

«Український державний університет науки і технологій»
Навчально-науковий інститут
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
Міністерство освіти і науки України

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 пошкоджень добре зарекомендував себе віброакустичний метод контролю, який був апробований в різних умовах і дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багат шарових 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 тубінгів. 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 пошкоженості 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 пошкоженості 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 пошкоженості 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 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. 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 ризик-орієнтованого 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 динамічних процесів, моделі складних коливань, віброакустичний моніторинг, автоматизація систем контролю, підвищення рівня безпеки.

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 structures. 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 choosing 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.