) При оцінці якості бетону віброакустичним методом горизонтальні профілі вибирають таким чином, щоб вони перетинали візуально визначені ділянки корозії, лущення та інші аномалії. Для побудови детальної картини пошкощеності поверхневих шарів база контролю та крок можуть бути зменшені у 2,0-2,5 рази.

6) Запис первинної реєстрації даних щодо кожного з профілів виконується на схематичному зображенні перерізу. Поряд із зазначенням середнього значення параметра на цьому ж рисунку відзначають положення аномалій, що візуально спостерігаються. Приклад реєстрації даних показаний на рис. 4.10.

7) Профілюванням визначають значення амплітуд коливань. Отримана картина є умовно вихідною точкою спостереження. Надалі, в міру експлуатації будівлі або споруди, виміри повторюють з періодичністю 2-4 рази на рік, залежно від умов та інтенсивності зростання систем тріщин. За отриманими даними будуються діаграми зміни тиску та зростання пошкодженості.



Дата виконання вимірювань: 15.03.2024 р.

Об'єкт контролю: фундамент будівлі по вул. Квітковій

Матеріал конструктивного елемента будівлі або споруди: бетон М 400 (0,5м)

Армування або кріплення: немає

Шаг профілювання: 1 м.

Інформативний параметр: амплітуда коливань, дБ.

Рис. 4.10 Приклад реєстрації результатів віброакустичної діагностики

8) Оцінка якості закладення армування в залежності від конкретних умов здійснюється за такими варіантами: завдання удару і прийом коливань на розстрілах армування; нанесення удару по армуванню, а прийом коливань з поверхні конструкції; нанесення удару по поверхні конструкції та прийом коливань на армуванні. Вибір варіанта залежить від інформативності апаратури, що застосовується, маси армованих елементів, їх конструкції. Найбільш продуктивний перший варіант, але при відпрацюванні первинної методики випробовуються всі три варіанти.

9) Оцінку якості набрежкбетонної конструкції здійснюють методом поздовжнього профілювання по взаємно перпендикулярним профілям по контуру. Ефективність значно покращується, якщо перед нанесенням бетону здійснити оборку масиву з контролем якості оборки віброакустичним методом.

10) Оцінку якості установки здійснюють відповідно до п. 8. При цьому не виключається застосування звичайних механічних методів, проте переваги віброакустичного методу полягають у високій оперативності, об'єктивності та неруйнівному характері контролю.

11) Оцінка пошкодженості незакріплених ділянок тунелів та інших заглиблених споруд виконується з метою оперативного виявлення ділянок з заколами та тріщинами з подальшою оборкою. Вибір точок діагностики – за місцем. Результати діагностики не документуються. Виняток становлять ділянки явних структурних порушень, які у подальшому можуть мати негативний вплив на стійкість.

Інтерпретація результатів віброакустичної діагностики.

1) Функціональний зв'язок інформативних параметрів віброакустичної діагностики і типових дефектів та пошкоджень конструктивних елементів будівель та споруд представлена в табл. 4.2.

2) Базові значення інформативних параметрів, з якими необхідно порівнювати отримані результати, залежать від типу використовуваних засобів та виду конструктивних елементів будівель та споруд. Вони попередньо визначаються на еталонних, свідомо непорушених ділянках конструкцій. Число точок

на кожній ділянці – не менше десяти. Базові значення параметрів набувають шляхом знаходження середнього арифметичного по всій сукупності вимірів.

Таблиця 4.2

Зв'язок основних параметрів віброакустичної діагностики і характерних дефектів та пошкоджень конструктивних елементів будівель та споруд.

Параметр, вид дефекту	Амплітуда	Тривалість	Частота максимуму спектральної щільності
приховані порожнини та тріщини	зростає	зростає	знижується
ділянки заколоутворення	зростає	зростає	може бути кілька максимумів
нещільний контакт між конструкціями (наявність порожнеч)	зростає	зростає	дещо знижується
низька якість матеріалу	знижується	знижується	знижується
високий рівень напружень у конструкції без її руйнування	знижується	знижується	дещо зростає
збільшення (зменшення) напружень	зменшується (збільшується)	незначно зменшується (зростає)	в діапазоні частот (0,06-0,6) кГц

При використанні віброакустичного методу реєструється частота, амплітуда та час коливань. Оцінка результатів проводиться у разі найбільшої з амплітуд коливань у частотних смугах, що відображається індикатором спектра. Приклад віброакустичного профілювання показано на рис. 4.11, де визначені ділянки з зонами прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні.

3) При неможливості попередньо виконати таріровку на еталонних ділянках усі отримані дані усереднюють і аномальними вважають значення, що відрізняються від середнього більш ніж на 30%.

4) На основі матеріалів з окремих розрізів за формою, показаною на рис. 4.10, будують розгортку поверхні досліджуваної ділянки. З урахуванням

відомостей, поданих у табл. 4.2, а також результатів візуальних та інструментальних спостережень виконують інтерпретацію сукупності даних. Після виділення аномальних точок їх об'єднують в аномальну ділянку з певною ознакою та наносять на план, як показано на рис. 4.12. Рисунок може супроводжуватися короткою текстовою частиною про особливості будівлі або споруди, умови та прояви аномалій, якщо вони не можуть бути відображені графічно.

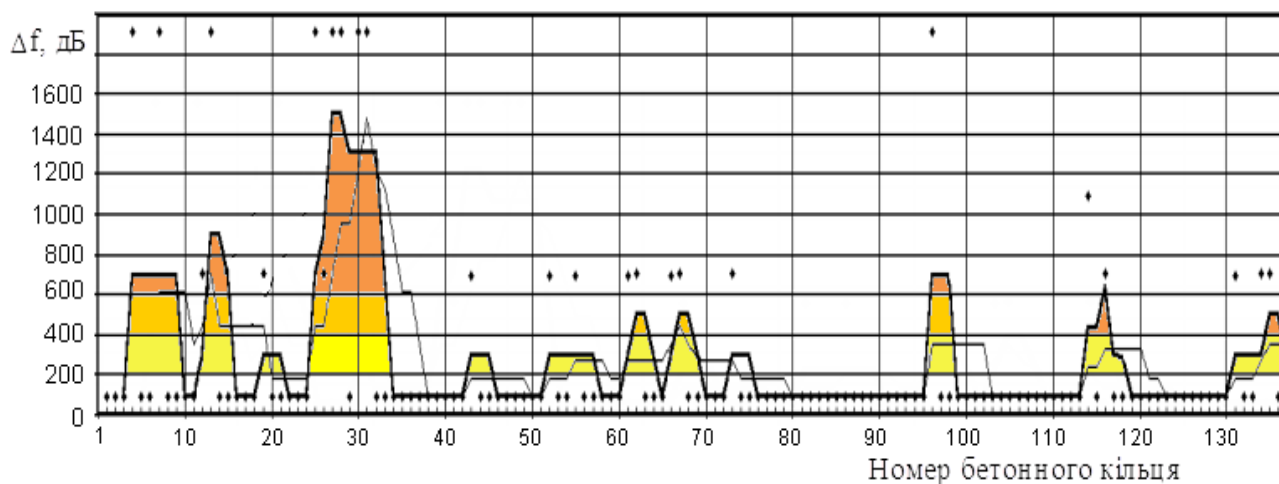


Рис. 4.11 Приклад зміни частот спектральної щільності акустичних відгуків бетонних конструкцій

5) За результатами віброакустичної діагностики складається узагальнююча текстова частина, що включається до складу висновку комісії, яка проводить комплексне обстеження. Узагальнюючі результати подають за спеціальною формою (див. додаток В).

4.4 Визначення комплексних показників оцінки безпеки на базі моделі інтегрованого ризику

Стан будівель та споруд у процесі експлуатації змінюється. Наслідки часткових руйнувань, як зазначено вище, можуть бути зафіксовані за допомогою візуальних спостережень та віброакустичного моніторингу. До найважливіших показників, за якими можна оцінити безпеку контрольованого об'єкта, є ризики, що визначаються як ймовірність виникнення аварій та передбачуваних наслід-

ків [116-121]. Ризики пов'язані з небажаними подіями, зокрема з втратою стійкості об'єкта контролю або раптових обвалів несучих конструкцій за фіксований період часу.

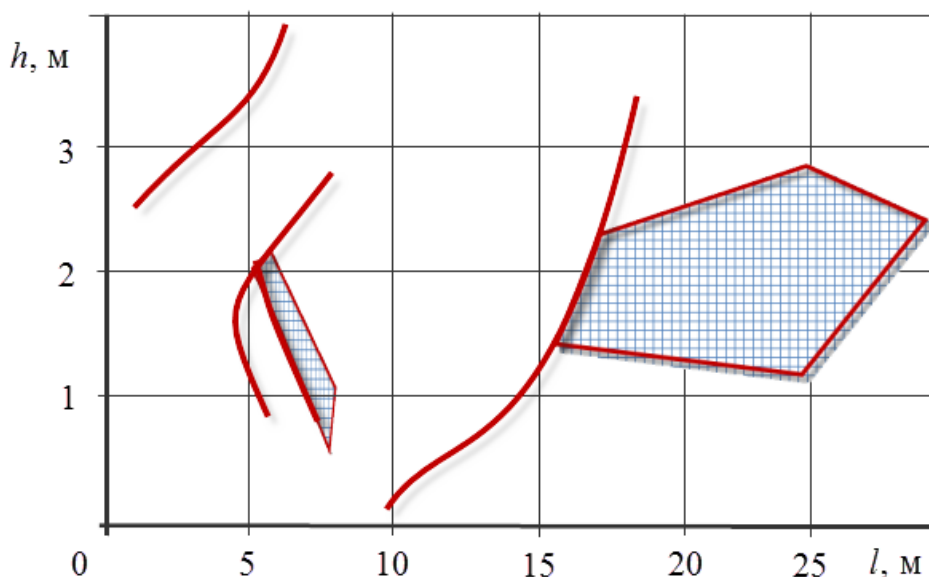


Рис. 4.12 Схема подання результатів віброакустичної діагностики із зазначенням тріщин, заколів які візуально спостерігаються та ділянок прихованих систем тріщинуватості

Використання ризиків для оцінки ступеня небезпеки є загальноприйнятим методом, який покладено в основу оцінки поточного та прогнозованих станів небезпеки контрольованої системи. Для наших умов розрахунок цих показників виконується за абсолютними значеннями фіксованих параметрів віброакустичного моніторингу (див. п. 4.3, табл. 4.1) та за швидкістю їх зміни за проміжок часу, що допомагає запобігти несприятливим подіям на основі існуючих даних.

Процеси руйнування конструктивних елементів будівель і споруд призводять до виникнення впорядкованої неоднорідності: шаруватості, блоковості та періодичності елементів неоднорідності. Коли область контролю значно перевищує розміри елементів неоднорідності, то середовище можливо вважати квазіоднорідним, в якій неоднорідності виявляють свої властивості лише інтегрально. Інтегральні параметри середовища визначаються на основі аналізу системи статистичних оцінок з певною довірчою ймовірністю та точністю. За ви-

нятком великих тріщин, метод ультразвукового прозвучування визначатиме деяку усереднену тріщинуватість з урахуванням пористості та структурних неоднорідностей.

Для визначення комплексних показників оцінки безпеки використовується модель інтегрованого ризику. У зв'язку з тим, що об'єктом контролю є часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), то для оцінки пошкодженості вперше запропоновано використовувати показник, що відображає інтегральний ризик втрати стійкості конструктивних елементів споруд за двома основними групами факторів ризику. Перша група факторів пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга група чинників пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом.

Внаслідок того, що критичними можуть бути пошкодження, що визначаються параметрами з обох груп, оперативний ризик (визначають в процесі періодичного моніторингу) ідентифікують шляхом порівняння і вибору максимального значення ризику з двох груп:

$$\left\{ \begin{array}{l} R(F)^v = k_1^v R(F_1)^v + k_2^v R(F_2)^v + \dots + k_i^v R(F_i)^v; \\ i \in [1; n^v]; \\ k_1^v + k_2^v + \dots + k_i^v = 1; \\ k_i^v \in [0; 1]; \\ R(F_i)^v \in [0; 1]. \end{array} \right. ,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R(F)^a = k_1^a R(F_1)^a + k_2^a R(F_2)^a + \dots + k_j^a R(F_j)^a; \\ j \in [1; n^a]; \\ k_1^a + k_2^a + \dots + k_j^a = 1; \\ k_j^a \in [0; 1]; \\ R(F_j)^a \in [0; 1]. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

де $R(F)^v$, $R(F)^a$ – ризики виникнення аварійної ситуації від факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно; i, j – індекси до кількості факторів n^v і n^a , відповідно; k_1^v , k_1^a – нормалізовані коефіцієнти від 0 до 1 (в сумі дорівнюють одиниці) впливу на ризик окремих чинників групи.

Інтегральний ризик втрати стійкості будівлі або споруди визначається або шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групах (4.1), або підсумовуванням ризиків за цими двома групами факторів:

$$R(F)^{\text{int}} = \begin{cases} \max\{R(F)^v; R(F)^a\} \\ kv * R(F)^v + ka * R(F)^a; \\ \in [0; 1]; \\ ka \in [0; 1]; \\ kv + ka = 1. \end{cases} = \begin{cases} \max\left\{\sum_{i=1}^{n^v} k_i^v R(F_i)^v; \sum_{j=1}^{n^a} k_j^a R(F_j)^a\right\}; \\ kv * \sum_{i=1}^{n^v} k_i^v R(F_i)^v + ka * \sum_{j=1}^{n^a} k_j^a R(F_j)^a; \\ kv \in [0; 1]; \\ ka \in [0; 1]; \\ kv + ka = 1.. \end{cases}, \quad (4.2)$$

де kv , ka – нормалізовані коефіцієнти від 0 до 1 (в сумі дорівнюють одиниці) впливу на інтегрований ризик груп факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно.

На основі показників ризиків дають оперативну (4.1) та інтегральну (4.2) оцінку безпеки конструктивних елементів будівель та споруд.

Таким чином, удосконалений метод оцінки зміни структури середовища внаслідок виникнення спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу. В результаті комплексу досліджень в співпраці з науковцями ІГТМ НАН України за безпосередньої участі автора розроблені і затверджені «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації», які встановлюють методи ідентифікації пошкоджень та тріщинуватості в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, які викликані тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Методичні рекомендації містять: наслідки розвитку процесу руйнуван-

ня та параметри ідентифікації стану будівель та споруд, оцінку пошкодженості конструктивних елементів будівель та споруд віброакустичним методом, інтерпретацію результатів віброакустичної діагностики, визначення комплексних показників оцінки безпеки на базі моделі інтегрованого ризику, а також підвищення якості віброакустичного контролю за рахунок автоматизації ударної дії заданими параметрами.

Методичні рекомендації впроваджені в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області та в навчальному процесі кафедри безпеки життєдіяльності Придніпровської державної академії будівництва та архітектури при викладанні дисципліни «Основи теорії надійності та техногенний ризик» (Додаток Г). Контроль стану будівель і споруд сприяє зниженню ризиків руйнування об'єктів і дозволяє своєчасно провести ремонтні роботи та вжити інші заходи з безпеки.

Результати можуть бути корисними в роботі інженерно-технічних працівників будівельної та гірничої промисловості, співробітників науково-дослідних закладів і навчальних інститутів, фахівців, що створюють безпечні умови при експлуатації будівель і споруд.

Висновки за розділом 4

1. Втрата стійкості бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементів несучих конструкцій може бути м'якою або жорсткою. При м'якій втраті стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які проявляються в поступовому ослабленні несучих конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень. Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості конструктивних елементів або швидкого зростання тріщин, які активізуються раптовим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів внаслідок розривів іржавої арматури, пожеж, хвиль або афтершоків землетрусів, вибухових хвиль.

2. Моделюванням процесу руйнування методом скінченних елементів встановлено, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть

бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель і споруд. Пошкодженість елементів конструкцій відбувається шляхом зростання мережі мікротріщин з формуванням областей непружних деформацій і магістральних тріщин.

3. Для систем віброакустичної діагностики вперше розроблено генератор (синтезатор) механічних гармонічних коливань із заданим частотним спектром на основі програмованого логічного контролера та сервопривода з використанням промислової мережі CANopen та елементів людино-машинного інтерфейсу. Для генерації запуску на однократне виконання функціонального блоку розроблено програмний модуль, що формує додатної імпульс переднього фронту або прямокутний сигнал максимально можливої частоти (постійне оновлення поточного значення завдання).

4. Проведена практична апробація роботи генератора механічних коливань для виробки типових впливів і автоматизації процесу віброакустичного контролю будівель і споруд. Лабораторні випробування пройшли успішно, були згенеровані прямокутний меандр, несиметрична пила, трикутний сигнал та періодичні гармонічні коливання. Встановлено, що генератор забезпечує виконання заданих характеристик, а механізм сервоприводу виконує запрограмоване завдання.

5. Визначено основні завдання методики і параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами. При проведенні моніторингу віброакустичним методом встановлюються межі зон підвищеної тріщинуватості в конструктивних елементах будівель та споруд, які служать, у тому числі, і для уточнення результатів візуальних спостережень та зовнішніх оглядів.

6. У зв'язку з тим, що об'єктом досліджень є часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), то для оцінки пошкодженості об'єктів контролю вперше запропоновано використовувати показник, що відображає інтегральний ризик втрати стійкості конструктивних елементів споруд за двома основними

групами факторів ризику. Перша група пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга група пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Інтегральний ризик втрати стійкості визначається або шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групі, або підсумовуванням ризиків за цими двома факторами:

7. В співпраці з науковцями ІГТМ НАН України за безпосередньої участі автора були розроблені і затверджені «Методичні рекомендації з оцінки пошкоженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації», які встановлюють методи ідентифікації пошкоджень та тріщинуватості в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, що викликані тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Рекомендації впроваджені в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області та в навчальному процесі кафедри безпеки життєдіяльності Придніпровської державної академії будівництва та архітектури при викладанні дисципліни «Основи теорії надійності та техногенний ризик».

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою в галузі цивільної безпеки, у якій дано рішення актуального науково-технічного завдання забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості елементів будівельних конструкцій.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Аналіз сучасного стану проблеми забезпечення стійкості безпеки будівель та споруд при тривалій експлуатації показав, що в умовах старого фонду будівель і великої кількості надзвичайних ситуацій, які активізуються динамічними впливами від вибухів і пожеж, необхідний контроль стійкості та забезпечення безпеки об'єктів з метою оцінки їхньої придатності до подальшої експлуатації. Встановлено, що віброакустичний метод контролю апробований і дозволяє провести неруйнівну оцінку пошкоджень в будівельних конструкціях.

2. Подальший розвиток отримав метод оцінки пошкоджень і тріщинуватості в конструктивних елементах будівель і споруд в умовах надзвичайних ситуацій, які викликані тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж, та відрізняється урахуванням параметрів віброакустичного контролю наслідків процесу руйнування і оцінкою ризиків втрати стійкості споруд, що дозволяє знизити аварійність об'єктів і своєчасно вжити заходи з безпеки.

3. На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль та розмірів дерев'яних, бетонних і металевих конструкцій проведена оцінка матеріалів як коливної системи при ударному впливі. Встановлено закономірності та взаємозв'язок основних віброакустичних параметрів з проявами дефектів та пошкоджень в конструкціях будівель і споруд в залежності від виду матеріалів.

4. Для отримання коливань із заданими амплітудними та частотними характеристиками розроблено нові моделі та алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем, що необхідно для створення збурюючого ударного впливу з потрібними параметрами при віброакустичному контролі.

5. Для керування системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю при віброакустичному моніторингу структури, тріщин та порушень однорідності вперше обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності в обчислювальній схемі за алгоритмом J. Crenshaw.

6. Встановлено, що зниження стійкості будівель та споруд внаслідок випадкових динамічних впливів призводить до хаотизації процесів руйнування. Вперше для віброакустичного контролю внутрішньої пошкодженості будівель і споруд виконано наукове обґрунтування урахування хаотичної складової процесу руйнування, розроблено програмну модель та структурну схему збуджувача віброакустичних коливань в середовищі для математичного моделювання, що описується системами диференціальних рівнянь Е. Лоренца та Х. Чена.

7. Вперше для виробки типових впливів та коливань із визначеними динамічними параметрами в системі віброакустичної діагностики розроблений і апробований в лабораторних умовах програмний модуль та генератор механічних коливань із заданим частотним спектром на основі програмованого контролера та сервопривода, що створює умови для автоматизації процесу контролю будівель і споруд.

8. Моделюванням методом скінченних елементів процесу руйнування стінових конструкцій встановлено, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути визначені візуально, зони прихованої пошкодженості активно розвиваються всередині матеріалу стіни будівлі. Тому для їх безпечної експлуатації вирішальним є не лише візуальний огляд, а й своєчасний віброакустичний контроль прихованої пошкодженості.

9. Вперше для оцінки рівня пошкодженості будівель і споруд внаслідок впливу комплексу негативних факторів при їх експлуатації запропоновано показники, що відображають інтегральний ризик втрати стійкості споруд за двома основними групами небезпечних факторів. Перша група пов'язана з ризиками впливу зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю, друга група – з ризиками впливу прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом, що у сукупності до-

зволяє дати оперативну та інтегральну оцінку безпеки конструктивних елементів будівель та споруд.

10. Розроблені і затверджені «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації», які встановлюють методи ідентифікації пошкоджень в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, обумовлених тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Методичні рекомендації впроваджені в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області, де використовуються для вдосконалення ризик-орієнтованого управління і підтримання прийнятного рівня ризику при експлуатації будівель і споруд, а також в навчальний процес кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури МОН України, де використовуються для підвищення якості підготовки фахівців за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека» (Додаток Г).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kyiv School of Economics (2023), “Over \$54 billion in damage to Ukraine’s housing stock as a result of a full-scale war as of the end of May 2023”, available at: <https://kse.ua> (Accessed 26 June 2023).
2. Evaristus, Hyginus Obinna Ozioko, Hyginus Obinna Ibe & Okechukwu Patrick (2020). Causes, Prevention and Repair of Cracks in Buildings (A Case Study of Chinua Achebe Lecture Theatre in Michael Okpara University of Agriculture, Umudike). *Advances in Engineering Design Technology*. Vol. 2. Pp.1-11.
3. Anitya S. Zanke (2020). Building cracks: causes and preventions. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. Vol. 5. Issue 8. Pp. 165-169. <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2020.v05i08.025>
4. Mr. Shyam Doshi, Kajal Patel, P. Mavani (2018). Methodology for Prevention and Repair of Cracks in Building. *GRD Journal for Engineering*. Vol. 3. Issue 3. Pp. 52-58.
5. Слащов І.М. Оцінка техногенної тріщинуватості методами математичного моделювання / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2010. № 85. С. 239-250.
6. Slashchov I. (2019) Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*. Vol. 109. Pp. 00094. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900094>
7. American concrete institute (2019). Committee 318. Building code Requirement for Structural concrete.
8. Associação brasileira de normas técnicas. NBR 7190 (2022). Projeto de estruturas de madeira.
9. Sundquist, Håkan (2010). Risks and Safety in Building Structures. *Risks in Technological Systems*. Pp 47-68. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-641-0_5.
10. Schlaich, J., & Reineck, K. H. (1993). Die Ursache für den Totalverlust der Betonplattform Sleipner A. *Beton-und Stahlbetonbau*, no. 88(1), pp. 1-4.

11. By Eric Jaffe Running the Numbers on Amtrak's \$689 Million Worth of Sandy Damage (October 6, 2014) <https://www.bloomberg.com/news/articles/2014-10-06/running-the-numbers-on-amtrak-s-689-million-worth-of-sandy-damage>
12. Earthquake damages masonry buildings <https://theconstructor.org/earthquake/earthquake-damages-masonry-buildings/36506/>
13. Станкевич П. М. Особливості нарахування зносу основних засобів в обліку бюджетних установ // Вісник соціально-економічних досліджень. 2011. № 3. С. 280-284.
14. Шкрабик Йосип. Своєчасне обстеження сучасного житла в сьогоденні // Просторовий розвиток. 2023. № 4. С. 134-140.
15. Постанова КМУ «Про затвердження Порядку проведення обстеження прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва» (Редакція від 11.04.2022, підстава - 423-2022-п). № 257 від 12 квітня 2017 р. КМУ. Київ.
16. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 8 с.
17. Квітковський Ю.В. Визначення параметрів ударної хвилі, що утворюється під час вибуху газоповітряної суміші // Проблеми надзвичайних ситуацій: Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 4. Харків: УЦЗУ, 2006. 288 с.
18. Шимановський О. В. Особливості забезпечення будівель та інженерних споруд при терористичних нападах // Промислове будівництво та інженерні споруди. 2018. № 4. С. 2-11.
19. Рябінін І.М. Фактори, які впливають на характер руйнувань при аварійних вибухах в приміщеннях // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2013. № 18. С. 210-216.
20. Скорук Л., Журавський О. Визначення величини навантаження на захисні споруди цивільного захисту від впливу ударної хвилі згідно ДБН В. 2.2-5: 2023 // Просторовий розвиток. 2024. № 7. С. 286-296.

21. Гетун Г., Колякова В., Безклубенко І., Соломін А. Конструктивні рішення вибухостійких будівель з приміщеннями цивільного захисту населення. Будівельні конструкції // Теорія і практика. 2023. № 13. С. 41–50.

22. Шимановський О.В. Особливості убезпечення будівель та інженерних споруд при терористичних нападах // Промислове будівництво та інженерні споруди. 2018. № 4. С. 2-11.

23. Ahmed K. Taha, A. Osman, M. S. Zahran (2023). Review of Blast Waves Analysis, Design, Structural and Materials Responses. *Open Journal of Safety Science and Technology*. Vol. 13. Pp. 27-50. <https://doi.org/10.4236/ojsst.2023.132002>

24. Deepthi Nambiar A., & Lokesh, J.K. (2019). Analysis of Reinforced Concrete Structure Subjected to Blast Load. *International Journal of Current Engineering and Technology*. Vol. 7. Issue 5. Pp. 2695-2714. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.5448>

25. Zuev, P.I. (2021). Seismic safety of buildings and structures during iron ore mining. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 723. Pp. 052038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/5/052038>

26. Isaac, O., Alshammari, O., Pickering, E. G. & Clarke, S. (2022). Blast wave interaction with structures -An overview. *International Journal of Protective Structures*. Vol. 14(3). Pp. 1-47. <https://doi.org/10.1177/20414196221118595>

27. Gabriel, S., Denny, J., Yuen, S.C.K, Langdon G.S. & Govender R.A. (2023). The Effect of Scaling Building Configuration Blast Experiments on Positive Phase Blast Wave Parameters. *Appl. Sci*. Vol. 13(10). Pp. 5956. <https://doi.org/10.3390/app13105956>

28. Singh, R. & Bano P. (2022). Prediction of Blast Loading and its Impact on Buildings. *International Journal of Research Publication and Reviews*. Vol 3. no. 7. Pp. 3162-3165.

29. Fouchier, C., Laboureur, D., Youinou, L. et al. (2017). Experimental investigation of blast wave propagation in an urban environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 49. Pp. 248–265. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.06.021>

30. Gebbeken, N., Warnstedt, P. & Rüdiger, L. (2017). Blast protection in urban areas using protective plants. *International Journal of Protective Structures*. Vol. 9(2). Pp. 226–247. <https://doi.org/10.1177/2041419617746007>
31. Jin, M., Hao, Y. & Hao, H. (2019). Numerical study of fence type blast walls for blast load mitigation. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 131. Pp. 238–255. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.05.007>
32. Sung, S.H. & Chong, J.W. (2020). A fast-running method for blast load prediction shielding by a protective barrier. *Defence Technology* Vol. 16(2). Pp. 308–311. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.07.011>
33. Sandhu, I.S., Sharma, A., Singh, M.K., Kumari, R., Alegaonkar, P.S. & Saroha, D. (2017). Study of Blast Wave Pressure Modification through Rubber Foam. *Procedia Engineering*. Vol. 173, Pp. 570-576. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.099>
34. Chyrva, T. , Martynov, V., Koliakova, V., & Chyrva, V. (2022). A the influence of blasting on buildings and constructions. *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*. Vol. 10. Pp.143–149. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.143-149>
35. НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» (зі змінами від 01.03.2023). Міністерство внутрішніх справ. Київ. (Нормативний акт з пожежної безпеки).
36. Хілько Ю.В., Тригуб В.В., Грицина І.М. Моделивання безпечної евакуації людей з висотних будівель при пожежі // Науковий вісник будівництва. 2017. № 4 (90). С. 267-271.
37. Titi, A., Biondini, F. (2014). Probabilistic seismic assessment of multistory precast concrete frames exposed to corrosion. *Bull Earthq Eng*. Vol. 12 (6). Pp. 2665-2681. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9620-2>
38. Національний стандарт України «Захист металевих конструкцій від корозії Вимоги до проектування» ДСТУ Б В.2.6-193:2013 (2013) Видання офіційне. Київ. Мінрегіон України.
39. СНіП 2.03.11-85. Захист будівельних конструкцій від корозії. Дата введення 1986-01-01 (Постанова від 30.08.1985 № 137).

40. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги Дата введення 2011-07-01 (Наказ від 26.10.2010 № 416).

41. ISO 12944. Standard Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems (2018 edition).

42. Rodriguez, Lorena & Balsera, Joaquín & Ortega-Fernández, Francisco & Rodriguez-Perez, Fernando. (2018). *Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review. Metals*. No. 8. Pp. 334. <https://doi.org/10.3390/met8050334>

43. Al-Sherrawi, Mohannad & Lyashenko, Vyacheslav & Edaan, Esraa & Sotnik, Lana. (2018). *Corrosion as a Source of Destruction in Construction. International Journal of Civil Engineering and Technology*. No. 9. Pp. 306-314.

44. Болотов Ю.К., Тарасюк В.Г. Основні положення проекту будівельних норм Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах // Наука та будівництво. 2016. № 3. С. 39-44.

45. Сайовський В.В., Соловей Д.А., Овчинніков О.Е. Особливості виконання робіт з закріплення ґрунтів підстави в умовах реконструкції будівель / *Нові технології в будівництві: Мат. II Міжнар. конф.* К. 2017. №32. С. 13-18.

46. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану.

47. ДСТУ EN ISO 12782-4:2022 Якість ґрунту. Параметри для геохімічного моделювання вимивання та специфікації складових у ґрунтах і матеріалах. Частина 4. Екстракція гумінових речовин із твердих зразків.

48. Erkal, A., D'Ayala, D., & Sequeira, L. (2012). Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials. *Building and Environment*. Vol. 57. Pp. 336-348.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.05.004>

49. Zeng S, Zhang J, Zhang H, Li R, Ao T, Cao K. (2024). Experimental Study on Erosion Modeling of Architectural Red Sandstone under the Action of the Natural Environment. *Buildings*. Vol. 14(4). Pp. 1168.

<https://doi.org/10.3390/buildings14041168>

50. Xu J, Li T, Zhan M, Chen X, Xu F, Wang S. (2022) Study on Erosion Characteristics and Mechanisms of Recycled Concrete with Tailings in Salt Spray Environments. *Buildings*. Vol. 12(4). Pp. 446.

<https://doi.org/10.3390/buildings12040446>

51. Григоровський П.Є., Чуканова Н.П., Мурасьова О.В. Аналіз факторів, що впливають на термін життя будівлі в процесі експлуатації // *Web of Scholar*. 2018. Т. 1. № 2. С. 75-82.

52. Novoselova I., Petrov K., Kalugyan K. (2023). Organizational and technological approaches to assessing the safety of buildings affected by emergencies. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. Vol. 431. Pp. 06020.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343106020>

53. Григоровський П.Є., Косолап Л.О., Чуканова Н.П. Вплив моніторингу технічного стану на життєвий цикл будівель // *Нові технології в будівництві*. 2012. №. 1. С. 18-26.

54. Барабаш М.С., Гензерський Ю.В., Покотило Я.В. Методи мінімізації ймовірності прогресуючого руйнування висотної будівлі при дії сейсмічних навантажень // *Нові технології в будівництві*. 2011. №. 1. С. 17-22.

55. Терентьев О.О., Шабала Є.Є., Малина Б.С. Інформаційна технологія системи діагностики технічного стану будівель на основі дослідження мікро-сейсмічних коливань // *Управління розвитком складних систем*. 2015. №. 23 (1). С. 133-139.

56. Григоровський П.Є., Чуканова Н.П. Вибір раціональних методів моніторингу технічного стану будівельних конструкцій з використанням функцій корисності // *Нові технології в будівництві*. 2014. №. 27-28. С. 21-28.

57. Єременко Б.М. Застосування експертних знань для формування бази знань системи оцінювання технічного стану будівельних конструкцій // *Наука та будівництво*. 2017. №. 4. С. 63-69.

58. Хохлін Д.О. Оцінка технічного стану будівельних конструкцій та споруд згідно з проектом ДСТУ Б В. 1.2-№: 201Х «Обстеження і паспортизація те-

хнічного стану будівель та інженерних споруд» // Комунальне господарство міст. 2012. №. 105. С. 140-146.

59. Костира Н., Бакуліна В. Особливості технічного обстеження об'єктів прилеглих до існуючої забудови // Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2023. №. 12. С. 105-114.

60. Аналіз сучасних методів проведення технічного обстеження будівель та споруд // Білошицька Н., Татарченко З., Ревека А., Лобко Д. / Містобудування та територіальне планування. 2022. №. 79. С. 45-56.

61. Interagency Committee on Seismic Safety in Construction (ICSSC) (2022) *Standards of Seismic Safety for Existing Federally Owned and Leased Buildings: ICSSC Recommended Practice 10 (RP 10-22)*. (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD), NIST Interagency Report (IR) NIST IR 8458e2022.

62. Шатов С.В., Богаченко С.В. Аналіз методів моніторингу технічного стану будівельних конструкцій та законодавчих і нормативних документів // Український журнал будівництва та архітектури. 2023. №. 6 (018). С. 136-142.

63. Umanets I., Basarab V. Моніторинг технічного стану будівель та споруд в умовах експлуатації // Ways to Improve Construction Efficiency. 2023. Т. 1. №. 51. С. 194-205. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).194-205](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).194-205)

64. Zhang, S., Liu, Y. & Li, S. (2022). A Brief Method for Rapid Seismic Damage Prediction of Buildings Based on Structural Strength. *Buildings*. Vol. 12(6). Pp. 783. <https://doi.org/10.3390/buildings12060783>

65. Білокур І. П. Акустичний контроль: Навчальний посібник. К.: ІЗМН, 1997. 244 с. ISBN 5-7763-9230-7.

66. Ланге Ю.В. Низькочастотні акустичні методи та засоби неруйнівного контролю багатошарових конструкцій // Контроль. Діагностика. 2004. №2. С. 39-46.

67. Smith R. A., Jones L. D., Zeqiri B., and Hodnett M.(1998). Ultrasonic C scan standardization for fiber-reinforced polymer composites – minimizing the uncertainties in attenuation measurments. *Insight – journal of british institute of NDT*. 40p.

68. Моделювання та контроль динамічних процесів в задачах оцінки стану геотехнічних систем: монографія / Іконнікова Н.А., Корсун В.І. та ін.; МОН України, Нац. гірн. ун-т. Дніпропетровськ: НГУ, 2015. 279 с.

69. Шевченко В.Г., Слащов А.І. Інформаційні системи безпеки і продуктивності підземних гірничих робіт. Київ: Наукова думка, 2018. 285 с.

70. Slashchov A., Slashchov I., Siromaschenko I., Kurinnyi V. and Ikonnikov M. (2020). Development of digital technologies for the systems of remote mining safety monitoring. *E3S Web of Conferences*. Vol. 168. Pp. 00065.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800065>

71. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. (2022) Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 970. Pp. 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>

72. Slashchov A., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. (2023) Forecast of the mine workings destruction risks by the radiometric control method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1156. Pp. 012033.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012033>

73. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V. and Kulbach A. (2023) Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1156. Pp. 012015.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012015>

74. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. (2020) Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources : 3rd International Sci. and Tech. Conf.* Book of Abstracts. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.

75. Булат А. Ф., Усаченко Б. М., Яланський А. А. та ін. Методичний посібник з комплексної геофізичної діагностики породного масиву та підземних геотехнічних систем. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2004. 75 с.

76. Керівництво з геофізичної діагностики стану системи «кріплення - породний масив» вертикальних стволів: Додаток до «Керівництво по відновленню

кріплення та армування вертикальних стволів. РД 12.18.073-88 »/ А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, А.А. Яланський та ін: Д.: «Лебідь», 1999. 42 с.

77. Donald J. Nefske Shung H. Sung Stephen A. Hambric (2022) *Engineering Vibroacoustic Analysis: Methods and Applications*. John Wiley and Sons. 528 p.

78. Yalanskyi A., Slashchov I., Makeiev S. and Seleznev A. (2022) New technical solutions in the field of protection and fastening of mine workings. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* Vol. 970. Pp. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012015>

79. Flegner P and etc. (2014) Measurement and processing of vibro-acoustic signal from the process of rock disintegration by rotary drilling. *Measurement*. Vol. 56. Pp. 178-193. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.06.025>

80. Яланський А.О. Спектральний аналіз геофізичних сигналів, що представлені файлами графічних форматів // Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 1998. № 4. С. 154-158.

81. Білокур І. П. Елементи дефектоскопії при вивченні неруйнівного контролю. К.: НМК ВО, 1990. 252 с.

82. Бєліков А.С., Барабанов С.С. Розробка алгоритмів керування віброакустичним коливаннями для оцінки безпеки споруд критичної інфраструктури // Вісті Донецького гірничого інституту. 2024. № 1. С. 7-14.

83. Miele S, Karve PM, Mahadevan S, Agarwal V. (2022) Diagnosis of internal cracks in concrete using vibro-acoustic modulation and machine learning. *Structural Health Monitoring*. Vol. 21(5). Pp. 1973-1991. <https://doi.org/10.1177/14759217211047901>

84. Оцінка хаотичності процесів, що відбуваються в гірничих технічних системах, особливості управління та використання / Яланський А.А., Слащов І.М., Яланський О.А., Іконнікова Н.А., Цикра О.А. // Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2010. № 91. С. 159-172.

85. Kesheng Wu, Kiang Zhang. (2013) Global dynamics of the generalized Lorenz systems having invariant algebraic surfaces. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. Vol. 244(1). Pp. 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2012.10.011>

86. Франчук, В.П., Анциферов, О.В., Дуганець В.І. Зусилля у приводі вертикального млина. // Геотехнічна механіка. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2016. № 131. С. 100–107.
87. Франчук, В.П. Принципи приведення технологічного навантаження до системи з дискретними параметрами. Вібрації в техніці та технологіях. 2011. № 4 (64). С. 5-11.
88. Jack Crenshaw. (2000) Math Toolkit for Real-Time Development. Taylor & Francis. 466 p. <https://doi.org/10.1201/9781482296747>
89. Закон України «Про критичну інфраструктуру» (1882-IX від 16.11.2021), набрав чинності 15.06.2022.
90. Закон України «Про будівельні норми» (Редакція від 09.06.2022, підстава - 2254-IX), Відомості Верховної Ради України, 2010, № 5, ст.41.
91. Постанова КМУ № 1109 від 09.10.2020 «Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури» із змінами, набула чинності 31.12.2021.
92. Yalanskyi O.A., Bielikov A.S., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. (2023) Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*. № 2 (53). Pp. 101-109. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109>
93. Sheriff R.E., Geldart L.P. (2012) Exploration Seismology: 2nd edition. Cambridge University Press. Online publication date: June 2012. P. 592.
94. Горобець Ю.І. Фрактальна геометрія у природознавстві: Навчальний посібник / Ю.І. Горобець, А.М. Кучко, І.Б. Вавилова. К.: Наук. думка, 2008. 232 с. ISBN 9789660006829.
95. Malick K., Marcq P. (2003) Stability analysis of noise-induced Hopf bifurcation. *Eur. Phys. J.B*. Vol. 36. Pp.119-128. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2003-00324-y>
96. Говоруха В.В. Механіка взаємодії рейкового шляху, рухомих транспортних засобів та суміжних пристроїв. Дніпропетровськ: Ліра, 2006. 448 с. ISBN 9789663830346.

97. Ідентифікація факторів ризиків втрати стійкості гірничих виробок / Слащов І.М., Слащова О.А., Осінній В.Я., Сапунова І.О., Константинова І.Б. // Геотехнічна механіка. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 209-222.

98. Lorenz E.N. (1963) Deterministic nonperiodic flow. *Atmos Sciences*. Vol. 20. Pp. 130-141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2)

99. Chen Haibo, Liu Yirong, Zeng Xianwu (2005) Center conditions and bifurcation of limit cycles at degenerate singular points in a quantic polynomial differential system. *Bull. sci. math.* Vol 2. Pp. 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.bulsci.2004.09.004>

100. Беліков А.С., Барабанов С.С. Контроль пошкодження конструктивних елементів будівель і споруд для зниження операційних та екологічних ризиків // Архітектура, Будівництво: тези допов. XX Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of solving global problems of humanity» (20-22 травня 2024 р.). Афіни, Греція, 2024. С. 27-29.

101. Azimi M., Eslamlou A., Pekcan G. (2020) Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: state-of-the-art review. *Sensors*. Vol. 20(10). Pp. 2778. <https://doi.org/10.3390/s20102778>

102. Wegerich S.W. (2004) Similarity based modeling of time synchronous averaged vibration signals for machinery health monitoring. In *IEEE aerospace conference proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720)*, Big Sky, MT, USA. 3-6 March 2004. Vol. 6. Pp. 3654-3662. <https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368182>

103. Обґрунтування вихідних параметрів для моделювання геомеханічних процесів в задачах оцінки безпеки підтримання гірничих виробок / А.О. Яланський, І.О. Сапунова, А.І. Слащов, Л.А. Новіков, // Геотехнічна механіка. Д., 2014. № 119. С. 282-295.

104. O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu (2013) The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-1-85617-633-0. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24909-9>

105. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. (2022) Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 970. Pp. 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>
106. Slashchov I. (2019) Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. *E3S Web of Conferences*. Vol. 109. Pp. 00094.
107. Bondarenko V. et al. (2016) Numerical methods of geomechanics tasks solution during coal deposits' development. *Mining of mineral deposits*. No. 10. Iss. 3. Pp. 1-12.
108. Міжнародний стандарт ISO 21929-1 «Стійкість в будівництві – індикатори стійкості». Частина 1: Платформа розробки індикаторів і базового набору індикаторів для будівель. Номер документу ISO 21929-1:2011(E).
109. Яворська О.О., Барабанов С.С. Ідентифікація прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд для зниження ризиків їх руйнування // Український журнал будівництва та архітектури. Дніпро: ПДАБА, 2024. № 2 (020). С. 116-125.
110. Singh A.K., Chen B., Tan V.B., et al. (2017) A theoretical and numerical study on the mechanics of vibro-acoustic modulation. *The J Acoust Soc America*. Vol. 141(4). Pp. 2821-2831.
111. Karve P., Miele S., Neal K., et al. (2020) Vibro-acoustic modulation and data fusion for localizing alkali–silica reaction–induced damage in concrete. *Struct Heal Monit*. Vol. 19. Pp. 1905-1923.
112. Ідентифікація геомеханічних та геотехнічних структур віброакустичним методом для систем автоматизованого контролю стійкості наземних споруд та гірничих виробок / Яланський О.А., Беліков А.С., Барабанов С.С., Слащова О.А., Іконніков М.Ю. // Вісті Донецького гірничого інституту. 2023. № 2 (53). С. 101-109.
113. Яланський О.А., Барабанов С.С. Оцінка пошкоджень конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом // Науковий вісник ДонНТУ. 2024. № 1. С. 8-17.

114. Яланський О.А., Барабанов С.С. Генератор механічних коливань із заданими спектральними параметрами для вібраційних машин та діагностичного устаткування з прямим електричним приводом / Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: тези допов. XXI Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів (16-17 травня 2024 р.). Кременчук: КНУ, 2024. https://esmo.kdu.edu.ua/publ/progr_ESMO2024.pdf.

115. Беліков А.С., Барабанов С.С. Апробація в лабораторних умовах збуджувача коливань для віброакустичного контролю безпеки будівель і споруд / Безпека життєдіяльності в XXI столітті: тези допов. XX Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції (17-18 квітня 2024 р.). Дніпро: ПДАБА, 2024. С. 97-98. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/12712>

116. Керування ризиками в гірничодобувній діяльності : монографія / Г.Г. Півняк, М.М. Табаченко, Р.О. Дичковський, В.С. Фальштинський ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2015. 288 с.

117. Булат А.Ф., Слащова О.А., Слащов І.М., Стаднійчук М.М. Обґрунтування методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2020. № 150. С. 176-187.

118. Цопа В. Ризик-орієнтоване мислення: основи, навчання та впровадження. Частина І. Охорона праці. 2017. № 8. С. 35-47.

119. Ергономіка керування професійними ризиками / О.О. Яворська, М.М. Архірей, О.П. Шароватова, О.М. Боровицький // Комунальне господарство міст. 2022. Том 6. Випуск 173. С.170-177.

120. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018). [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 28 с.

121. Управління ризиком травматизму на виробничих підприємствах / О.Є. Кружилко, В.В. Майстренко, К.Н. Ткачук, О.І. Полукаров // Проблеми охорони праці в Україні. 2013. Вип. 26. С. 3-9.

ДОДАТКИ

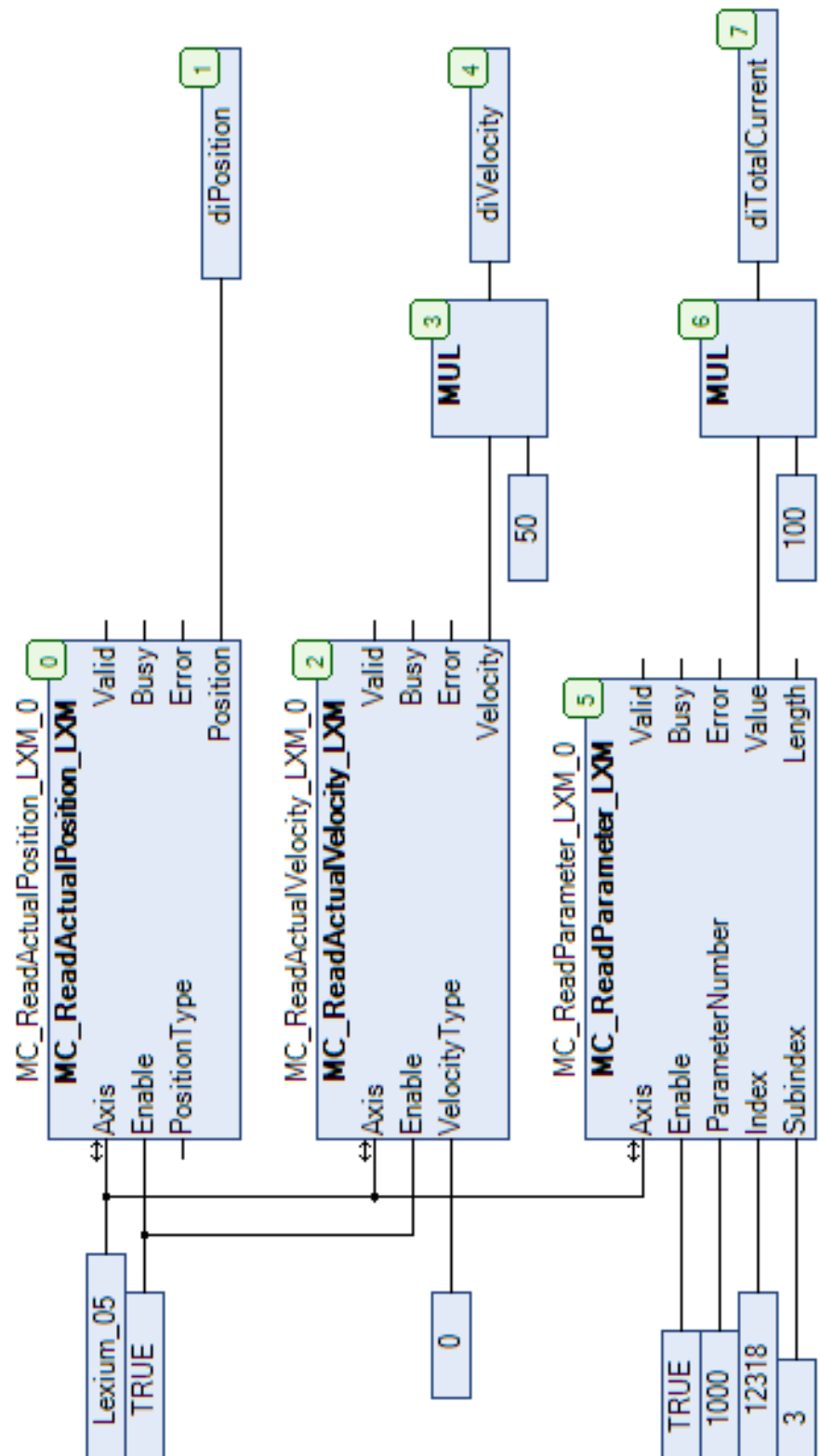
Додаток А Таблиця призначення даних програмного генератора

А1 Перелік типів даних, констант та змінних програмного генератора із заданим спектром коливань

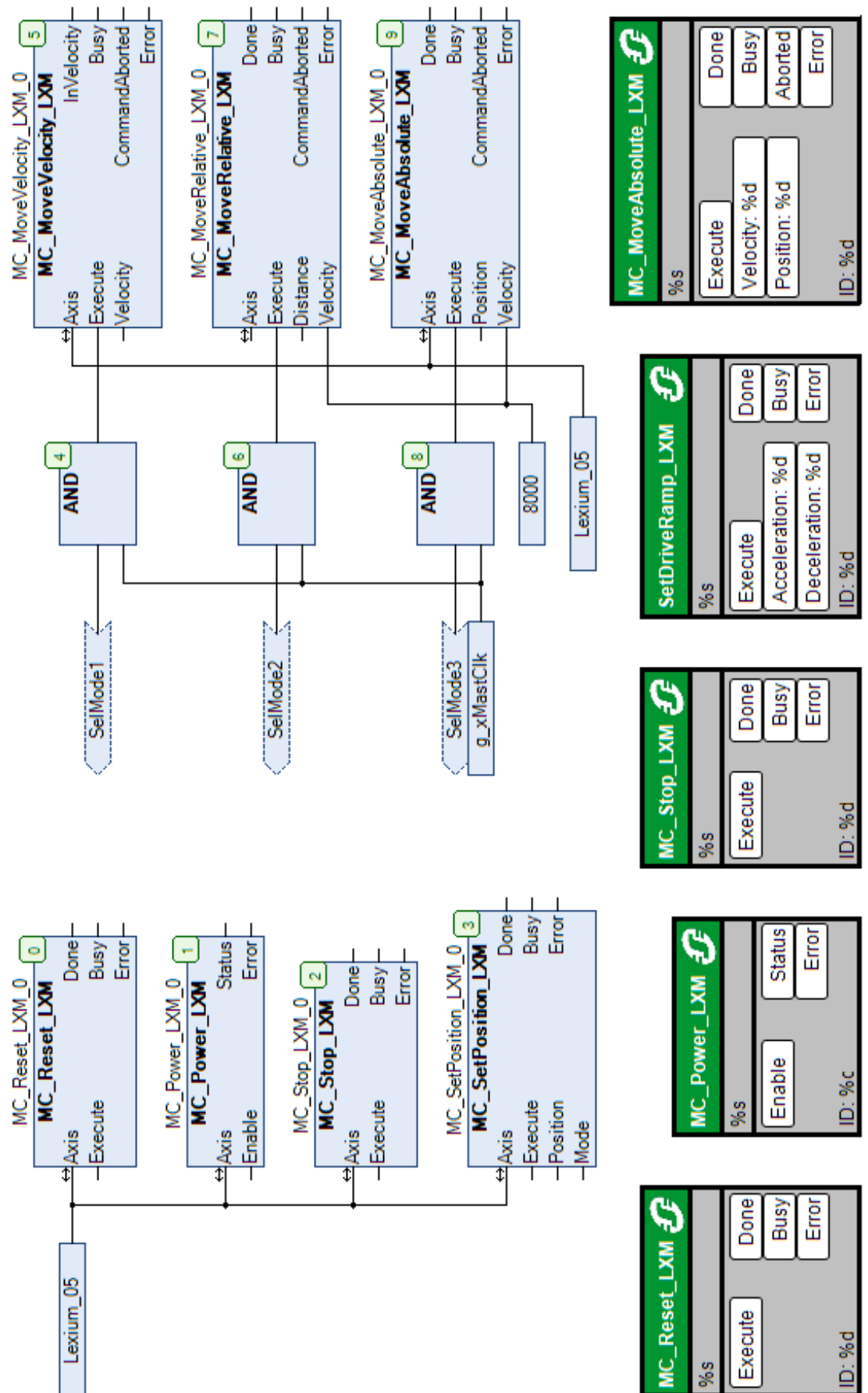
Приналежність	Зона (Scope)	Ім'я	Тип даних	Початкове значення	Призначення
Application	VAR_GLOBAL CONSTANT	Gc_rPi	REAL	3.141592653589	Математична константа число π
	VAR_GLOBAL	G_xMastClik	BOOL	FALSE	Тактовий сигнал частотою 0,5 частоти сканування MAST задачі
	VAR_GLOBAL	G_rDiscTime	REAL	0	Поточне значення дискретного часу
	VAR_GLOBAL	G_rDeLT	REAL	0.01	Крок дискретизації за часом або період часу (визначає частоту першої гармоніки)
	VAR_GLOBAL	G_xDiscTimeLnch	BOOL	FALSE	Сигнал запуску відліку дискретного часу
POU_SqMeander	VAR_INPUT	Enable	BOOL	FALSE	Дозвіл роботи (активний рівень TRUE)
	VAR_INPUT	TimeLow	TIME	T#0.5S	Тривалість паузи (0 на виході)
	VAR_INPUT	TimeHigh	TIME	T#0.5S	Тривалість імпульсу (значення амплітуди на виході)
	VAR_INPUT	MeanderAmp	INT	0	Амплітуда меандру
	VAR_OUTPUT	Meander	INT	0	Меандр із заданими параметрами
	VAR	BLINK_0	BLINK	-	Функціональний блок генератора меандру
	VAR_INPUT	HarmAmp	ARRAY [1..16] OF INT	[16(0)]	Амплітуди гармонічних складових
POU_HarmSynth	VAR_INPUT	HarmPh	ARRAY [1..16] OF INT	[16(0)]	Початкові фази гармонічних складових
	VAR_OUTPUT	HarmSynth	REAL	0	Вихідний синтезований сигнал
	VAR	uiCounter	UINT	-	Лічильник циклів

Додаток Б Лістинги програмних блоків апробації генератора механічних коливань для автоматизації засобів віброакустичного контролю

Б1 Програмна реалізація зчитування поточних керованих величин та інших координат електропривода за індексною адресацією



Б2 Програмна реалізація конфігурування функцій, керування рухом електропривода та елементи системи візуалізації



Додаток В Приклад форми подання узагальнюючих результатів з віброакустичної діагностики

Найменування будівлі або споруди:

будівля спорткомплексу на вул. Заводський, 10.

Об'єкт контролю: *нижня частина будівлі (фундамент та низ стіни).*

Апаратура: *індикатор ІСП-1.*

Інформативний параметр: *амплітуда коливань.*

Конфігурація точок виміру: *сітка 1 м × 1 м.*

Дата виконання вимірювань	Відстань від поверхні, м	Матеріал будівлі або споруди	Матеріал основи, породи закріпного простору	Виявлені дефекти	Координати дефекту від нульової точки відліку
10.03.2024	фундамент +0,2 м	залізобетон 0,5 м	пісковик	пустота	$h = 0 \dots 0,4\text{м};$ $l = 5 \dots 7,6\text{м}.$
10.03.2024	фундамент +0,2 м	залізобетон 0,5 м	пісковик	тріщина	$h = 0,5 \dots 2\text{м};$ $l = 14,2\text{м};$ $\alpha = 30^\circ.$
10.03.2024	стіна +1,2 м	шлакобетон 0,4 м	залізобетон	заколи в шлакобетоні	$h = 1 \dots 1,4\text{м};$ $l = 16\text{м}.$

Відповідальний за виконання вимірів _____ (К. Барабанов)

(Прізвище, підпис)

Додаток Г Титульні листи, анотації та зміст методик, рекомендацій, довідок, актів, протоколів

Г1 Титульний лист, анотація та зміст Методичних рекомендацій з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Придніпровської державної
академії будівництва та
архітектури МОН України,
доктор технічних наук, професор



Владислав ДАНИШЕВСЬКИЙ

26.8 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з наукової роботи
Інституту інженерної технічної механіки
ім. М.С. Мудровського НАН України,
доктор технічних наук,
член-кореспондент НАН України



Олександр КРУКОВСЬКИЙ

08 » 01 2024 р.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд
віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації

Професор кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки ПДАБА
МОН України,
д.т.н., проф. Беліков А.С.

Завідувач відділу Дніпропетровського
НДЕКЦ Міністерства внутрішніх справ
України Харченко В.В.

Аспірант
Барабанов С.С.

Старший науковий співробітник
відділу ПРРВГ ІГТМ НАН України,
к.т.н., с.н.с. Слащова О.А.

Провідний науковий співробітник
відділу МГП ІГТМ НАН України
д.т.н. с.н.с. Паламарчук Т.А.

Старший науковий співробітник
відділу ПРРВГ ІГТМ НАН України
к.т.н. с.н.с. Новіков Л.А.

Доцент кафедри електропривода
НТУ «Дніпровська політехніка»,
к.т.н., доц. Яланський О.А.

УДК 622.831.31 : 622.112.3

Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації. Дніпро: ІГТМ НАН України, ПДАБА, 2024.

Methodological recommendations for assessing damage to structural elements of buildings and structures using the vibroacoustic method to ensure the safety of their operation. Dnipro: IGTM of the NASU, PSACEA, 2024.

Методичні рекомендації встановлюють методи ідентифікації пошкоджень та тріщинуватості в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, які викликані тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Контроль стану будівель і споруд сприяє зниженню ризиків руйнування об'єктів і дозволяє своєчасно провести ремонтні роботи та вжити інші заходи з безпеки.

Методичні рекомендації розроблені в результаті комплексу науково-дослідних робіт з ідентифікації спостережуваних і прихованих систем тріщин в будівлях і спорудах з використанням віброакустичного контролю, які виконані в співпраці фахівців кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури МОН України і НДЕКЦ Міністерства внутрішніх справ України (спільна наукова діяльність щодо методичного забезпечення з безпеки будівель і споруд, лекції та семінари за темою, виконавці д.т.н. Беліков А.С, завідувач відділу НДЕКЦ МВС України Харченко В.В., асп. Барабанов С.С.), дослідників відділів ПРРВГ та МГП Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (спільна наукова діяльність щодо методики віброакустичного контролю, розділ теми «Розробка метода управління геотехнічною системою «породний масив-гірничі виробки» з урахуванням факторів ризику», виконавці д.т.н. Паламарчук Т.А., к.т.н. Слацова О.А., к.т.н. Новіков Л.А.) і кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка» (спільна наукова діяльність щодо методичного забезпечення і проведення лабораторних досліджень, виконавець к.т.н. Яланський О.А.). Результати опубліковані в сумісних статтях в фахових наукових виданнях та схвалені на міжнародних конференціях.

Методичні рекомендації можуть бути корисними в роботі інженерно-технічних працівників гірничої та будівельної промисловості, наукових співробітників науково-дослідних закладів і навчальних інститутів, фахівців, що створюють безпечні умови при експлуатації будівель і споруд.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Фактори та наслідки розвитку процесу руйнування будівель і споруд.....	4
2 Параметри ідентифікації стану будівель і споруд	5
3 Задачі методики контролю конструктивних елементів будівель і споруд	6
4 Оцінка пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом.....	6
4.1 Основні положення і параметри віброакустичного методу	6
4.2 Передумови до застосування методу.....	7
4.3 Схеми віброакустичного контролю пошкодження конструктивних елементів будівель та споруд	7
4.4 Оцінка пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд	8
4.5 Інтерпретація результатів віброакустичної діагностики.....	10
5 Визначення комплексних показників оцінки безпеки на базі моделі інтегрованого ризику.....	11
6 Підвищення продуктивності та якості віброакустичного контролю за рахунок автоматизації ударної дії з заданими параметрами	13
7 Приклад форми подання узагальнюючих результатів з віброакустичної діагностики.....	15
Джерела	15

Г2 Акт впровадження результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських та технологічних робіт

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник начальника
Головного Управління Державної служби
з надзвичайних ситуацій України
у Дніпропетровській області



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора наукової роботи
Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, доктор технічних наук,
член-кореспондент НАН України



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських та технологічних робіт

Даним актом підтверджується, що результати роботи з ідентифікації спостережуваних і прихованих систем тріщин в будівлях і спорудах з використанням віброакустичного контролю, та результатів досліджень розділу теми «Розробка метода управління геотехнічною системою «поронний масив-гірничі виробки» з урахуванням факторів ризику», які виконані в співпраці дослідників Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, фахівців кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури та кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України, Дніпропетровського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України,

які виконувались з 2023 по 2024 рр. (виконавці д.т.н. Беліков А.С., к.т.н. Слащова О.А., д.т.н. Паламарчук Т.А., к.т.н. Яланський О.А., зав. відділу НДЕКЦ МВСУ Харченко В.В., к.т.н. Новіков Л.А., асп. Барабанов С.С.),

впроваджені в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області

(найменування підприємства, де здійснюється впровадження)

1. Вигляд впроваджених результатів: методичні рекомендації.
2. Характеристика масштабу застосування: одиничне.
(унікальне, одиничне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження

Методика (метод) «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації».

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт якісно нові.
(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікації, модернізація старих розробок)
5. Впроваджені в процеси аналізу безпеки та ризиків втрати стійкості будівель і споруд.
(дільниця, цех, процес)

6. Ефективність

Методичні рекомендації встановлюють методи ідентифікації пошкоджень та тріщинуватості в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, які викликані тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Контроль стану будівель і споруд сприяє зниженню ризиків руйнування об'єктів і дозволяє своєчасно взяти заходи з безпеки.

(від впровадження)

7. Об'єм впровадження: початковий рівень.

8. Соціальний та науково-технічний ефект

Вдосконалення ризик-орієнтованого управління, підтримання прийнятного рівня ризику при експлуатації інфраструктурних об'єктів, в ролі яких можуть виступати виробничі цехи, споруди, тунелі та інше, а також житлові будинки і комплекси допоміжних будівель та споруд.

Від ПДАБА МОН
України д.т.н., проф.
Беліков А.С.

Від ІГТМ НАН Украї-
ни к.т.н., с.н.с.
Слащова О.А.

Від НДЕКЦ МВС
України зав. відділу
Харченко В.В.

Від НТУ ДП МОН
України к.т.н., доц.
Яланський О.А.

ГЗ Довідка про використання результатів роботи з ідентифікації спостережуваних і прихованих систем тріщин в будівлях і спорудах з використанням віброакустичного контролю

ДОВІДКА

про використання результатів роботи з ідентифікації спостережуваних і прихованих систем тріщин в будівлях і спорудах з використанням віброакустичного контролю

В рамках виконання роботи з ідентифікації спостережуваних і прихованих систем тріщин в будівлях і спорудах з використанням віброакустичного контролю та розділу науково-дослідної теми ІГТМ НАН України «Розробка метода управління геотехнічною системою «породний масив-гірничі виробки» з урахуванням факторів ризику» в співпраці з фахівцями кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки ПДАБА МОН України та кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України проведені комплексні дослідження і розроблені «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації» (виконавці д.т.н. Беліков А.С., к.т.н. Слащова О.А., д.т.н. Паламарчук Т.А., к.т.н. Яланський О.А., зав. відділу НДЕКЦ МВСУ Харченко В.В., асп. Барабанов С.С., к.т.н. Новіков Л.А.). Методичні рекомендації містять технологію моніторингу, визначення та оцінки ризиків небезпеки втрати стійкості будівель і споруд внаслідок накопичення до критичного рівня внутрішніх пошкоджень з використанням метода віброакустичного контролю.

Методичні рекомендації, що були розроблені за результатами досліджень, використовуються у навчальному процесі для підвищення якості підготовки фахівців в області контролю пошкодженості елементів конструкцій будівель і споруд в умовах активізації руйнувань внаслідок впливів ударних хвиль і пожеж.

Придніпровська державна академія
будівництва та архітектури МОН України,
доктор наук з державного управління,
професор, проректор з навчально-виховної роботи

08.01.2024р
дата



[Handwritten signature]
підпис

Євсєєва Г.П.

Додаток Д Наукові праці здобувача, які відображають основні результати дисертації

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Ідентифікація геомеханічних та геотехнічних структур віброакустичним методом для систем автоматизованого контролю стійкості наземних споруд та гірничих виробок / Яланський О.А., Беліков А.С., Барабанов С.С., Слащова О.А., Іконніков М.Ю. // Вісті Донецького гірничого інституту. 2023. № 2 (53), С. 101-109. (Особистий внесок – проведення аналітичних та лабораторних досліджень; встановлення взаємозв'язків параметрів; обробка даних).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109>.

2. Беліков А.С., Барабанов С.С. Розробка алгоритмів керування віброакустичним коливаннями для оцінки безпеки споруд критичної інфраструктури // Вісті Донецького гірничого інституту. 2024. № 1. С. 7-14. (Особистий внесок – проведення аналітичних та лабораторних досліджень; розробка методів і алгоритмів для отримання коливань із заданими характеристиками).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-7-14>.

3. Яворська О.О., Барабанов С.С. Ідентифікація прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд для зниження ризиків їх руйнування // Український журнал будівництва та архітектури. Дніпро: ПДАБА, 2024. № 2 (020). С. 116-125. (Особистий внесок – проведення моделювання процесу руйнування та оцінка ризиків втрати стійкості споруд; розробка методики ідентифікації прихованої пошкодженості; обробка отриманих даних).

DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.116.1050>

4. Яланський О.А., Барабанов С.С. Оцінка пошкоджень конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом // Науковий вісник ДонНТУ. 2024. № 1. С. 8-17. (Особистий внесок – проведення аналітичних та натурних досліджень; розробка методу оцінки тріщинуватості).

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-1-8-17>.

5. Розробка моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд / Беліков А.С., Яланський О.А., Барабанов С.С., Слащова О.А., Іконніков М.Ю. // Український журнал будівництва та архітектури. Дніпро: ПДАБА, 2024. № 3 (021). С. 62-72. (Особистий внесок – проведення аналітичних досліджень кінематичних моделей; комп'ютерне моделювання та лабораторні випробування; обробка даних).

Публікації у матеріалах науково-технічних конференцій:

6. Беліков А.С., Барабанов С.С. Апробація в лабораторних умовах збуджувача коливань для віброакустичного контролю безпеки будівель і споруд / Безпека життєдіяльності в ХХІ столітті: тези допов. XX Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції (17-18 квітня 2024 р.). Дніпро: ПДАБА, 2024. С. 97-98. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/12712> (Особистий внесок – проведення лабораторних досліджень; обробка даних).

7. Яланський О.А., Барабанов С.С. Генератор механічних коливань із заданими спектральними параметрами для вібраційних машин та діагностичного устаткування з прямим електричним приводом / Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: тези допов. ХХІ Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів (16-17 травня 2024 р.). Кременчук: КНУ, 2024. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/12712> (Особистий внесок – апробація генератора механічних коливань в лабораторних умовах).

8. Беліков А.С., Барабанов С.С. Контроль пошкодження конструктивних елементів будівель і споруд для зниження операційних та екологічних ризиків / Архітектура, Будівництво: ХХ Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of solving global problems of humanity» (20-22 травня 2024 р.). Афіни, 2024. С. 27-29. <https://eu-conf.com/events/problems-of-solving-global-problems-of-humanity/> (Особистий внесок – апробація методів віброакустичного профілювання та зондування; обробка даних).