

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Трощинський Богдан Олександрович

УДК 681.518.5:621.31

ДИСЕРТАЦІЯ

**Комп'ютеризована система діагностики залізобетонних
паль на основі акустичних методів**

Спеціальність 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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



Б.О. Трощинський

Науковий керівник Городжа Анатолій Дмитрович,
кандидат технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Трощинський Б.О. Комп'ютеризована система діагностики залізобетонних паль на основі акустичних методів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти», Київський національний університет будівництва і архітектури МОН України, Інститут електродинаміки НАН України. Київ, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання щодо розробки моделей, методів та універсальної комп'ютеризованої системи, що їх реалізує, для діагностування залізобетонних паль фундаментів глибокого закладення (ФГЗ) за умов сумісного застосування методів віброударної діагностики та акустичного каротажу.

З початку масового використання бурових паль і досі існує проблема забезпечення надійності фундаментів через те, що процес устрою паль приховано від спостереження і в стовбурах паль можливо утворення неприпустимих дефектів, які знижують несучу здатність паль і можуть привести споруду до аварійного стану.

Розглянуто основні види залізобетонних паль, що застосовуються в сучасному вітчизняному і закордонному будівництві ФГЗ, та типові дефекти і причини їхнього утворення в різних видах паль. А також надано аналіз сучасного стану методів неруйнівного контролю та засобів їхнього забезпечення, що застосовуються задля обстеження (діагностики) стовбурів паль і стовпів. Більш детально розглянуто фізичні основи, переваги та недоліки методів діагностики, що мають найбільше поширення, а також поширені системи неруйнівного контролю ФГЗ.

Показано, що у всіх видах паль ФГЗ неможливо уникнути утворення різноманітних дефектів, тому що існує досить багато причин їхнього утворення, які не завжди можливо передбачити і врахувати. Задля діагностики паль використовуються, головним чином, акустичні методи, які дають змогу виявляти найбільш критичні дефекти в палях. Показано також, що в деяких випадках лише використання комплексного методу може надати оцінку технічного стану паль.

В дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу з розробки моделей, методів та створення дослідного зразку універсальної комп'ютеризованої системи з сумісним застосуванням методів віброударної діагностики і акустичного каротажу, що їх реалізує, задля діагностування технічного стану залізобетонних паль ФГЗ. З урахуванням характеру хвильових процесів, що виникають і розповсюджуються у відкритих і занурених в ґрунт залізобетонних палях за ударного впливу, обґрунтовано та досліджено математичні моделі діагностичних сигналів детермінованої і стохастичної природи.

Розглянуто питання побудови детермінованих математичних моделей відкритої і зануреної у ґрунт залізобетонних паль, де паля представляється як система з розподіленими параметрами, електричним аналогом якої є довга лінія. На основі аналізу цих моделей запропоновано просторово-часову діаграму поширення хвилі стиску в багат шаровому лінійно-протяжному виробі (палі), яка дає змогу розробити і дослідити математичні моделі віброакустичних сигналів, що виникають і розповсюджуються у залізобетонних палях за ударного впливу.

В моделях враховано геометричні параметри об'єкта контролю, умови збудження зонduючого сигналу, поглинання енергії пружної хвилі матеріалом палі з урахуванням багат шарового оточуючого ґрунту з різними акустичними властивостями.

Разом з тим застосування детермінованих методів під час описання діагностичних сигналів не можна вважати задовільним і аргументованим, тому

що переважна більшість вимірюваних процесів носить випадковий характер. Побудова інформаційно-вимірювальної системи акустичної діагностики залізобетонних паль (ІВСАД ЗП), що базується на статистичних методах, надає можливість за серією результатів вимірювального експерименту рекомендувати алгоритм, за яким обчислюється найкраще в імовірнісному сенсі наближення вимірюваного параметра. Таким чином, на основі припущень, прийнятих під час побудови детермінованих моделей хвильових процесів у зануреної у ґрунт палі, останню можна розглядати як об'єкт, що складається із певним чином з'єднаних RLC-контурів.

На основі дослідження математичних моделей віброакустичних сигналів, що виникають у палях, проведено теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка діагностичних ознак, що характеризують технічний стан залізобетонних паль.

За результатами комп'ютерного моделювання хвильових процесів в зануреній у ґрунт палі за змінних параметрах ударного імпульсу і різних характеристиках ґрунту, який оточує палю, встановлено граничні значення амплітуди імпульсної механічної сили, за яких починається пластична деформація ґрунту, що важливо в експериментах вимірювання несучої здатності палі. Показано, що за оптимальних значеннях тривалості імпульсу – $10 \div 20$ мс – амплітуда сили повинна перевищувати 2 МН, а за малих значеннях тривалості імпульсу (менше 10 мс) граничне значення сили суттєво зростає.

В роботі вперше розроблено інформаційне забезпечення задля сумісного використання методів віброударної діагностики та акустичного каротажу залізобетонних паль на основі обґрунтованих математичних моделей діагностичних сигналів, алгоритмічно-програмного забезпечення статистичного оцінювання ознак і реалізації їх за допомогою інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) діагностики.

Для реалізації апаратного забезпечення методу розроблено програмно-технічне забезпечення для ІВС акустичної діагностики паль, структурну схему, виготовлено дослідний зразок ІВС діагностики залізобетонних паль, у якій на

відміну від відомих систем передбачено сумісне використання методів віброударної діагностики та акустичного каротажу.

Важливою складовою експериментального зразка системи віброударної діагностики є програмне забезпечення (ПЗ). Саме ПЗ надає гнучкість системі і забезпечує функціонування під час різних випробувань.

Керування режимами здійснюється мікроконтролером за закладеними алгоритмами. Завдяки вбудованому контролеру USB здійснюється живлення схеми та обмін інформацією з комп'ютером. Як мікроконтролер застосовано STM32 на основі технології Cortex-M3, яку спеціально розроблено задля застосувань, де необхідні розвинені системні ресурси і при цьому мале енергоспоживання. Це дає змогу розробити недорогий з малим споживанням енергії і разом з тим потужний і гнучкий універсальний контролер.

Для методу акустичного каротажу, в якому як датчики застосовуються п'єзокварцові елементи, розглянуто особливості реалізації електронних схем. Електронні блоки випромінювача і приймачів розташовуються в центральному модулі збору інформації, а передача сигналів між ним і датчиками відбувається по кабелях значної довжини (до 100 м). Знаходження електронного блоку випромінювача в безпосередній близькості до мікроконтролера дає можливість формування необхідних сигналів в самому мікроконтролері для роботи зонда-випромінювача.

Також вирішується задача отримання високої напруги (600 В), що використовується для роботи з п'єзокварцевими елементами у разі живлення від USB, та питання гальванічної розв'язки.

Задля виконання вимірювань акустичних та вібраційних процесів, що відбуваються в процесі акустичного каротажу паль, а також для подальшої передачі отриманих даних в комп'ютер розроблено спеціальну апаратуру, яка дає можливість здійснювати перетворення аналогових сигналів, що надходять від датчиків різних типів, у цифрову форму і запису їх у пам'ять обчислювальної машини задля наступної обробки та збереження.

Використання сучасного потужного мікроконтролеру дає можливість впровадження і використання в системі нових режимів роботи та алгоритмів обробки вимірних реалізацій сигналів без змін у апаратної частини. Розглянуто особливості побудови вбудованого ПЗ для роботи модуля збору інформації.

Завдяки такому підходу значно розширено можливості методів та підвищено точність і вірогідність результатів обстеження.

Обґрунтовано вибір мікроконтролера і інтерфейсу обміну даними ІВС з комп'ютером.

Вперше запропоновано та експериментально перевірено оригінальний інтерфейс дослідного зразку, який дає змогу наочно з використанням попередньо сформованих навчаючих сукупностей (банком даних) і кількісними оцінками визначати технічний стан виготовленої палі.

Розглянуто основні види програмного забезпечення, що розроблено для управління роботою створеної ІВСАД ЗП, обробки експериментальних даних та побудови розв'язуючих правил з діагностування і класифікації можливих дефектів у палях.

Визначено основні види похибок та надано методику оцінки метрологічних характеристик створеного експериментального зразку комп'ютерної системи акустичної діагностики залізобетонних паль. Проведено метрологічну атестацію, про що отримано свідоцтво УкрЦСМ.

За використанням створеного зразку ІВС діагностики було проведено експериментальні дослідження з діагностування технічного стану залізобетонних паль в процесі будівництва та обстеження фундаментів існуючих зданій і споруд. Проаналізовано отримані результати і сформульовано рекомендації задля їхнього практичного використання та впровадження.

Вперше на основі проведених експериментів сформований банк даних, який містить необхідні відомості задля прийняття рішень щодо того, чи довжина зануреної палі відповідає розрахунковому значенню, отриманому на

основі вимірювань за допомогою створеного зразку. Розроблено методику та на її основі створено технологію практичного використання банку даних для діагностики будівельних конструкцій та технологічного обладнання, яка базується на статистичних методах, що дають можливість приймати рішення з наперед заданими ймовірностями помилок першого та другого роду.

Використання запропонованої системи ІВС для діагностування залізобетонних паль сприяє підвищенню надійності ФГЗ, відповідно будівель і споруд у цілому.

Результати дисертаційної роботи використано під час виконання госпдоговірних та грантових тем НДЛ «ДАКіС» (КНУБА), а також під час створення Стандарту підприємства СП Б В.2.7-:2018 «Неруйнівні обстеження бетонних елементів фундаментів глибокого закладення методом акустичного каротажу».

Ключові слова: залізобетонні палі, методи та системи діагностування паль, імпульсний луна-метод, акустичний каротаж.

Список публікацій здобувача

1. Городжа Л.В., Трощинський Б.О. Механическая і електрическая волновые модели железобетонных свай при эхо-дефектоскопии. *Технічна електродинаміка*. 2000. Ч. 6. С. 90-93 (Особистий внесок – запропоновано механічні та електричні аналоги моделей хвильових процесів для луна-дефектоскопії у відкритої і зануреної в ґрунт залізобетонної палі з використанням моделей Кельвіна-Фойгта і "сітки" Бьлей).

2. Козел В.П., Новотарский Ю.И., Петухов Д.Ю., Трощинский Б.А., Козел П.Ф. Технологический контроль процесса изготовления буроналивочных свай. *Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика*. 2004. №2. С.18-19(Особистий внесок – розроблено і впроваджено комп'ютерну систему контролю технологічного процесу виготовлення за СФА-технологією залізобетонних паль).

3. Городжа А.Д., Трощинський Б.О. Сучасний стан контролю якості залізобетонних паль і бурових стовпів. *Основи і фундаменти*. 2006. Вип. 30. С.34–38(Особистий внесок – виконано аналіз сучасного стану діагностики залізобетонних паль на будівельних об'єктах України).

4. Трощинський Б.О. Застосування електричних моделей хвильових процесів у залізобетонних палях для створення банку даних їх діагностичних ознак. *Технічна електродинаміка*. 2008. Ч. 2. С. 23-26.

5. Мислович М.В., Городжа А.Д., Городжа К.Д., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М., Новотарський Ю.Й., Трощинський Б.О. Створення методів та системи ударної діагностики для визначення технічного стану та подовження ресурсу будівельних та мостових конструкцій. *Збірник наукових статей з цільової програми «Ресурс»*. Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, 2012. С. 456-463(Особистий внесок – створення методології і системи для визначення технічного стану мостових конструкцій у процесі реконструкції).

6. Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М., Городжа А.Д., Новотарський Ю.Й., Трощинський Б.О. Створення універсальної системи підвищення надійності та подовження ресурсу при будівництві та реконструкції мостових та будівельних конструкцій з використанням акустичного каротажу та віброударної діагностики. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2016. № 3. С. 11-16(Особистий внесок – розроблено та експериментально випробувано дослідний зразок ІВС).

7. Герцик С.М., Городжа А.Д., Мислович М.В., Подольцев О.Д., Сисак Р.М., Трощинський Б.О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їх використання для діагностики електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С.86-94(Особистий внесок – запропоновано комп'ютерне моделювання хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів, визначено значення основних параметри використаних в моделюванні). DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2018.02.086>

8. Городжа К.А., Подольцев О.Д., Трощинський Б.А. Електромагнітні процеси в імпульсному електродинамічному випромінювачу для збудження пружних коливань в бетонних конструкціях. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 23-28 (Особистий внесок – досліджено багаторезонансні моделі вібраційних діагностичних сигналів, що виникають в результаті ударного збудження). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023>

9. Городжа А.Д., Трощинський Б.О. Методичні рекомендації по використанню неруйнівного методу акустичного каротажу при обстеженні бурових паль. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 95. № 1. С. 128-137(Особистий внесок – розробка методичних рекомендацій з використання методу акустичного каротажу задля створення стандарту підприємства).

10. Бондарчук О.В., Мислович М.В., Соболевська Т.Г., Твердяков В.В., Трощинський Б.О. Формування навчаючих сукупностей для інформаційно-вимірювальних систем діагностики електротехнічного обладнання з урахуванням результатів його віброударних випробувань. *Праці ІЕД НАН України*. 2020. Вип. 55. С. 114-125(Особистий внесок – запропоновано урахування результатів віброударних випробувань під час формування навчаючих сукупностей в ІВС діагностики бетонних і залізобетонних ФГЗ). DOI:<https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.114>

11. Городжа А.Д., Городжа К.А., Трощинский Б.О., Погребный О.А. Расчет параметров импульсного электродинамического излучателя упругих волн. *Праці ІЕД НАН України*. 2018. Вип. 51. С. 125-131(Особистий внесок – розробка методичних рекомендацій з використання методу акустичного каротажу задля створення стандарту підприємства). DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.125>

12. Городжа А., Городжа К., Корнієнко М., Мислович М., Новотарський Ю., Погребний А., Трощинський Б. Неруйнівні обстеження бетонних елементів фундаментів глибокого закладення методом акустичного каротажу. *Стандарт Підприємства* (СП Б В.2.7-:2018), Київ; КНУБА, 2018.

с (Особистий внесок – розробка методичних рекомендацій з використання методу акустичного каротажу задля створення стандарту підприємства).

13. Городжа А.Д., Городжа К.А., Новотарський Ю.І., Погребний О.В., Тошинський Б.О Сучасний стан неруйнівних обстежень буронабивних паль та стовпів на основі досвіду НДЛ „ДАКіС”. *«Проблеми геотехніки-2017»*, праці Міжнародної науково-технічної конференції, 20-23 листопада 2017 р., Київ, Україна. С. 97-99.

14. Городжа А.Д., Трошинський Б.О., Мислович М.В., Сисак Р.М. Діагностування залізобетонних паль методами віброударної діагностики і акустичного каротажу. *«Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики»* матеріали XXII Міжнародної конференції, 10-14 вересня 2018 р., Одеса, Україна, ІЗ НАН України, УТ НКТД. С. 24.

15. Городжа А.Д., Трошинський Б.О., Новотарський Ю. Й. Практика обстеження фундаментів існуючих будівель і споруд. *«Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики»*, матеріали XXII міжнародної конференція, 10-14 вересня 2018 р., Одеса, Україна, ІЗ НАН України, УТ НКТД.С.23.

ABSTRACT

Troshchinsky B.O. Computerized system of diagnostics of concrete piles based on acoustic methods. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.05 "Computer systems and components", Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2021.

In the dissertation work the actual scientific task on development of models, methods and the universal computerized system which implements them for

diagnostics of concrete piles of DEEP FOUNDATIONS under conditions of joint application of methods of vibroimpact diagnostics and acoustic logging is solved.

Since the beginning of mass use of drilling piles, there is still a problem of ensuring the reliability of the foundations, due to the fact that the process of piles is hidden from observation, and in the trunks of piles may form unacceptable defects that reduce the bearing capacity of piles and can lead to disaster.

The main types of concrete piles used in modern domestic and foreign construction of deep foundations, and typical defects and causes of their formation in different types of piles were considered. And also the analysis of a modern condition of methods of nondestructive testing and means of their maintenance applied for inspection (diagnostics) of trunks of piles and columns is provided. The physical bases, advantages and disadvantages of these methods, which are the most widespread, are considered in more detail. Common systems of non-destructive testing of DEEP FOUNDATIONS are also considered.

It has been shown that in all types of DEEP FOUNDATIONS piles it is impossible to avoid the formation of various defects, because there are many reasons for their formation, which are not always possible to predict and take into account. For the diagnosis of piles, mainly acoustic methods are used, which allow to detect the most critical defects in the piles. It has been shown that in some cases only the use of a comprehensive method can provide an assessment of the technical condition of the piles.

In the dissertation the actual scientific and applied problem on development of models, methods and creation of a prototype of the universal computerized system with joint application of methods of vibroimpact diagnostics and acoustic logging which implements them for diagnostics of a technical condition of concrete piles of the foundations of deep laying (FG) is solved. . Taking into account the nature of wave processes that occur and propagate in concrete piles under impact, substantiation and study of mathematical models of diagnostic signals of deterministic and stochastic nature that occur in open and submerged concrete piles under shock excitation.

The question of construction of deterministic mathematical models of open and submerged reinforced concrete piles is considered, where the pile is presented as a system with distributed parameters, the electrical analogue of which is a long line. Based on the analysis of these models, a spatio-temporal diagram of compression wave propagation in a multilayer linear-extended product (pile) is proposed, which allows to develop and investigate mathematical models of vibroacoustic signals that arise and propagate in reinforced concrete piles under impact.

The used models take into account the geometric parameters of the object of control, the conditions of excitation of the probing signal, the absorption of the energy of the elastic wave by the pile material, taking into account the multilayer surrounding soil with different acoustic properties.

However, the use of deterministic methods in the description of diagnostic signals can not be considered satisfactory and reasoned, because the vast majority of measured processes are random. Based on this, the construction of information-measuring system of acoustic diagnostics of concrete piles (IMSADCP), based on statistical methods, allows a series of results of the measurement experiment to recommend an algorithm that calculates the best in the probabilistic sense of the measured parameter. Thus, based on the assumptions made during the construction of deterministic models of wave processes in a pile immersed in the ground, the latter can be considered as an object consisting of a certain way connected RLC-circuits.

Based on the study of mathematical models of vibroacoustic signals that occur in piles, a theoretical justification and experimental verification of diagnostic features that characterize the technical condition of concrete piles.

According to the results of computer simulation of wave processes in a pile immersed in the soil, with variable parameters of the shock pulse and various characteristics of the soil surrounding the pile, the limit values of the pulse mechanical force amplitude are set, at which plastic deformation of the soil begins, which is important in bearing capacity experiments fields. It is shown that at optimal values of pulse duration - $10 \div 20\text{ms}$, the amplitude of the force should exceed 2MN,

and at small values of pulse duration (less than 10ms) this limit value of force increases significantly.

For the first time information support for joint use of methods of vibro-shock diagnostics and acoustic logging of concrete piles on the basis of substantiated mathematical models of diagnostic signals, algorithmic-software of statistical estimation of signs and their realization by means of information-measuring system (IVS) of diagnostics is developed.

To implement the hardware of the method, software and hardware for IMS acoustic diagnostics of piles was developed, a block diagram was developed, a prototype of IMS diagnostics of concrete piles was made, in which, unlike known systems, combined use of vibration shock diagnostics and acoustic logging is provided.

An important component of the experimental sample of the vibro-shock diagnostic system is the software. It is the software that gives flexibility to the system and ensures operation during various tests.

Modes are controlled by a microcontroller according to the established algorithms. The built-in USB controller powers the circuit and exchanges information with the computer. STM32 based on Cortex-M3 technology is used as a microcontroller, which is specially designed for applications where advanced system resources and low power consumption are required, which allows to develop an inexpensive with low energy consumption and at the same time a powerful and flexible universal controller.

For the method of acoustic logging, which uses piezo-quartz elements as sensors, the peculiarities of the implementation of electronic circuits are considered. Electronic units of the emitter and receivers are located in the central module for collecting information, and the transmission of signals between it and the sensors is via cables of considerable length (up to 100 m). Finding the electronic unit of the emitter in close proximity to the microcontroller makes it possible to generate the necessary signals in the microcontroller for the operation of the emitter probe.

It also solves the problem of obtaining a high voltage (600 V), which is used for forming to work with piezoelectric elements, when powered by USB, and the issue of galvanic isolation.

In order to perform measurements of acoustic and vibration processes occurring in the process of acoustic logging of piles, as well as for further transmission of data to the computer developed special equipment that allows to convert analog signals from sensors of different types into digital form and write them to the memory of the computer for further processing and storage.

The use of a modern powerful microcontroller allows the introduction and use in the system of new modes of operation and algorithms for processing the measured implementations of signals without changes in the hardware. Features of construction of the firmware for work of the module of gathering of the information were considered.

Thanks to this approach, the possibilities of methods are significantly expanded and the accuracy and reliability of survey results are increased.

The choice of the microcontroller and the interface of data exchange of IMS with the computer is substantiated. For the first time, the original interface of the prototype was proposed and experimentally tested, which allows to visually determine the technical condition of the manufactured pile using pre-formed training sets (data bank) and quantitative assessments.

The main types of software developed to manage the work of the created ISSAD FE, process experimental data and build decision-making rules for diagnosing and classifying possible defects in piles are considered.

The main types of errors are determined and the method of estimating the metrological characteristics of the created experimental sample of the computer system of acoustic diagnostics of concrete piles is given. Metrological attestation was carried out, about which the UkrCSM certificate was received.

Using the created sample of IMS diagnostics, experimental researches were carried out on diagnosing the technical condition of concrete piles in the process of construction and inspection of the foundations of existing buildings and structures.

The obtained results are analyzed and recommendations for their practical use and implementation are formulated.

For the first time on the basis of the conducted experiments a data bank was formed, which contains the necessary information for making decisions on whether the length of the submerged pile corresponds to the calculated value obtained on the basis of measurements using the created sample.

The method is developed and on its basis the technology of practical use of the data bank for diagnostics of building constructions and technological equipment is created, which is based on statistical methods that give the chance to make decisions with predetermined probabilities of errors of the first and second kind.

The technique and technology of practical use of the data bank for diagnostics of building constructions which is based on the statistical methods giving the chance to make the decision with predetermined probabilities of errors of the first and second kind are developed.

The use of the proposed IMS system for the diagnosis of concrete piles helps to increase the reliability of deep foundations, respectively, buildings and structures in general. The results of the dissertation were used during the implementation of economic contract and grant topics NDL "DAKiS" (KNUBA), as well as when creating the Standard of the enterprise JV B B.2.7-: 2018 "Non-destructive testing of concrete elements of deep foundations by acoustic logging".

Keywords: concrete piles, methods and systems for diagnosing piles, pulse echo method, acoustic logging.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	15
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 ЗАЛІЗОБЕТОННІ ПАЛІ І СТОВПИ ФУНДАМЕНТІВ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДЕННЯ ТА ІСНУЮЧИЙ СТАН КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЇХНІХ СТОВБУРІВ	16
1.1 Бетонні і залізобетонні палі та типові дефекти, що в них виникають.....	16
1.1.1 Палі, що занурюються у ґрунт.....	17
1.1.2 Бурунабивні палі і стовпи.....	20
1.1.3 Буроін'єкційні палі (БІП)	25
1.2 Існуючі методи та засоби неруйнівного обстеження (діагностики) бетонних і залізобетонних паль.....	26
1.2.1 Імпульсний луно-метод з ударним збудженням пружних хвиль.....	28
1.2.2 Метод акустичного каротажу.....	32
1.2.3 Комплексний акустичний метод.....	40
1.2.4 Динамічні випробування паль.....	43
Висновки до розділу 1.....	43
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДКРИТІЙ І ЗАНУРЕНІЙ У ҐРУНТ ПАЛІ, ЗА УДАРНОГО ЗБУДЖЕННЯ ХВИЛІ З ОДНОГО ТОРЦЯ.....	45
2.1 Обґрунтування вибору моделей, що характеризують діагностичні сигнали, що виникають за ударного збудження в палі.....	46
2.2 Математичні моделі відкритої та зануреної у ґрунт палі.....	49
2.3 Стохастичні моделі.....	57

2.4 Комп'ютерне моделювання хвильових процесів у бетонній pali, що занурена в ґрунт, за дії зовнішньої імпульсної сили.....	65
Висновки до розділу 2.....	78
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ ІНФОРМАЦІЙНО ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАЛЬ.....	79
3.1 Узагальнена структура ІВСАД ЗП.....	79
3.2 Структура модулю збору інформації.....	81
3.2.1 Блок мікроконтролера.....	84
3.2.2 Структура аналогового каналу модуля збору інформації.....	87
3.2.3 Інтерфейс обміну даними.....	91
3.2.4 Режим вимірювання і обробки віброударних сигналів.....	92
3.2.5 Режим вимірювання і обробки сигналів акустичного каротажу	94
3.3 Програмне забезпечення для створеного зразку ІВСАД.....	102
3.3.1 Функціонування вбудованого програмного забезпечення.....	104
3.3.2 Прикладне програмне забезпечення для управління роботою експериментального зразку ІВСАД ЗП.....	108
3.3.3 Прикладне програмне забезпечення для режиму віброударної діагностики паль.....	112
3.3.4 Формат зберігання даних.....	115
3.3.5 Програмне забезпечення для попередньої обробки.....	117
3.3.6 Програмне забезпечення для визначення чисельних параметрів розподілу та гістограмного аналізу по системі кривих Пірсона.....	118
3.3.7 Формування звітної документації.....	126
3.4 Основні види похибок і оцінка метрологічних характеристик розробленого експериментального зразка комп'ютерної системи акустичної діагностики залізобетонних паль.....	128
Висновки до розділу 3.....	134

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗРОБЛЕНОГО ЗРАЗКУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	135
4.1 Описання експериментів з діагностики різних типів залізобетонних паль з використанням розробленої системи.....	135
4.1.1 Експериментальні дослідження стану паль з використанням луна-акустичного інформаційного каналу.....	135
4.1.2 Досвід практичного застосування ІВСАД на об'єкті будівництва.....	145
4.1.3 Експериментальні дослідження стану паль з використанням каналу акустичного каротажу спільно з луна-методом.....	147
4.1.4 Експериментальні дослідження стану паль з використанням комплексного акустичного методу.....	153
4.2 Створення банків навчаючих сукупностей з типових дефектів залізобетонних паль.....	157
Висновки до розділу 4.....	163
ВИСНОВКИ.....	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	164
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	164
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	164

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧХ	– амплітудно частотна характеристика
ФГЗ	– фундамент глибокого закладення
БНП	– буронабивна паля
БП	– буроінекційна паля
ЗП	– забивна паля
ЛВП	– лінійний випадковий процес
СФА	– Continuous Flight Auger (безперервний пустотілий шнек)
ІВСАД	– Інформаційно вимірювальна акустичної система
ЗП	– залізобетонні палі
МК	– мікро контроллер
АЦП	– аналогово – цифровий перетворювач
ІВС	– інформаційно-вимірювальна система
ОС	– операційна система
ПЗ	– програмне забезпечення
ФНЧ	– фільтр низької частоти
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
РЕМ	– Pulse Echo Method
МДНВД	– метод динамічного навантаження високої деформації
МЗІ	– модуль збору інформації
ІЛМ	– імпульсний луна-метод
PIT	– Pile Integrity Test
CSL	– Cross Hole Sonic Logging
SHSL	– single hole sonic logging
GGL	– Gamma-Gamma Logging
SPI	– Serial Peripheral Interface (послідовний периферійний інтерфейс)
FAT	– First Arrival Time
USB	– Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина)
УЗ	– ультразвук

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сьогодні до 80% будівель і споруд будується на фундаментах глибокого закладення (ФГЗ), основними елементами яких є бетонні та залізобетонні палі (забивні, буронабивні і палі, виконані за CFA-технологією). З початку масового використання бурових паль (60-і роки минулого століття) і досі існує проблема забезпечення надійності фундаментів, через те що процес устрою паль приховано від спостереження, і в стовбурах паль можливо утворення неприпустимих дефектів, які знижують несучу здатність паль і можуть привести споруду до аварійного стану. Технології улаштування паль постійно удосконалюються, однак уникнути появи дефектів в стовбурах паль досі не вдається тому, що існує досить багато причин утворення дефектів, які не завжди можливо передбачити і врахувати.

Саме тому, під час будівництва фундаментів глибокого закладення має бути передбачений вихідний контроль технічного стану стовбурів бурових паль, який неможливо виконувати без використання неруйнівних методів діагностики. Застосування цих методів та засобів, що їх реалізує, має бути обов'язковим задля забезпечення надійності і безпеки експлуатації будівель та споруд і на сьогодні вже передбачено багаточисельними стандартами і нормативними документами.

На даний час для діагностики використовуються, головним чином, акустичні методи, а саме: одно- і багатоканальний акустичний каротаж; імпульсний луна-метод з ударним збудженням пружних хвиль (далі метод віброударної діагностики). Слід зазначити, що у разі використання високої деформації для збудження пружних хвиль, за якій енергія удару на торець палі досягає межі пропорційності, надається оцінка несучої здатності дослідних паль, а техніка низької – виключно для діагностування стовбурів паль. Довгий час ці методи не могли отримати широкого впровадження в польових умовах. Їхні можливості значно зросли після заснування методів цифрової обробки сигналів.

На даний момент у світі розроблено і використовується багато інформаційно-вимірювальних приладів (систем) задля реалізації неруйнівних методів контролю, які пропонують спеціалізовані фірми Франції, США, Нідерландів, Ізраїлю, Китаю, Росії. У науково-дослідної лабораторії (НДЛ) «ДАКіС» КНУБА також розроблені і використовуються дослідні зразки комп'ютерних систем діагностики бетонних паль, окремо задля реалізації імпульсного луна-методу та методів акустичного каротажу.

Вагомий внесок в розробку, визначення можливостей, створення різноманітних засобів і систем діагностики неруйнівних методів діагностики бетонних паль внесли іноземні та вітчизняні вчені: Paquet J., Rausche F., Davis A.G., Kennedy J., Likins G., В.Л. Іносов, М.О. Крилов, А.Д. Городжа, М.В. Мислович та інші.

Низкою країн в будівельні норми включено посилання на обов'язкове тестування паль неруйнівними методами під час будівництва пальових фундаментів, серед них Австралія, Китай, Велика Британія та країни ЄС. Методи стандартизовано у Франції (Norme Francaise NFP94-160-1, 2,3), Німеччина (DGGT,1998) і Сполучених Штатах Америки (ASTM 4947-00, 2000; ASTM 6026-16; ASTM 6026-13).

В Україні методи досі не мають нормативного забезпечення. Лише рекомендовано вибіркове (до 10% на будівельному об'єкті) тестування паль імпульсним луна-методом (наказом Держбуду України від 14 вересня 2001 року №185). Акустичний каротаж бурових паль, який край необхідний під час будівництва мостових переходів, де використовуються палі великих діаметрів (понад 1 м) і довжиною понад 30 м, в Україні не регламентовано взагалі. Тому існуючий вихідний контроль паль не забезпечує надійність пальових фундаментів. За результатами тестування є багато „сумнівних” паль, які мають дефекти. Можливість включення в роботу таких паль, а також вплив дефектів на їхню несучу спроможність невідомий, тому палі залишаються в роботі або вибірково дублюються. За таким масовим використанням пальових

фундаментів, який є наразі, необхідне не вибіркове, а 100%-е тестування робочих паль на кожному об'єкті, як передбачено в стандартах країн ЄС.

Процедура отримання висновків складається з робіт щодо обстеження на об'єкті та подальшого аналізу і інтерпретацій результатів в лабораторії. Загальним недоліком існуючих систем є те, що достовірність результатів обстежень значною мірою залежить від «людського фактору», а саме від кваліфікації і навичок оператора системи. Створення бази даних діагностичних ознак та автоматизація їхнього використання під час аналізу результатів значно зменшує цей вплив. Досвід показує, що у разі комплексного обстеження сумнівних паль луна-методом і методом акустичного каротажу достовірність інформації щодо внутрішнього технічного стану палі (характерні особливості та параметри дефектів) значно покращується.

Таким чином, розробка моделей, методів та універсальної комп'ютеризованої системи, що їх реалізує, для діагностування залізобетонних паль ФГЗ за умов сумісного застосування методів віброударної діагностики та акустичного каротажу є актуальною науково-прикладною задачею, розв'язку якої присвячено дану дисертаційну роботу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження по темі дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі електротехніки та електроприводу факультету автоматизації і інформаційних технологій та в НДЛ «ДАКиС» Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) у відповідності з планами держбюджетних тем:

«Виготовлення та налагодження макету інформаційно-вимірювальної системи контролю віброакустичних параметрів вітроагрегату» в рамках договору №67-02НК від 29 листопада 2002 р. між Інститутом електродинаміки НАН України та КНУБА; «Створення банку даних та технології його практичного використання для діагностики будівельних конструкцій та технологічного обладнання» за договором №НЧ/434-2007 від 31 липня 2007 р. між Міністерством освіти і науки України та КНУБА (№ держреєстрації 0107U006533); «Розроблення комп'ютерної системи вібродіагностики»

договором № ДЗ/481-2009 від 17 липня 2009 р. між МОН України та КНУБА (№ держреєстрації 0109U006072); «Дослідження умов для створення системи віброударної діагностики пальових фундаментів з використанням комплексу неруйнівних методів контролю» за договором №7ДБ-2017 від 17 липня 2017 р. між МОН України та КНУБА (№ держреєстрації 0109U006072); «Дослідження режимів роботи, розроблення вдосконалених математичних моделей електромеханічних систем технологічного обладнання та транспортних засобів будівництва», номер держреєстрації 0115U004934.

Крім того, автор дисертаційної роботи приймав участь у виконанні досліджень, що проводилися в Інституті електродинаміки НАН України за проектом «Створення методів та системи ударної діагностики для визначення технічного стану та подовження ресурсу будівельних та мостових конструкцій» за договорами № Р7.13-2010 (1232-10) від 15.06.2010 р., № Р7.13-2011/1235-11 від 01.03.2011 р. та № Р7.13-2012/1238-12 від 01.03.2012 р. між Національною академією наук України та Інститутом електродинаміки НАН України (№ держреєстрації 0110U003666), що виконується відповідно до цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (РЕСУРС)".

Результати дисертаційної роботи було використано під час виконання госпдоговірних та грантових тем НДЛ «ДАКіС» (КНУБА):

«Надання послуг по сервісному обслуговуванню технічних та програмних засобів комп'ютерних систем контролю (КСК) якості виготовлення бурин'єкційних паль, а також по обстеженню паль» – ПраТ фірма «Фундамент», ТОВ «Кроква», ТОВ «БМП Планета-Міст», Філія «БУ Дніпро-Міст», ТОВ «Підприємство «Маст-Буд»; Представництво «Онур Тааххут Ташимаджилик Іншаат Тіджарет Ве Санаї Анонім Ширкеті»:

«Комплекс послуг по обстеженню неруйнівними методами та визначенню якості буронабивних залізобетонних паль (діаметр 1500мм, довжина 45-50м) опор мостових переходів на об'єктах будівництва ЗАМОВНИКА у Туркменістані (Лебапський велаят, м. Туркменабат та Атамуратський етрап)» – ТОВ «Шляхове будівництво «АЛЬТКОМ».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження було розробка моделей, методів та універсальної комп'ютеризованої системи, що їх

реалізує, для діагностування залізобетонних паль ФГЗ за умов сумісного застосування методів віброударної діагностики та акустичного каротажу.

Задля досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести огляд типових дефектів в різних видах паль ФГЗ і виконати аналіз сучасного стану методів та систем діагностування паль з метою вибору підходів, засобів та інформаційних сигналів задля визначення фактичного технічного стану обстежених залізобетонних паль;
- з урахуванням характеру хвильових процесів, що виникають і розповсюджуються у залізобетонних палях за ударного впливу, розробити і дослідити математичні моделі віброакустичних сигналів;
- на основі дослідження математичних моделей віброакустичних сигналів, що виникають у палях, провести теоретичне обґрунтування та експериментальну перевірку діагностичних ознак, що характеризують технічний стан залізобетонних паль;
- розробити програмно-технічне забезпечення для інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) акустичної діагностики паль з урахуванням інформаційних можливостей сигналів, що утворюються під час обстеження паль методами віброударної діагностики і акустичного каротажу;
- розробити структурно-функціональну схему, побудувати та експериментально перевірити дослідний зразок ІВС акустичної діагностики залізобетонних паль з відповідним інтерфейсом для відображення результатів їхнього діагностування;
- з використанням створеного зразку ІВС діагностики провести експериментальні дослідження з діагностування технічного стану залізобетонних паль в процесі будівництва та обстеження фундаментів існуючих зданий і споруд;
- проаналізувати отримані результати і сформулювати рекомендації задля їхнього практичного використання та впровадження.

Об'єкт дослідження – процеси визначення технічного стану залізобетонних паль ФГЗ на основі результатів віброакустичної діагностики.

Предметом дослідження є системи та методи діагностування залізобетонних паль ФГЗ.

Методи досліджень. Задля вирішення поставлених задач використовувалися: теорія розповсюдження пружних хвиль напруги у твердих одномірних тілах, теоретичні основи акустичних методів неруйнівного контролю бетонних елементів фундаментів глибокого закладення та систем їхнього технічного забезпечення; методи теорії ІВС; теорії ймовірностей; методи статистичної обробки діагностичних сигналів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено інформаційне забезпечення для сумісного використання методів віброакустичної діагностики та акустичного каротажу залізобетонних паль на основі обґрунтованих математичних моделей діагностичних сигналів, алгоритмічно-програмного забезпечення статистичного оцінювання ознак і реалізації їх за допомогою ІВС діагностики;

- отримали подальший розвиток математичні моделі віброакустичних діагностичних сигналів, що утворюються за ударного збудження цих сигналів у тілі досліджуваної залізобетонної палі і які враховують особливості ґрунтів, де занурюється досліджуваний об'єкт, що дало можливість теоретично обґрунтувати діагностичні ознаки, за якими встановлюється технічний стан досліджуваної палі;

- вперше теоретично обґрунтовано вимоги до побудови банку даних, який містить необхідні відомості для прийняття рішення щодо технічного стану обстеженої палі з використанням методів віброударної діагностики і акустичного каротажу.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено структурну схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок ІВС діагностики залізобетонних паль, у якому, на відміну від відомих систем, передбачено сумісне використання методів ударної вібро-акустичної діагностики та акустичного каротажу. Такий підхід розширив можливості створеної ІВС з визначення технічного стану паль, а також

забезпечив підвищення точності і достовірності результатів їхньої вібродіагностики;

– вперше запропоновано та експериментально перевірено оригінальний інтерфейс до побудованого дослідного зразку ІВС вібродіагностики і акустичного каротажу залізобетонних паль, який дає змогу наочно, з використанням попередньо сформованих навчаючих сукупностей (банком даних) і кількісними оцінками визначити технічний стан виготовленої залізобетонної палі.

Особистий внесок здобувача. Безпосередньо автором здійснено:

- запропоновано механічні та електричні аналоги моделей хвильових процесів для луна-дефектоскопії у відкритій і зануреної в ґрунт залізобетонної палі з використанням моделей Кельвіна-Фойгта і «сітки Бьлей»;
- розроблено і впроваджено комп'ютерну систему контролю технологічного процесу виготовлення за СФА-технологією залізобетонних паль;
- виконано аналіз сучасного стану діагностики залізобетонних паль на будівельних об'єктах України;
- створенню методологію і системи для визначення технічного стану мостових конструкцій у процесі реконструкції;
- запропоновано комп'ютерне моделювання хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів;
- розроблено методичні рекомендації з використання методу акустичного каротажу задля створення СТАНДАРТУ ПІДПРИЄМСТВА КНУБА;
- запропоновано урахування результатів віброударних випробувань під час формування навчаючих сукупностей в ІВС діагностики бетонних і залізобетонних ФГЗ;
- проаналізовано результати сумісного діагностування залізобетонних паль методами віброударної діагностики і акустичного каротажу, отримані в процесі будівництва та обстеження фундаментів існуючих будівель і споруд.

Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, спільно з якими проведені дослідження, а саме: Городжа А.Д., Городжа Л.В., Мислович М.В., Подольцев О.Д., Сисак Р.М.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок. Постановка мети та завдань проведені разом з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи було представлено на:

- Міжнародної конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики», 10-14 вересня 2018 р., Одеса, Україна, ІЗ НАН України, УТ НКТД (форма участі – дві доповіді, публікація тез);
- Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми геотехніки-2017», 20-23 листопада 2017 р. Київ,, Україна, КНУБА (форма участі – 2 доповіді, публікація тез);
- Міжнародному форумі "INNOVATION MARKET", 22-24 листопада 2016 р., Київ, Україна, (форма участі – доповідь);
- щорічних науково-технічних конференціях КНУБА за планом наукових робіт кафедри електротехніки та електроприводу (2016 – 2020 рр).

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота викладена на 187 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 160 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 9 таблицями, 88 рисунками. Список використаних джерел містить 126 найменування, з них 91 кирилицею та 35 латиницею.

Здобувач вважає за необхідне виразити подяку науковому керівнику Городжі А.Д. за підтримку та настанови, Мисловичу М.В. за вагомі рекомендації та ідеї, Подольцеву О.Д. за допомогу в проведенні комп'ютерного моделювання. А також ПраТ «Фундамент», Представництво «Онур», ТОВ «Маст-Буд» за предоставлену можливість та допомогу в проведенні числених експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 1

ЗАЛІЗОБЕТОННІ ПАЛІ І СТОВПИ ФУНДАМЕНТІВ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДЕННЯ ТА ІСНУЮЧИЙ СТАН КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЇХНІХ СТОВБУРІВ

У даному розділі розглянуто основні види залізобетонних паль, що застосовуються в сучасному вітчизняному і закордонному будівництві фундаментів глибокого закладення, та типові дефекти і причини їхнього утворення в різних видах паль. А також надано аналіз сучасного стану методів неруйнівного контролю та засобів їхнього забезпечення, що застосовуються задля обстеження (діагностики) стовбурів паль і стовпів. Більш детально розглянуто фізичні основи, переваги та недоліки цих методів:

- імпульсний луна-метод з ударним збудженням пружних хвиль;
- методи акустичного каротажу;
- динамічний метод визначення несучої здатності паль.

Для обстежень фундаментів існуючих будівель і споруд розглядався Комплексний акустичний метод.

Основні результати, що наведено у даному розділі дисертації, опубліковано у роботах автора [3, 7, 9-14], а також у звіті про наукову роботу [49, 50].

1.1 Бетонні і залізобетонні палі та типові дефекти, що в них виникають

Сучасне вітчизняне і зарубіжне будівництво застосовує під будівлі і споруди до 70%...80% фундаментів глибокого закладення (ФГЗ), основними елементами яких є залізобетонні забивні та бурові (буронабивні палі і стовпи – БНП, та буроінжекційні - БІП) залізобетонні палі [1 – 8]. На Рис.1.1. зображено умовну класифікацію паль, побудовану згідно способу виготовлення і влаштування їх у ґрунті. В будівництві ФГЗ використовуються, головним чином, бурові палі. Вклад забивних лише 7..10% – найчастіше у випадках, де геологічні умови не дають змоги використовувати бурові палі. Основним показником у вихідному контролі паль є їхня несуча спроможність, яка в

значний мірі залежить від якісних показників їхніх стовбурів. Для дослідних паль вона визначається за результатами статичних і динамічних навантажень (в роботі не розглядаються). Процес устрою паль приховано від спостереження, а в стовбурі палі можливо утворення неприпустимих дефектів, які призводять до втрати несучої спроможності паль, наслідком чого є зниження надійності фундаменту і споруди у цілому. Тому питанням класифікації дефектів і причин їхнього виникнення, а також дослідженню методів "лікування" завжди уділялася увага [9-13].

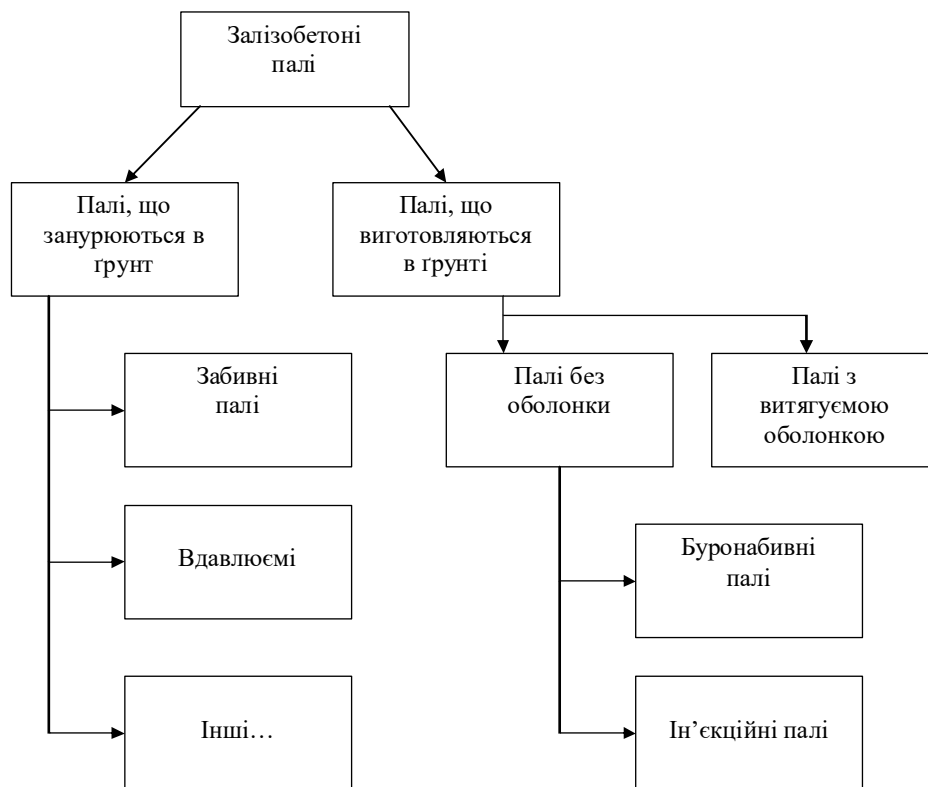


Рис. 1.1 Основні види паль

1.1.1 Палі, що занурюються у ґрунт

Даний вид паль виготовляється в заводських умовах, тому відповідальність за якість виготовлення паль несе завод, але дефекти в цій групі паль можуть виникати і в подальшому технологічному процесі, а саме у процесі занурення чи транспортування. Основні способи занурення наступні:

- забивання;
- підмив;

- вібрація (у водно насичених піщаних ґрунтах);
- вдавлювання (в разі не можливості застосування динаміки);

Як свідчить досвід, порушення цілісності палі в даній групі виникає внаслідок низки причин:

- приховані дефекти стовбура, що виникли в процесі виготовлення палі;
- утворення тріщин, ще в процесі складування, монтажу на стрілу палейних агрегатів;
- розтріскування оголовка під час забивання чи вдавлювання;
- порушення співвісності під час занурення;
- неякісне виконання стику складових паль;
- невідповідність класу бетону проектному;
- невідповідність довжини палі проекту внаслідок «недобивання» палі або використання невідповідного сортаменту паль;
- невідповідність обраного палейного агрегату типу паль і ґрунтовим умовам об'єкту;
- помилки проектування (невідповідність виду паль ґрунтовим умовам об'єкту).

Типові дефекти, що виникають у даному виді паль, наведено на рис. 1.2.

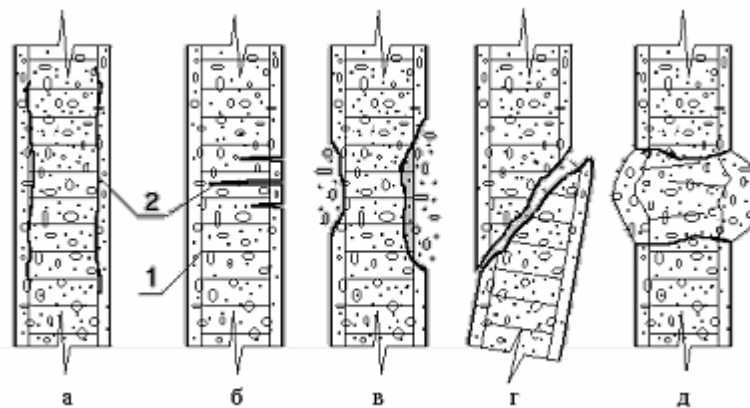
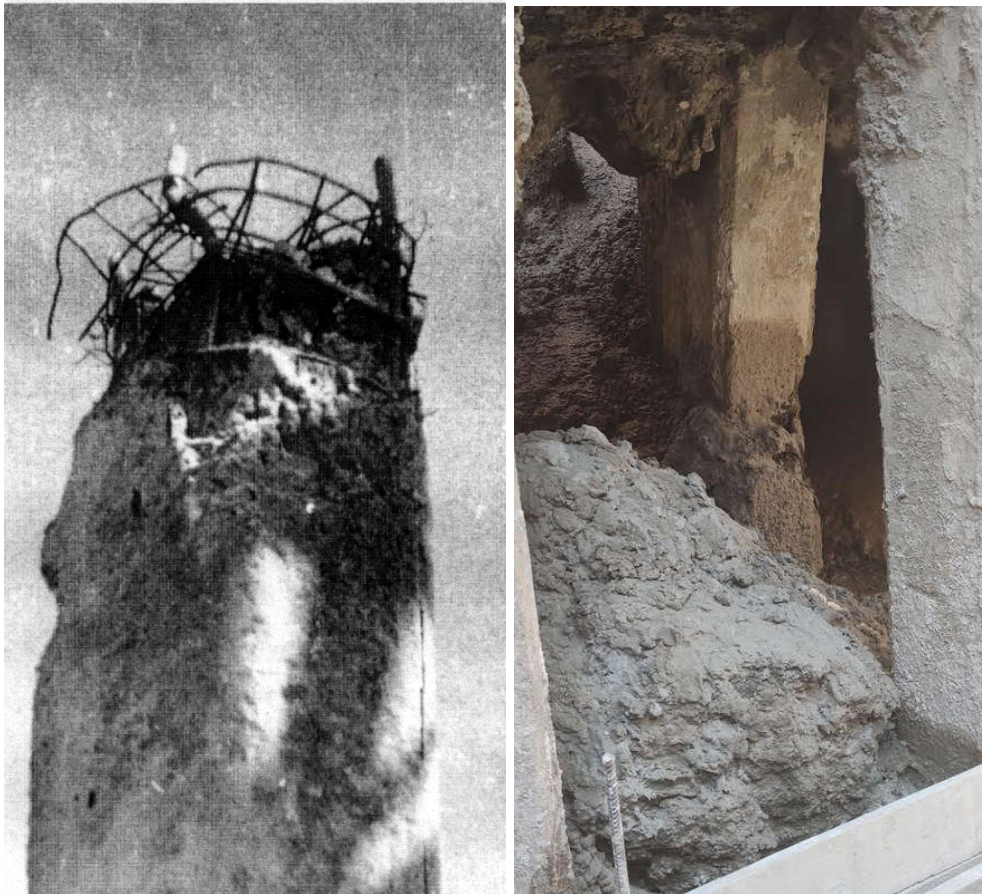


Рис. 1.2 Типові дефекти в забивних палях: а – поздовжні тріщини; б – поперечні тріщини; в – виколення; г – косий злам; д – руйнування палі з витисненням фрагментів (шматків) бетону в ґрунт. 1 – арматура; 2 – тріщини

Причиною утворення розтріскувань і сколів у голові палі (Рис. 1.3, а) є велика концентрація місцевих напружень, що виникають через зсув осі молота від осі палі, завищена енергія удару, незадовільний стан амортизаторів наголовника, зниження марки або неоднорідність бетону.



а)

б)

Рис.1.3 Загальний вигляд дефектів у забивних палях

Поява поздовжніх тріщин (Рис. 1.3, а) пов'язана із загальним перевищенням міцності бетону стискаючими напруженнями під час забивання. Руйнування такого роду найбільш імовірні від завищеної енергії удару молота, зустрічі нижнього кінця палі з щільним ґрунтовим шаром або будь-якою перешкодою.

Однією з причин появи поперечних тріщин (Рис. 1.3, б) є вигин стовбура палі, що виникає через відхилення її вістря від початкового напрямку у разі зустрічі з перешкодою або через зміну початкового положення копрової стріли

чи її коливань. Іншою причиною появи поперечних тріщин або виколів є хвилі розтягування, які можуть виникнути у палі на початку забивання, а також під час знаходження її нижньої третини в зоні слабших ґрунтів.

1.1.2 Буронабивні палі і стовпи

Вважається, що буронабивні палі є найбільш надійними елементами фундаментів глибокого закладання (ФГЗ) в складних геологічних умовах, в умовах щільної міської забудови та існуванні імовірності зсуву ґрунту. Палі виконуються, головним чином, без обсадної труби, а в складних ґрунтових умовах – з обсадною, яка в деяких випадках остається назавжди або виймається в процесі бетонування [7]. Технологія виготовлення паль постійно удосконалюється. Проте, утворення дефектів у палях (Рис.1.4) досі не вдається уникнути. На рисунках 1.5-1.9. наведено приклади загального виду дефектних паль, отриманих під час обстеження на різних будівельних об'єктах України.

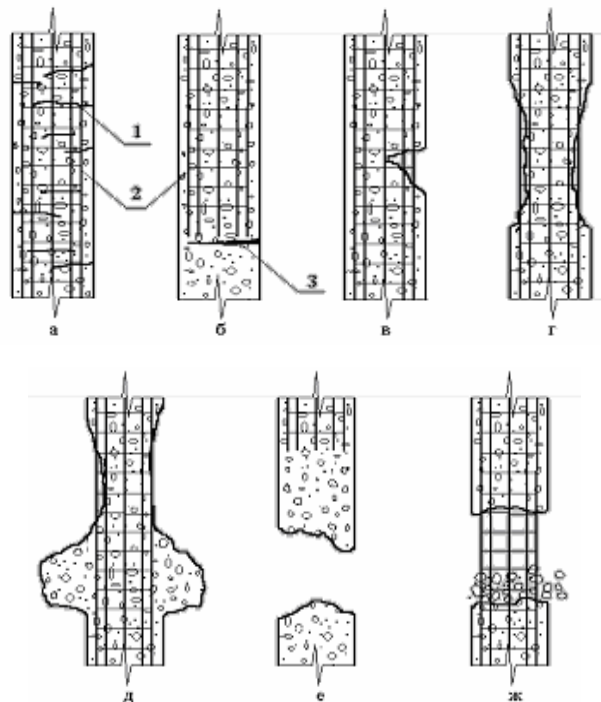


Рис. 1.4 Типові дефекти в буронабивних палях: а, б – тріщини; в – каверни; г, д – шийки; е – розрив; ж – розмив ґрунтовими водами. 1, 3 – тріщини; 2 – арматурний каркас



Рис.1.5 Розшарування бетону (порушення технології бетонування) БНП(а), розрив палі (б)

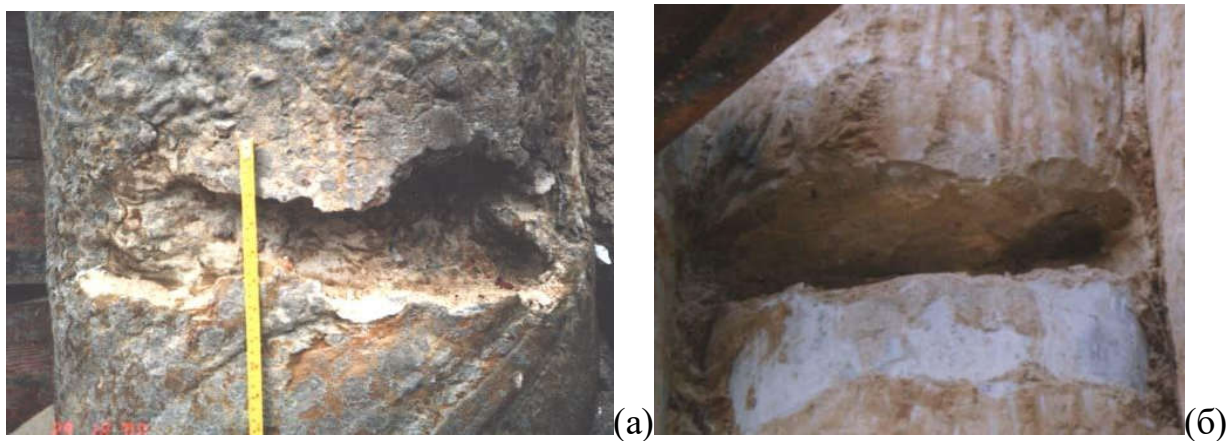


Рис.1.6 Незначна (а) і неприпустима (б) каверни у БНП підпірній стінки.



Рис.1.7 Неприпустима шийка стовбуру БНП.

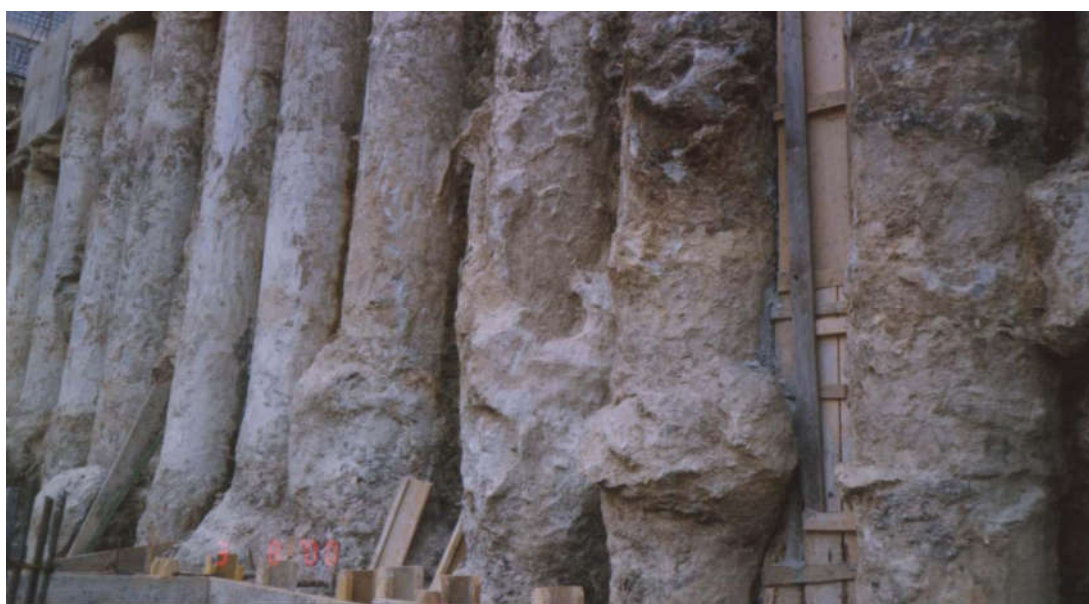


Рис. 1.8 Підпірна стінка з неякісними БНП.



Рис. 1.9 Ліквідація наслідків значного дефекту бурового стовпа, якій виник внаслідок порушення процесу бетонування (будівництво мостового переходу в Полтавській області).

Як показує практика, основні дефекти в бурових палях можуть утворюватися внаслідок наступних причин:

- каверни, шийки та розриви утворюються в слабких ґрунтах у процесі виймання обсадної труби;
- розриви та шийки – у разі розмиву ґрунтовими водами;
- розриви – у разі тривалих переривах бетонування, коли бетон починає схоплюватися в обсадній трубі, та під час виймання труби, коли виникає «перехоплювання» стовбуру палі з одночасним обсіпання ґрунту у тіло палі;
- розшарування бетону – порушення технології бетонування або якщо бетонування стовбуру виконувалося не литою, а жорсткою бетонною сумішшю;
- «зрощення» паль виникає у разі недотримання кута буріння;

– руйнація палі важкою будівельною технікою у процесі її переміщення по будівельному майданчику.

1.1.3 Буроін'єкційні палі (БІП)

В сучасному будівництві буроін'єкційні палі набули найбільш широке застосування. Технологія полягає в тому, що в середині шнеку розташовується бетонолітна труба, через яку після виконання свердловини під тиском подається бетонна суміш з одночасним вилученням шнеку зі свердловини. Тому на заході поширена назва Continuous flight auger pile (CFA-pile) – нескінченний пустотілий шнек. Вони мають порівняну собівартість та швидкість улаштування із забивними палями. Суттєві переваги цих палі полягають у більшій несучій спроможності, створення меншого вібраційного навантаження на сусідні споруди, а також дотримання санітарних вимог по звуковому навантаженню у процесі їхнього виготовлення. Практично усі сучасні установки для улаштування БІП палі оснащено комп'ютерними системами контролю технологічного циклу, який є прихованим від оператора. Проте, уникнути утворення дефектів досі не вдається. На Рис.1.10. наведено типові дефекти, властиві БІП, а на Рис.1.11., – загальний вигляд неякісних палі, виявлених після обстежень.

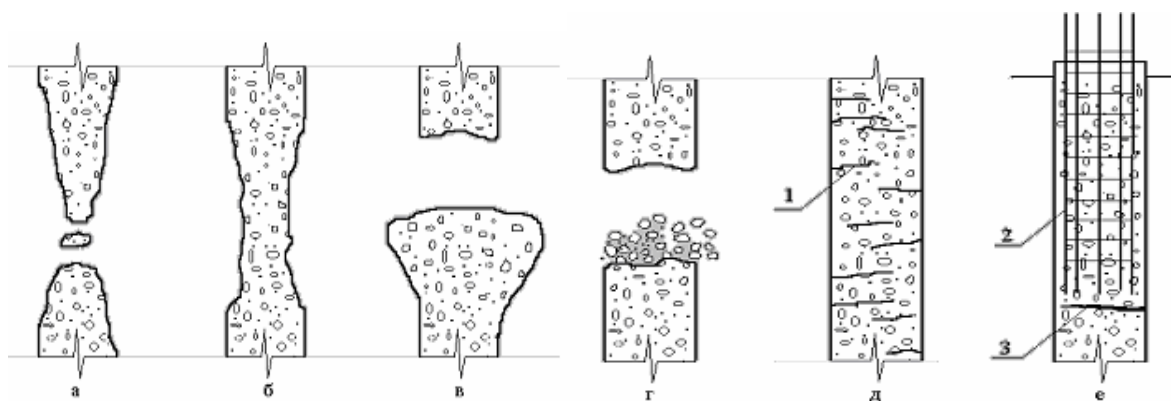


Рис. 1.10 Типові дефекти в БІП: а, в – обрив стовбура; б – шийка; г – розмив ґрунтовими водами; д, е – поперечні тріщини. 1, 3 – тріщини; 2 – арматура.



Рис. 1.11 Дефектні БП на будівельних об'єктах м. Києва.

1.2 Існуючі методи та засоби неруйнівного обстеження (діагностики) бетонних і залізобетонних паль

Діагностика ФГЗ може проводитися за двома основними напрямками:

- тестування якості недавно побудованого елементу фундаменту;
- оцінка технічного стану існуючих фундаментів.

З початку масового використання бурових паль досліджувалося багато методів неруйнівного контролю, які лише наводяться в літературі, а їхнє

використання і дослідна база обмежені. Деякі методи мають великі можливості, проте не мають практичного застосування, наприклад, метод Гамма-Гамма-каротаж (Gamma-Gamma Logging, GGL), який дає змогу виконувати одночасне діагностування стовбуру і оцінку міцності бетону, сьогодні використовується мало, тому що до засобів забезпечення методу існують дуже високі санітарні вимоги [13 – 15].

Довгий час єдиним методом контролю бурових паль був механічний метод колонкового буріння, якій полягає в бурінні стовбура палі на всю довжину з відбором кернів та їхньому подальшому аналізі на присутність сторонніх включень і характеристик міцності бетону [1]. Буріння займає досить багато часу та має високу вартість, а отримані результати не завжди достовірні. Тому він використовується рідко і тільки в виключних випадках, наприклад, задля підтвердження отриманих результатів обстеження іншими непрямыми методами або використання свердловини для усунення (лікування) деяких видів дефектів за допомогою нагнітання цементної суміші під тиском.

Зараз для обстеження паль використовуються, головним чином, акустичні методи – імпульсний луна-метод з ударним збудженням пружних хвиль (Pulse Echo Method, PEM або Pile Integrity Test, PIT) та одно- і багатоканальний акустичний каротаж (Cross Hole Sonic Logging, CSL), які вперше (1968-69 р.р) було запропоновано в роботах J. Paquet [17, 18]. Починаючи з 1973 р., дослідження знайшли продовження у роботах [15, 19 –26]. Однак довгий час, за використання аналогових сигналів, методи не могли отримати широкого впровадження в польових умовах. Можливості методів значно зросли після використання методів цифрової обробки сигналів [16, 27, 39]. На даний момент у світі розроблено і використовуються багато інформаційно-вимірювальних систем задля реалізації цих методів, які пропонують спеціалізовані фірми Франції, США, Нідерландів, Ізраїлю, Китаю, Росії. В НДЛ «ДАКіС» КНУБА також розроблено дослідні зразки інформаційно-вимірювальних систем задля забезпечення луна-методу [40-46]. Найбільш поширені ІВС приведено у табл.1.1.

Таблиця 1.1

Найбільш поширені ІВС акустичної діагностики

№	Тип приладу або системи, виробник, країна	Методи діагностування	Можливість проведення повної діагностики	Орієнтовна ціна
1	Pile Integrity Tester (PIT) (Pile Dynamics, Inc., США)	Луно-метод, УЗ каротаж	Так, Автоматизовано	\$25000
2	Sonic Integrity Testing, SIT (Profound, Нідерланди)	Луно-метод, УЗ каротаж, Комплексний акустичний	Частково, Автоматизовано	\$20000
3	Pulse Echo Tester (PET) (Piletest, Великобританія)	Луно-метод, УЗ каротаж	Частково, Автоматизовано	\$15000
4	Измеритель длины свай ИДС (НПО «Логис», Росія)	Луно-метод	Відсутня	\$3000
5	НПП ИНТЕРПРИБОР Росія ПУЛЬСАР-2.2 "ДБС" СПЕКТР-4.0	УЗ каротаж, Луно-метод	Відсутня	\$10000
6	ІВСАД ЗП (КНУБА, Україна)	Луно-метод, УЗ каротаж, Комплексний акустичний	Так, Автоматизовано	~\$7000

1.2.1 Імпульсний луно-метод з ударним збудженням пружних хвиль

Аналіз досліджень і впровадження методів обстеження бетонних паль у світі свідчить про стійку тенденцію розвитку техніки використання луна-методу у двох напрямках – техніки використання високої (метод динамічного навантаження високої деформації – МДНВД) і низької деформації (імпульсний луна-метод – ІЛМ). МДНВД (динамічний метод), в якому енергія удару на торець палі може досягати межі пропорційності, спрямовано на одночасне тестування якості та оцінки несучої здатності дослідних паль, а ІЛМ –

виключно задля тестування стовбурів паль. Під час удару молотка або іншого ударного пристрою в осьовому напрямку по верхньому торцю палі (див. рис.1.12.) в стовбурі палі збуджується пружний імпульс стискання. Він розповсюджується повздовж палі зі стрижневою швидкістю і відбивається від тих ділянок, де змінюється хвильовий опір (наприклад, зміни перерізу палі). Останній залежить від акустичної жорсткості матеріалу і параметрів перерізу стрижня, тому імпульс стискання буде відбуватися від тих ділянок, де змінюється хвильовий опір перерізу, та від кінця конструкції. Приймач пружних хвиль (датчик швидкості або прискорення – акселерометр), встановлений на торці палі поруч з точкою збудження пружних коливань, приймає і перетворює в електричні сигнали в функції часу зондувальні імпульси та імпульси відлуння. У випадку, коли оголовки паль закрити для доступу конструкціями ростверку або існуючої будівлі, приймач пружних хвиль може бути встановлений на боковій поверхні палі. В цьому випадку для

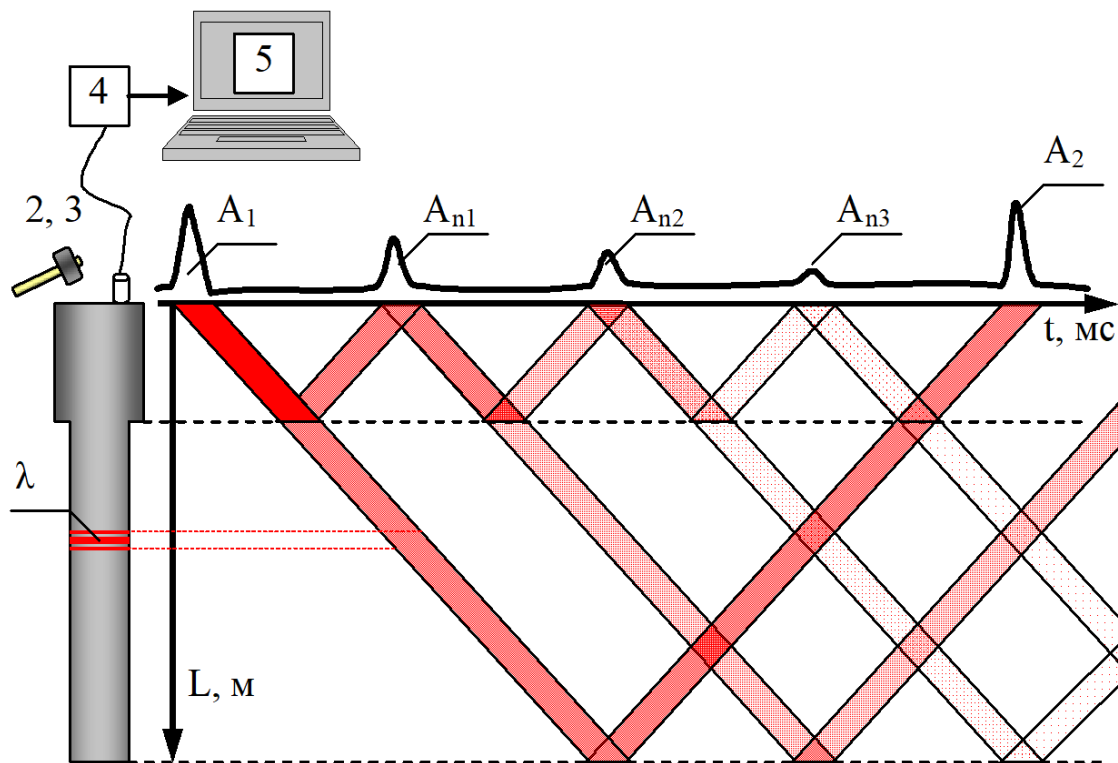


Рис.1.12 Спрощена схема луно-дефектоскопії паль.

1 – паля; 2 и 3 – збуджувач та приймач пружних хвиль; 4 – контроллер; 5 – комп'ютер; A_1 и A_2 – зонduючий и відбитий сигнали; A_n – відбиття від дефекту;
 λ - довжина пружної хвилі.

кріплення приймача потрібно в палі зробити спеціальний пристрій, який буде забезпечувати паралельність осі приймача з віссю палі. Реєстрація даних приймача виконується комп'ютером. У процесі аналізу результати обробки даних представляються у вигляді комп'ютерного графічного зображення (реалізацію хвильового процесу). Аналіз миттєвих значень сигналу дає змогу визначити довжину палі, цілісність і наявність пошкоджень стовбура та місця їхнього розташування. Сигналограма хвильового процесу містить в собі ще більшу інформацію про внутрішній стан стовбура і ґрунта, якій оточує палю. Однак, задля отримання та використання в подальшій інтерпретації результатів обстеження цієї інформації потрібні додаткові теоретичні та експериментальні дослідження методу [47–48].



Рис. 1.13 Обстеження буроінжекційної палі на будівельному об'єкті

Переваги луна-методу:

- палі не потребують значної підготовки, тому можлива вибіркова перевірка;
- виявлення дефектів в палях на ранніх стадіях робіт (3 – 7-а доба після виготовлення);
- можливість обстеження паль одним оператором;
- можливість визначення довжини палі;

- висока оперативність виконання обстежень та економічність метода;
- мінімум завад для робіт, що проводяться на майданчику.

Недоліки.

Інтерпретація результатів вимагає великого досвіду операторів, які виконують обстеження і аналіз результатів; не всі результати незаперечні; обмеження по довжині до 60 діаметрів палі за сприятливих умов; множинні дефекти або дефекти, що розташовані нижче граничної довжини, не можуть бути виявлені; не виявляються незначно протяжні дефекти в вертикальному або горизонтальному напрямках; не надається інформація по горизонтальному розташуванню дефекту; точність визначення довжини або відстань залежить від передбачуваної швидкості хвилі.

Звіт представляє собою зареєстровану датчиком реалізацію хвильових процесів в обстеженій палі та висновок за результатами аналізу і за необхідності – інтерпретація сигналограми.

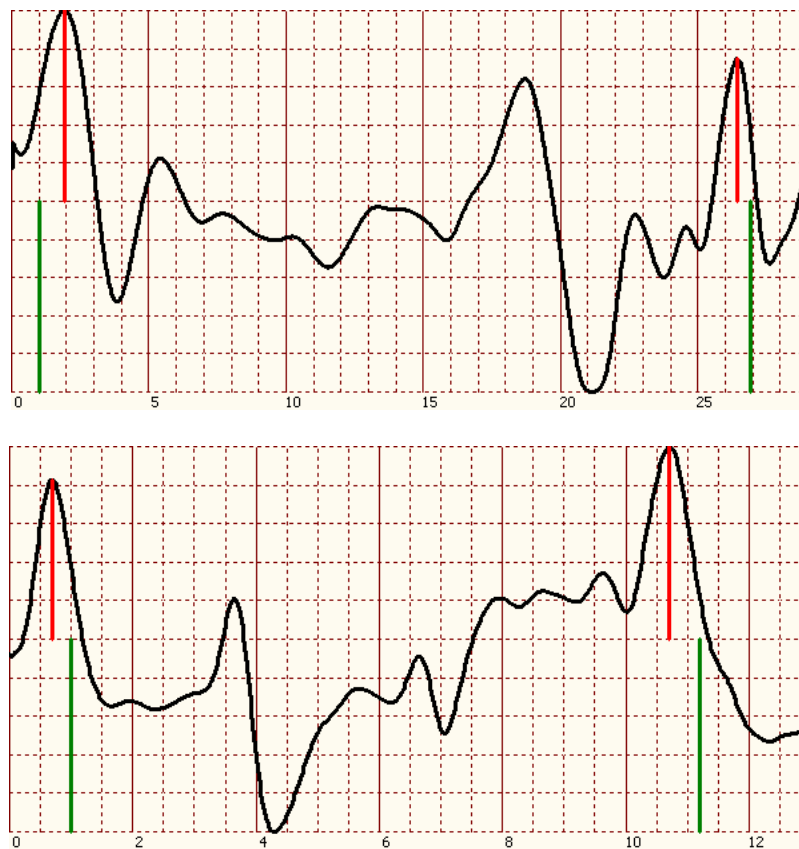


Рис.1.14 Типові результати луна-методу

Результати можуть бути проаналізовані за допомогою порівняння сигналу із зразковим, наявність і розміри дефектів визначаються по різниці сигналу із зразковим методом профілювання палі [29 – 31]. Також ці методи аналізу вимагають припущень щодо впливу опору ґрунту на зареєстровані сигнали матеріалу, довжини залізобетонного елемента, місця положення порушень цілісності бетону у вигляді тріщин, пустот та сторонніх включень.

1.2.2 Метод акустичного каротажу

В основу методу акустичного каротажу покладено відомий ультразвуковий спосіб наскрізного прозвучування, в якому використовуються поздовжні пружні хвилі стискання (далі Р-хвилі), тому що вони серед інших типів хвиль (хвилі Релея, поперечні та інші, див. Рис. 1.15.) мають найвищу швидкість розповсюдження у твердому тілі [47, 48].

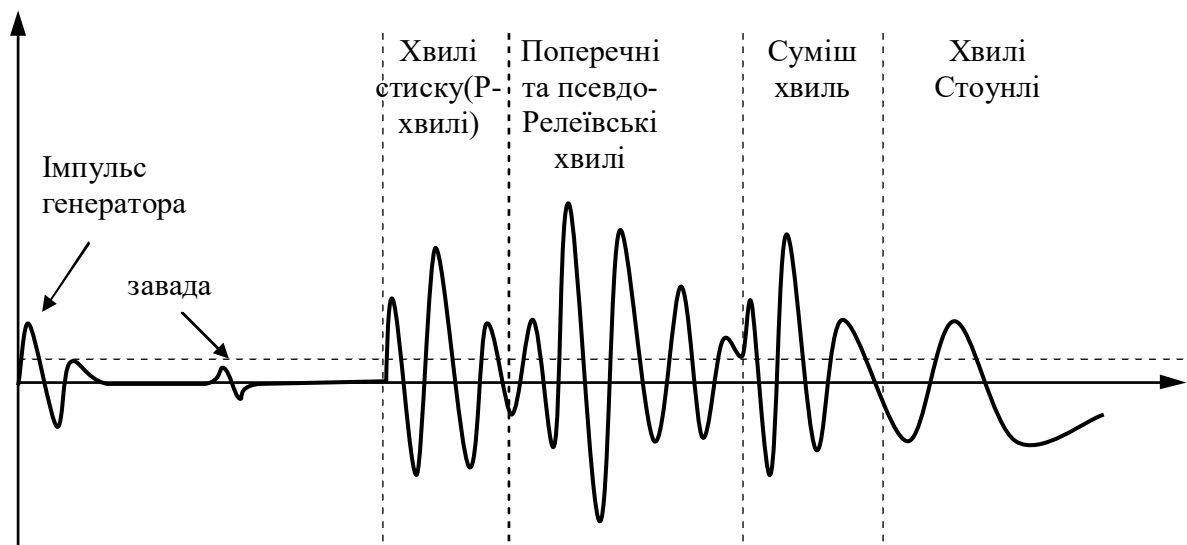


Рис.1.15 Ультразвуковий сигнал зонда приймача (повздовжні хвилі стиску)

Фактична швидкість поширення Р-хвиль у бетоні залежить від властивостей матеріалу, геометрії елемента, а також незначною мірою – від довжини ультразвукової хвилі. У якісному бетоні (за міцності на стиск 10-50 МПа) швидкість Р-хвиль, як правило, коливається від 3600 до 4400 м/с. Бетон низької якості або аномальні ділянки (наприклад, порожнини, включення ґрунту, забруднення і розшарування бетону, тощо) мають значно нижчу швидкість Р-хвиль. Вимірюючи час поширення та відносну щільність енергії ультразвукової

хвилі, у процесі сканування акустичними зондами уздовж конструкції на постійній акустичній базі можуть бути виявлені аномалії. Використовується два способи застосування техніки акустичного каротажу – багатоканальний (перехресний) і одноканальний (Рис.1.16).

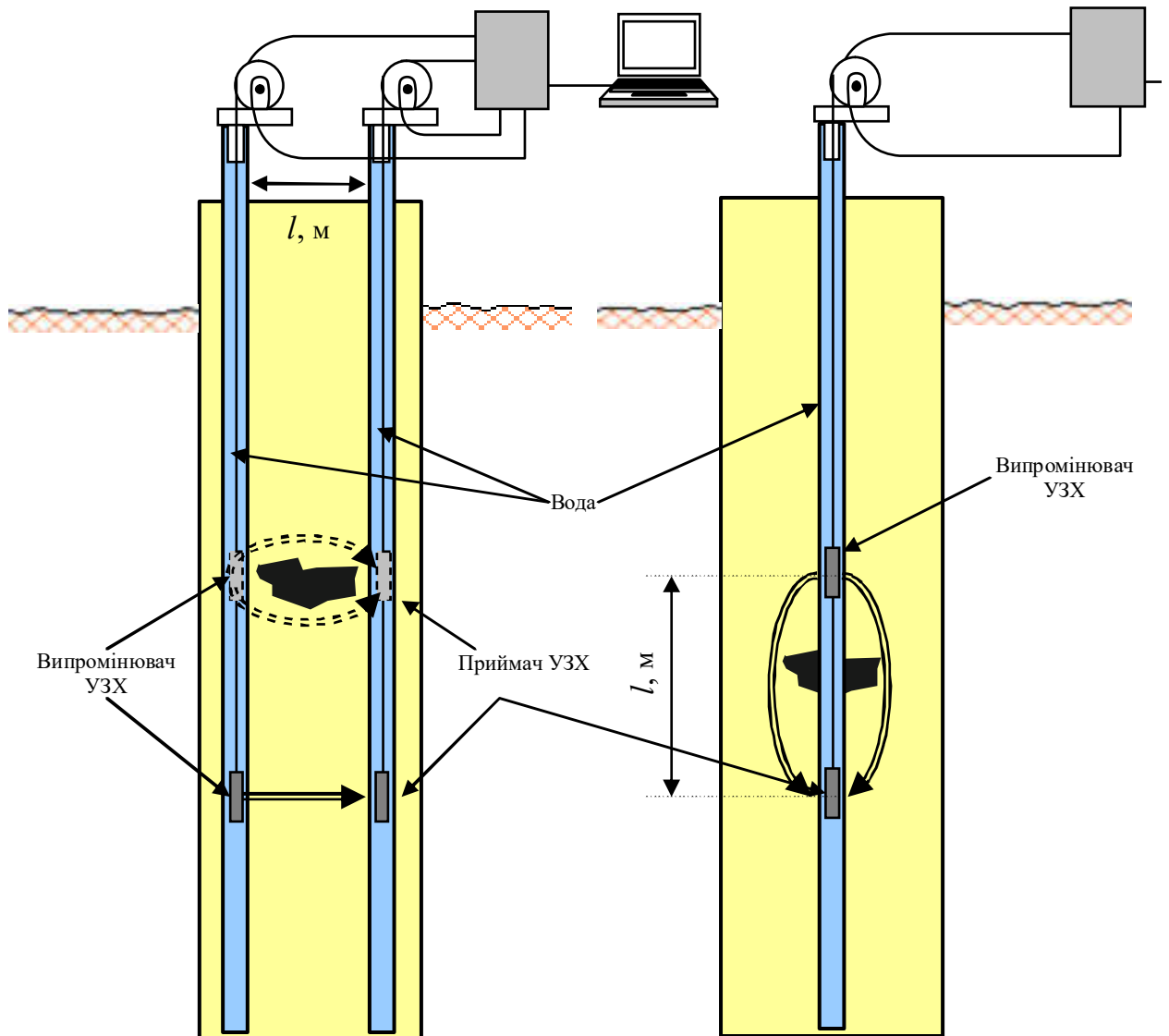


Рис. 1.16 Типові схеми багатоканального (а) і одноканального (б) акустичного каротажу

В залежності від конструкції фундаменту існує декілька типових конфігурацій устрою акустичних каналів доступу в елементах фундаментів, які виконуються за допомогою металевих або пластикових труб (Рис.1.17.) [51, 52].

Слід зазначити, що при обстеженні існуючих конструкцій, де не було закладено канали, можливе використання свердловин, пробурених в стовбурі на всю довжину при колонковому бурінні палі як канал доступу.

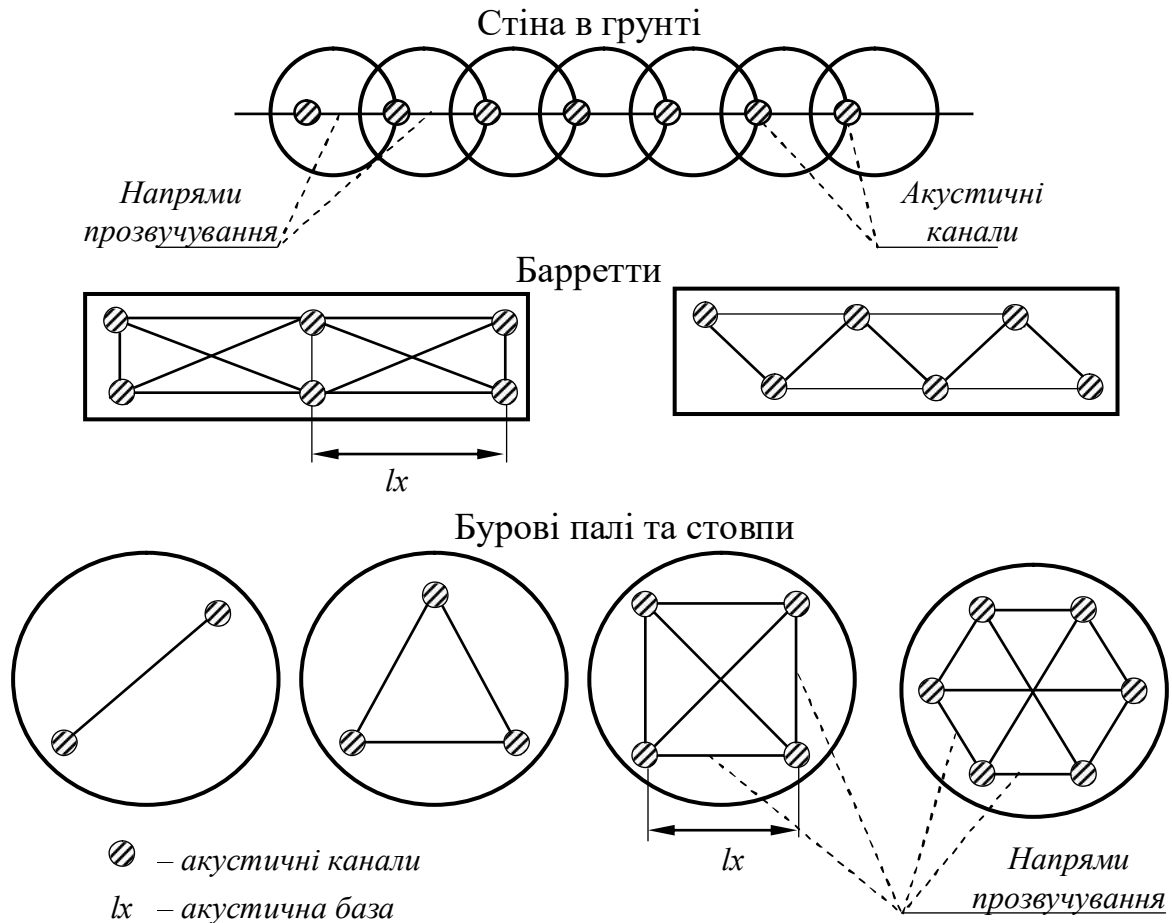


Рис.1.17 Типові конфігурації акустичних каналів доступу в різних бетонних елементах

Для проведення багатоканального акустичного каротажу (cross hole sonic logging – CSL) необхідна наявність у палі двох або більше каналів доступу діаметром ~ 50 мм, в якості яких застосовують сталеві труби. Ці труби закріплюються на арматурному каркасі на всю довжину палі під час її улаштування перед залиттям бетонною сумішшю. Обстеження доцільно проводити після третьої доби з моменту бетонування, коли бетон набрав деякий відсоток проектної міцності.

За багатоканального способу два акустичних зонда (випромінювач, та – приймач ультразвукових хвиль) одночасно опускають або піднімають уздовж акустичних каналів паралельно в одній горизонтальній площині. В одноканальному – зонди, прикріплені один до одного з заданою вертикальною відстанню (зазвичай 500 мм), розташовують в одному каналі. Випромінювач під час руху зондів, генерує ультразвукові імпульси з наперед заданим кроком сканування. На кожному кроці сканування реєструються і зберігаються глибина та вихідний сигнал зонда приймача з моменту генерації ультразвукового імпульсу випромінювачем.

Дані кожного кроку сканування обробляються та представляються для подальшої інтерпретації, як графічне зображення ультразвукового профілю (УЗП) обстеженої структури. В деяких приладах УЗП представляються у цифровому вигляді, де по кроках сканування надається інформація щодо часу або швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі. На Рис. 1.18. наведено УЗП (для приладу КСК-4.5), який для кожного кроку сканування містить:

- час (t , мкс) поширення ультразвукової хвилі з початку збудження і до першого надходження сигналу до приймача;
- відносну щільність енергії (w , db);
- сигналограми ультразвукової хвилі для кожного кроку сканування.
- всі данні елементу обстеження: шифр і назва будівельного об'єкту та елементу фундаменту, схема розташування та ідентифікація каналів доступу, відстань між каналами, схема напрямку сканування та висновок по УЗП.

Переваги: висока роздільна здатність у вертикальному напрямку; відсутнє обмеження на довжину палі, дещо простіша інтерпретація в порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю.

Недоліки: задля інтерпретації результатів треба мати досвідчений персонал; палі повинні бути обладнані каналами доступу (можливо використовувати свердловини від колонкового буріння); для невеликих паль або за відсутності жорсткого арматурного каркасу важко забезпечити паралельність каналів; якість бетону контролюється тільки між конкретними

каналами; властивості бетону за межами каналів доступу, як правило, не піддаються перевірці.

Звіт: стандартний звіт являє собою діаграму Перші Прибуття Сигналу (first arrival time, FAT). Цей параметр може бути перерахований у швидкість поширення хвилі за умови, що відстань між каналами постійна по всій довжині палі (Рис. 1.18).

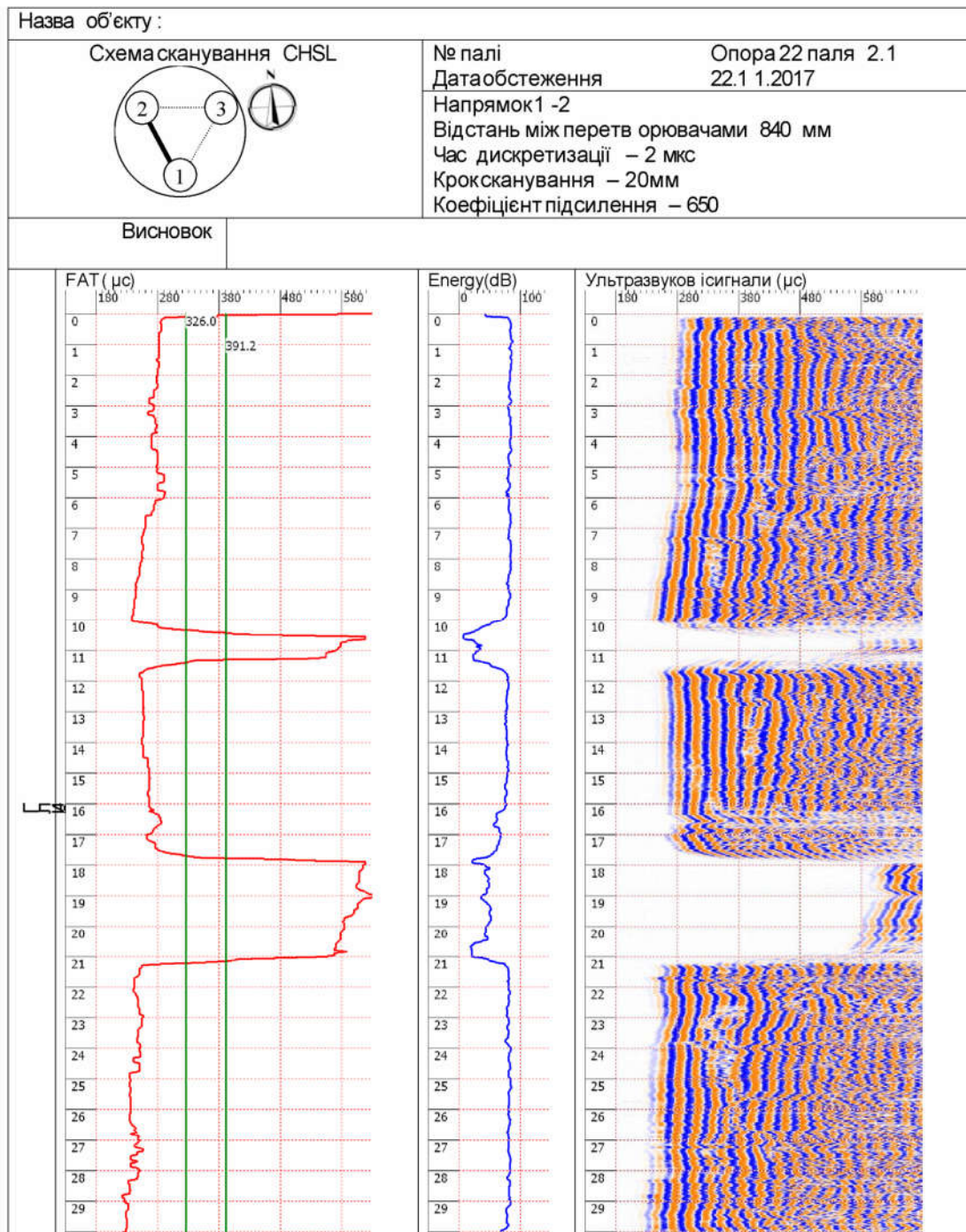


Рис.1.18 Приклад результатів CSL випробувань у формі граничного часу й енергії залежно від глибини

Нещодавно розширено аналіз, що включає відносну енергію сигналу, що приймається; та додаткове опрацювання акустичних сигналів задля отримання томографічного зображення, яке надає 3-D відображення якості стовбуру. Томографія вимагає проведення принаймні 6-ти сканів палі, і в тих випадках, коли присутня дефектна ділянка, для визначення точних характеристик протяжності дефекту в горизонтальній і вертикальній площині проводяться додаткові сканування з передавачем і приймачем на різних рівнях (діагональні виміри).

Слід зазначити, що одноканальний акустичний каротаж (single hole sonic logging – SHSL) використовує обладнання, що і CSL. Проте для проведення обстежень достатньо наявності одного каналу доступу або свердловини в палі. Тому SHSL краще підходить, ніж CSL, для тестування палі малого діаметра, наприклад, буро ін'єкційних.

Переваги: можна використовувати на бурових палях невеликих діаметрів; менші витрати для улаштування одного каналу, ніж двох або більше каналів доступу; немає обмеження на довжину палі.

Недоліки: на додаток до недоліків CSL - менша роздільна здатність по вертикальній протяжності дефектів і невпевненість по обсягу по горизонталі підданого обстеженню; неможливість визначити характеристик верхньої і нижньої частини стовбуру.

Звіт: Наразі не існує визначених методів аналізу, йде просто відображення діаграми.

На Рис.1.19 – наведено загальні вигляди приладів для реалізації акустичного каротажу, а на Рис.1.21 – процеси виконання обстежень.



Рис. 1.19 Прилад англійської фірми PILETEST



Рис. 1.20 Прилад КСК-4.5. НДЛ ДАКіС КНУБА

Обмеження методу акустичного каротажу:

Обстеження бетонних елементів, які мають один акустичний канал доступу (труба або пробурена свердловина), потребує додаткової програми обстежень. У залежності від геометричних параметрів конструкції, вимог до точності програму складає фахівець 3-го рівня з неруйнівного контролю, який має досвід роботи з акустичного каротажу 3-5 років.



Рис. 1.21 Обстеження палі методом акустичного каротажу з використанням приладу англійської фірми PILETEST

Метод не дає можливості точно визначити тип і характер дефекту, а лише дає змогу визначити його наявність. Метод обмежений, насамперед, випробуванням бетону між каналами доступу і, таким чином, дає мало інформації про бетон за межами арматурного каркасу, коли труби прикріплені до внутрішньої сторони арматурного каркасу.

Метод не дає можливості визначати клас бетону палі за відсутності кореляційної залежності між швидкістю УЗХ та міцністю бетону обстежуваної конструкції. Задля визначення міцності бетону палі потрібно побудувати кореляційну залежність “міцність — швидкість УЗХ” з використанням дослідних зразків бетону палі для даної конструкції або вибурених з неї кернів.

1.2.3 Комплексний акустичний метод

Даний метод використовується за для визначення параметрів існуючих фундаментних елементів з ускладненим доступом. В цілому метод є гібридом між луна-методом і акустичним каротажом (Рис.1.22).

Суть метода полягає в різниці швидкості розповсюдження пружних хвиль у бетоні і ґрунті. Час розповсюдження по відношенню до глибини змінюється по лінійному закону: коли зонд (гідрофон) опиняється нижче обстежуємого стовбуру, нахил прямої змінюється, адже швидкість у ґрунті менша, і запізнення сигналу з кожним наступним кроком збільшується в залежності від швидкості розповсюдження хвиль у ґрунті. Таким чином визначається глибина палі, що обстежується. Для визначення цих параметрів паралельно палі, зазвичай на відстані до одного метра, виконується свердловина у ґрунті, глибиною більше, ніж очікувана довжина палі. У свердловину опускається ПВХ

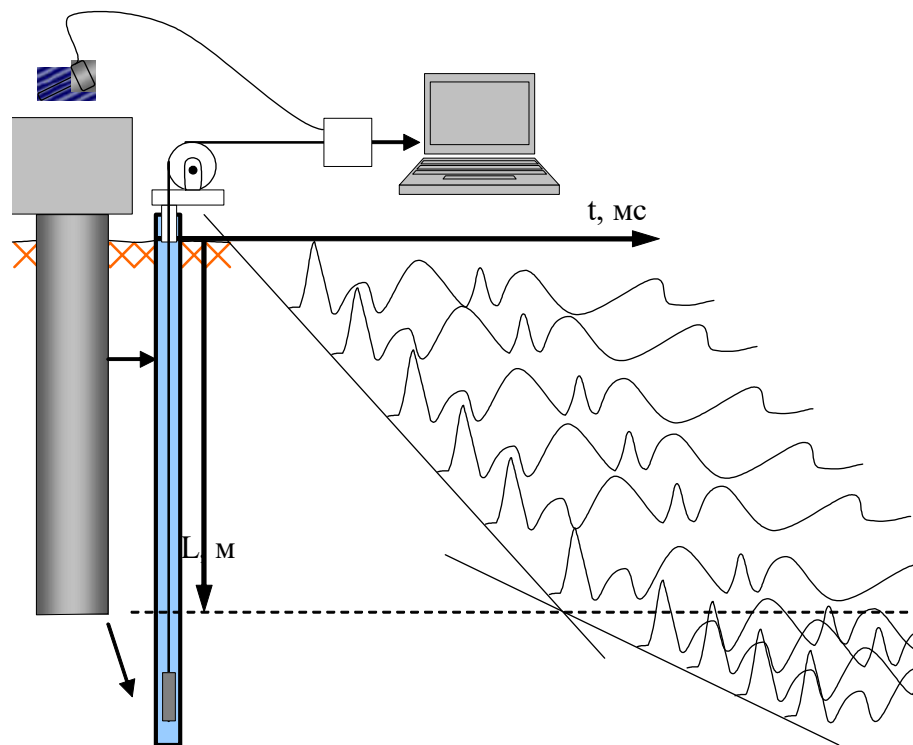


Рис.1.22 Спрощена схема комплексного акустичного методу

-труба та наповнюється водою, в яку через лічильник глибини занурюється водонепроникний зонд, аналогічний тому, що використовується під час акустичного каратажу. Гідрофон опускається з заданим кроком по глибині, одночасно з цим здійснюється ударне збудження хвиль, ручним молотком з вбудованим акселерометром з доступної верхньої частини існуючого фундаменту. Одразу після збудження хвилі розпочинається запис сигналу з

гідрофону, і фіксується час першого вступу сигналу на кожному кроці по глибині.

Слід зазначити, що в деяких випадках, коли відсутній фізичний доступ до стовбуру (Рис. 1.23), цей метод єдиний, що може надати інформацію щодо конструкції. Його перевага – у точності і однозначності визначення глибини конструкції у порівнянні з луна-методом, незважаючи на складність хвильових процесів, що виникають під час збудження хвиль. Також немає обмежень і на довжину елементів фундаменту.

Із недоліків слід зазначити відсутність інформації про незначні дефекти та складність реалізації, значну вартість та великі витрати часу на проведення обстеження.



Рис.1.23 Визначення довжини БНП існуючій будівлі, м. Київ.

1.2.4 Динамічні випробування паль

Сучасні динамічні методи випробування паль засновані на дослідженнях, розпочатих в 1960–1970 роках [53, 54] в Case Institute of Technology (нині Case Western Reserve University). Спочатку мета дослідження динамічних випробувань паль полягала в розробці методів оцінки несучої спроможності забивних паль. Задля цього при ударах молота, здійснюється вимірювання сили і прискорення у палі. Згодом застосування методів було розширено на оцінку інших аспектів системи паля-грунт. Спеціалізовані фірми [41, 42, 43] пропонують комп'ютеризовані системи для одночасного тестування якості стовбурів і визначення несучої спроможності бурових паль динамічним методом з використанням великий сили удару. Динамічний метод обстеження потребує спеціального обладнання і значної підготовки, тому він використовується лише для обстежень дослідних паль під великі навантаження, а також, як елемент контролю (моніторингу) під час технологічного процесу занурення залізобетонних паль і металевих труб, що забезпечує своєчасне виявлення дефектів [15, 51, 54 – 56].

Висновки до розділу 1

Виконані дослідження показали:

1. у всіх видах паль ФГЗ неможливо уникнути утворення різноманітних дефектів, тому що існує досить багато причин їхнього утворення, які не завжди можливо передбачити і врахувати;
2. задля діагностики паль використовуються, головним чином, акустичні методи, що мають переваги і недоліки. Однак розроблені на їхній основі прилади (системи), дають змогу виявляти найбільш критичні дефекти в палях;
3. задля комплексної оцінки технічного стану паль придатний лише динамічний метод, який має дуже низьку оперативність і високу собівартість;

4. імпульсний луно-метод з ударним збудженням пружних хвиль найбільш придатний для масового контролю палів, однак він потребує додаткових досліджень для визначення;

5. комплексний акустичний метод в деяких випадках залишається єдиним доступним методом для проведення обстежень.

Посилання: [1 – 61] див. список використаних джерел стор. 171 – 175.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДКРИТІЙ І ЗАНУРЕНІЙ У ҐРУНТ ПАЛІ, ЗА УДАРНОГО ЗБУДЖЕННЯ ХВИЛІ З ОДНОГО ТОРЦЯ

Розглянуто питання побудови математичних моделей відкритої і зануреної у ґрунт залізобетонних паль, де паля представляється як система з розподіленими параметрами, електричним аналогом якої є довга лінія. На основі аналізу цих моделей пропонується просторово-часова діаграма поширення хвилі стиску в багатошаровому лінійно-протяжному виробі (палі), яка дає змогу виконувати наступні задачі під час обстеженні паль:

- синтез (отримання сигналограми хвильового процесу по заданим параметрам палі);
- аналіз сигналограм, коли визначаються параметри палі (довжина, наявність дефектів та інш.).

За результатами комп'ютерного моделювання хвильових процесів в занурений у ґрунт палі, за змінних параметрах ударного імпульсу і різних характеристиках ґрунту, який оточує палю, встановлені граничні значення амплітуди імпульсної механічної сили, за якої починається пластична деформація ґрунту.

Запропоновано математичні моделі описання діагностичних сигналів, що водночас враховують як можливі види дефектів. За результатами їхнього аналізу обґрунтовано діагностичні ознаки, які надають можливість визначати технічний стан залізобетонних паль, занурених у ґрунт.

Основні результати, наведені в цьому розділі дисертації, опубліковані в роботах автора [1, 4, 7], а також у звіті про наукову роботу [49].

2.1 Обґрунтування вибору моделей, що характеризують діагностичні сигнали, що виникають за ударного збудження в палі

У відповідності з [62, 63, 83, 86], задля побудови математичних моделей діагностичних сигналів, в основному, використовуються два підходи, які базуються на використанні як детермінованих, так і статистичних методів.

Детерміновані методи передбачають використання як детермінованої функції часу математичну модель діагностичних сигналів. У цьому випадку повне описання діагностичного сигналу надають його амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристики, визначення яких у детермінованій постановці задачі і передбаченні лінійного перетворення виміряного сигналу, не викликає труднощів.

Детерміновані сигнали зручно розглядати як окремий (вироджений) випадок стохастичних процесів за умови, що дисперсія таких процесів прямує до нуля. Такий судження іноді зустрічаються як в теоретичних, так і прикладних наукових роботах [63].

Разом з тим, як справедливо стверджується у [63], застосування детермінованих методів під час описання діагностичних сигналів, не можна вважати задовільним і аргументованим, тому що переважна більшість вимірюваних процесів носить випадковий характер. Виходячи з цього, побудова інформаційно вимірювальної системи акустичної діагностики залізобетонних паль (ІВСАД ЗП), що базуються на статистичних методах, надає можливість за серією результатів вимірювального експерименту рекомендувати алгоритм, за яким обчислюється найкраще в імовірнісному сенсі наближення вимірюваного параметра. Крім того, під час використання таких методів в ІВСАД ЗП враховується міра неправильних рішень щодо технічного стану конструкцій, а також з'являється можливість оцінити середню кількість можливих невірних рішень, їхній розкид і ін. Доцільність і аргументованість саме статистичного підходу у процесі побудови математичних моделей діагностичних сигналів, а також програмного забезпечення для обробки

експериментальних даних у складі ІВС, підтверджується багаточисельними роботами зарубіжних та вітчизняних авторів [63, 67, 84, 85, 90 та ін.].

Невід'ємною частиною ІВСАД є безпосередньо сам об'єкт діагностики. Задля впевненого проведення діагностики залізобетонної конструкції, з одного боку, необхідно мати математичну модель, яка на підставі фізики явищ досить достовірно описувала б вимірювані процеси, що виникають в досліджуваній конструкції, а з іншого боку, потрібно мати у своєму розпорядженні ІВСАД, побудованої з урахуванням апіорних даних про інформаційні сигнали, які можуть бути отримані за результатами аналізу математичної моделі досліджуваних процесів. При цьому в хронологічному плані модель є первинною, а методи (детерміновані або статистичні), покладені в основу використовуваної ІВС, – вторинними, оскільки вони розробляються відповідно до обраної моделі.

На підставі аналізу ряду наукових робіт [62, 63, 84, 85, 90 та ін.], можна стверджувати, що під час створення ІВС акустичної діагностики залізобетонних паль необхідно використовувати статистичні методи обробки інформаційних сигналів, тобто в основу такої ІВСАД повинна бути покладена імовірнісна математична модель. Слід також зазначити, що побудова вказаної ІВСАД є комплексною задачею, яка включає в себе:

- розроблення математичних імовірнісних моделей інформаційних сигналів;
- теоретичне обґрунтування можливих діагностичних ознак на основі результатів дослідження розроблених математичних моделей;
- розробку програмно-технічного забезпечення ІВС діагностики;
- вибір діагностичних просторів і формування в них навчаючих сукупностей;
- побудову розв'язуючих правил з діагностики та класифікації конкретних видів дефектів у залізобетонних палях і конструкціях.

У відповідності зі створеними моделями діагностичних сигналів розроблювана ІВСАД повинна включати: основні програмно-технічні засоби; допоміжні засоби забезпечення і управління роботою основних засобів.

Перші призначені для вимірювання, обробки, аналізу і відображення інформації щодо стану об'єкта діагностування. Вони досить докладно розглянуті в численних літературних джерелах, наприклад [62, 63, 81, 84, 85, 90 та ін.].

Вибір засобів забезпечення і управління ІВС, що включають в себе інформаційно-довідкове, алгоритмічне (типові і спеціальні програми для ЕОМ) і метрологічне забезпечення, здійснюється з урахуванням об'єктів діагностики, апіорні відомості про яких дає їхня математична модель.

Алгоритмічне забезпечення визначає порядок функціонування основних програмно-технічних засобів. Воно має здійснювати спочатку формування, а потім вибір і порівняння відповідних навчаючих сукупностей, що враховують як можливі типи дефектів, так і особливості конструкцій.

Метрологічне забезпечення включає методику періодичної перевірки основних метрологічних характеристик ІВСАД. Визначальним моментом для розробки зазначеної методики є вибір класу тестових сигналів, який обумовлений математичною моделлю досліджуваних процесів.

Розробка інформаційно-довідкового забезпечення умовно може бути зведена [63, 68] до трьох основних етапів:

- визначенню кількісних оцінок границь діагностичних ознак, що відповідають різним технічним станам залізобетонних паль з урахуванням конструкційних особливостей;
- вибору діагностичних просторів і формуванням в них навчаючих сукупностей, які відповідають конкретним видам дефектів;
- побудови розв'язуючих правил з діагностики та класифікації конкретних видів дефектів у залізобетонних палях різного виду.

Рішення переліченого комплексу задач, пов'язаних з побудовою ІВСАД ЗП, нерозривно пов'язано з обраною математичною моделлю діагностичних

сигналів. Тому розробка і дослідження математичних моделей цих процесів є первинним під час створення будь-якої ІВС діагностики.

2.2 Математичні моделі відкритої та зануреної у ґрунт палі

У практиці неруйнівного контролю накопичено багатий досвід по застосуванню луна-методу з ударним збудженням пружних хвиль задля контролю і оцінки (тестування) якісних показників стовбура відкритих паль і занурених у ґрунт залізобетонних паль, стовпів, а в деяких випадках метод використовується, як складова технологічного процесу занурення паль [41, 74]. Проте фізичні основи методу ще не досить вивчені, тому актуальними є теоретичні й експериментальні дослідження хвильових процесів у стрижневих системах, що дозволять визначити роздільну здатність, автоматизувати процес аналізу результатів випробувань і створити метрологічне забезпечення луна-методу.

Сьогодні існують декілька підходів до утворення і розповсюдження хвильових процесів у занурених у ґрунт об'єктах, які мають кінцеві розміри. Типовими, під час проведення таких досліджень є детерміновані та статистичні підходи, в основу яких покладено відповідні моделі. Коротко зупинимося на їхньому розгляді.

Детерміновані моделі. У відомих схемах дефектоскопії [17, 20, 22, 25] збудник і приймач пружних хвиль встановлюються на одному торці випробуваної конструкції. Імпульсне ударне збудження (зондувальний імпульс) стискає шар, що прилягає до площини нанесення удару, і надає йому швидкість, а виникаючі сили пружності стискають наступний шар. Таким чином, рух і деформація передаються від шару до шару у вигляді хвилі стиску, яка за поширення відбивається від неоднорідностей у конструкції та її кінця. Зондувальний і відбитий імпульси приймаються приймачем пружних хвиль й та перетворюються в електричні сигнали. Миттєві значення цих сигналів, пропорційні швидкості переміщення крайнього шару, фіксуються у функції часу комп'ютером у вигляді реалізації хвильового процесу. Проаналізувати

хвильовий процес у стрижневій конструкції з бетону складна задача, тому що в ній можливо одночасне утворення й існування декількох типів хвиль (поздовжні, поперечні, поверхневі хвилі Релея й т.ін.), які так взаємозалежні, що не завжди вдається розмежувати, яка частина енергії збудження випромінюється у вигляді того або іншого хвильового руху. При цьому бетон має високі питомі внутрішні втрати, і закон Гука для нього може бути застосовано лише у першому наближенні. Тому задля побудови хвильових моделей відкритої й зануреної в ґрунт залізобетонних паль прийняті деякі допущення.

1. Поводження бетону в палях описується згідно з моделлю тіла Кельвіна-Фойгта [55-60], для якої за деформації ε напруга σ визначається як сума пружної й в'язкої складових

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (2.1)$$

де E и η – модуль пружності та коефіцієнт в'язкості матеріалу. Під час розгляду механічного поведження тіла, яке описується рівнянням (2.1), зручніше користуватися еквівалентною комбінацією пружини й поршня, з'єднаних паралельно. Якщо до тіла Кельвіна-Фойгта в момент часу $t = 0$ прикладено постійну напругу σ , то деформація зростає за законом

$$\varepsilon = \sigma / E (1 - e^{-t/\alpha}), \quad (2.2)$$

де $\alpha = \eta / E$ – постійна часу. За $t \rightarrow \infty$ – $\varepsilon \rightarrow \sigma / E$, тобто до статичного подовження пружини.

Якщо напруга знімається, то ε убиває за експонентним законом. Вплив дисипативних напруг на поширення хвиль розширення в палі може бути розглянуто на найпростішому випадку поширення хвиль розширення в тонких стрижнях. Приймаючи вісь палі за вісь x , введемо позначення U – зсув часток, через σ – напруга в точці з абсцисою x у момент часу t . Тоді рівняння руху буде наступним:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad (2.3)$$

де ρ – щільність матеріалу.

Підставивши значення напруження з рівняння (2.1) і врахувавши, що $\varepsilon = \partial u / \partial x$, отримаємо:

$$\rho = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (2.4)$$

або

$$\frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}, \quad (2.5)$$

де $C_0^2 = E / \rho$ – швидкість пружних хвиль в стержні.

Для синусоїдальних хвиль з початковою амплітудою A і частотою $\omega / 2\pi$ рішення рівняння (2.5) має вигляд:

$$u = A \cdot e^{-\beta^* x} \cdot \sin \left[j\omega \left(t - x / C_\phi \right) \right], \quad (2.6)$$

де C_ϕ і β^* – фазова швидкість хвилі і показник затухання хвилі, відповідно.

Виходячи з моделі Кельвіна-Фойгта для бетонної палі вводиться "просторовий" коефіцієнт загасання

$$\beta = 1 / 2l \cdot \ln A_1 / A_2, \quad (2.7)$$

де l – довжина конструкції; A_1 і A_2 – амплітуда зондувального й першого донного імпульсів.

2. Середовище, що оточує палю, не спотворює хвильові процеси в ній.

3. Опір ґрунту по лобовій і бічних поверхнях палі, що перебуває в землі, має пружно-грузлий характер.

Паля представляється одномірним хвилеводом, у якому без перекручування по всій довжині поширюється тільки поздовжня хвиля (розтягання-стиску) із плоским переднім фронтом і постійною швидкістю C_0 , рівній груповій [57-58]. Відомо, що швидкість пружної хвилі в стрижневій системі залежить від частоти коливань або довжини хвилі й діаметра стрижня. У результаті дисперсії швидкості в стрижні одночасно утворюється фазова швидкість поширення фази хвилі C_ϕ та групова швидкість імпульсу C_0 , зв'язані між собою залежністю [57-58]:

$$C_0 = C_\phi - \lambda \frac{dC_\phi}{d\lambda}. \quad (2.8)$$

Неспотворене поширення імпульсу по стрижневій конструкції з постійною швидкістю $C_0 = \sqrt{E/\rho}$ буде за умови:

$$0,1 < d/\lambda \leq 0,5. \quad (2.9)$$

Тут d – діаметр або найменший поперечний розмір перетину конструкції, $\lambda = C_0/f$ – довжина хвилі, f – верхня гранична частота групи синусоїдальних складових зондувального імпульсу. Аналіз амплітудних спектрів імпульсів [65], що мають дзвін-подібну форму, показав, що довжину хвилі можна приймати рівній подвоєній зоні стиску, тобто $\lambda' = 2C_0\tau$, де τ – тривалість імпульсу. Тоді для конструкцій, виконаних з бетону класів В15-В25 за $d=0,3\div 0,8$ м ($C_0=3000\text{--}4200$ м/с) тривалість зондувального імпульсу становить 150-550 мкс.

За такої тривалості імпульсу мікро неоднорідний за структурою бетон можна вважати однорідним матеріалом, тому що геометричні розміри великої кількості неоднорідних заповнювачів, рівномірно розподілених по тілу, значно менше довжини хвилі. У цьому випадку конструкція характеризується акустичним або хвильовим опором:

$$R_a = \rho C_0 / S, \quad (2.10)$$

де: S – перетин хвилеводу, $R_{ay} = \rho C_0$ – акустична жорсткість, рівна $10,8 \cdot 10^5$ Па•с/м – для бетону класу В25 і вище, $(2,8\div 5) \cdot 10^5$ Па•с/м – для бетону класу В15 і нижче, $1,49 \cdot 10^5$ Па•с/м – для води, 43 Па•с/м – для повітря. У цих умовах перешкода будь-якої форми на шляху хвилі в конструкції з постійним хвильовим опором можна розглядати як плоско-паралельний шар, якщо ширина шару (ділянки), на якому відбувається зміна хвильового опору, менше зони стиску. Тоді має сенс коефіцієнти відбиття V і переломлення W визначаються за відомими формулами Френеля у разі нормального падіння плоскої хвилі на плоску перешкоду:

$$V = \frac{R'_a - R_a}{R'_a + R_a}; \quad W = \frac{2R'_a}{R'_a + R_a}. \quad (2.11)$$

Тут R_a и R'_a – хвильові опори на бездефектному й дефектному шарі. Переломлюючись, хвиля стиску не змінює свого напрямку, а за кожним черговим відбиттям знак напрямку хвилі завжди змінюється. У випадку наявності вільного кінця або за $R'_a < R_a$, коли коефіцієнт відбиття має негативне значення, хвиля відбивається у вигляді подібної до неї хвилі розтягування й, навпаки, за $R'_a > R_a$, – у вигляді хвилі стиску. У разі поширенні хвилі стиску в одновірному середовищі слід розрізняти два явища: поширення хвилі зі швидкістю C_0 і рух часток у зоні стиску, швидкість яких пропорційна напрузі (σ_x) фронту хвилі

$$C_x = C_0 \sigma_x / E. \quad (2.12)$$

Для хвилі стиску напрямок руху (швидкості) часток збігається з напрямком поширення хвилі. Якщо вихідний напрямок руху часток крайнього шару, на якому встановлені випромінювач і приймач пружних хвиль, у момент порушення хвилі прийняти позитивним, то знак наступних переміщень можна визначити за добутком знаку напрямку хвилі на знак коефіцієнта відбиття або переломлення. Знак EPC приймача пружних хвиль, що реєструє деформацію крайнього шару, залежить від напрямку руху часток, а амплітуда – від швидкості їхнього переміщення.

За прийнятих допущень модель палі представляється як система з розподіленими параметрами (рис. 2.1.а), що складається з n -ої кількості шарів із зосередженими масами m , зв'язаними між собою й ґрунтом невагомими пружно-грузлими зв'язками E і η . Якщо паля перебуває в землі (рис. 2.1.б), то у разі її поздовжнього зсуву виникають пружно-грузлі сили реакції ґрунту E' і η' , пропорційні величині і швидкості зсуву шарів щодо ґрунту [61–64]. Електричним аналогом такої механічної хвильової моделі є довга лінія [66]. В електричній моделі системи (рис. 2.2) параметри індуктивності L , омичного опору R і електричної ємності C імітують відповідно масу, грузле тертя й пружність у палі на довжину шару, а пружність і в'язкість ґрунту – C'_l і R'_l . Для

електричній моделі палі хвильовий опір ланки лінії є комплексною функцією від кутової частоти ω [67–69].

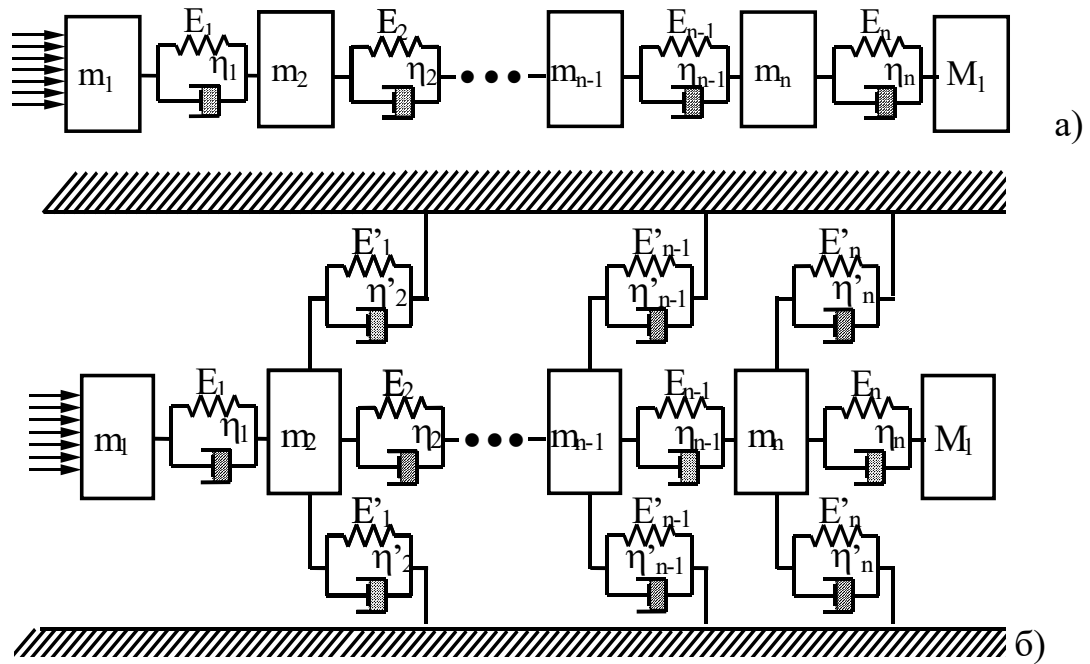


Рис. 2.1 Механічні хвильові моделі відкритої (а) і зануреної у ґрунт (б) бетонної палі.

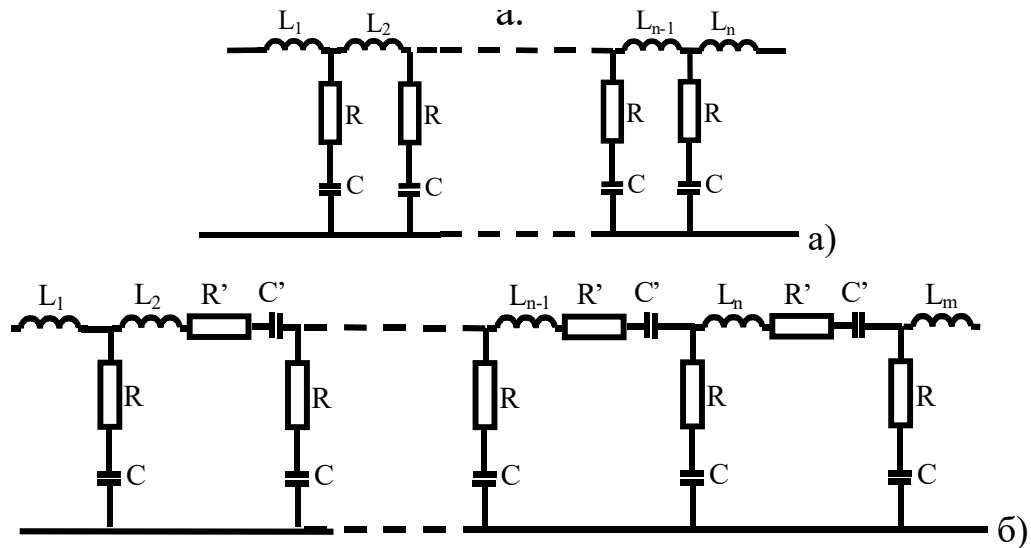


Рис. 2.2 Електричні хвильові моделі відкритої (а) і зануреної у ґрунт (б) бетонної палі.

$$Z_e = \sqrt{Z_c/Y} = \sqrt{L/C + jR\omega L}, \quad (2.13)$$

де Z_c и Y – характеристичний опір і комплексна провідність одиниці довжини відповідно. Якщо матеріал палі однорідний (C и $R - const$) і по довжині змінюється тільки поперечний переріз, тоді модуль хвильового опору буде змінюватися по довжині пропорційно перетину. Тому на фіксованих частотах під час визначення коефіцієнтів відбиття й переломлення від місць зміни перетину можна користуватися формулами (2.11), оперуючи в них тільки модулями хвильових опорів. При цьому коефіцієнт відбиття не залежить від частоти, й у разі відбитті форма імпульсу не буде змінюватися. Аналітичний опис послідовних багаторазових відбиттів у системі з розподіленими параметрами досить складний. Тому у роботі використовується просторова тимчасова діаграма або "Сітка Бьюлей" [66].

По осі абсцис просторово-часової діаграми (Рис. 2.3) відкладається довжина виробу й позначено умовно границі розділів шарів з опорами ($R_1...R_n$), а по осі ординат у масштабі – час ($t_1..., t_m$) приходу хвиль до границі розділу шарів. Збуджена на нульовій границі пружна хвиля поступово проходить через границі розділу шарів. Якщо хвильові опори по сторонах границі розділу різні, то на цій границі виникає відбита й переломлена хвилі. Миттєві значення цих хвиль дорівнюють миттєвому значенню вихідної (падаючої) хвилі, помноженому на просторовий коефіцієнт загасання й, відповідно, на коефіцієнти відбиття або переломлення. Ці ново утворені хвилі, досягнувши на своєму шляху чергової границі розділу з різними значеннями хвильових опорів шарів, знову породжують по дві складові хвилі – відбиту та переломлену.

Так як у луна-методі деформація матеріалу виробу лінійно залежить від напруги хвилі, то під час дослідження поширення хвиль застосуємо принцип суперпозиції. Тоді миттєві значення хвиль деформації, що поширюються в прямому й зворотному напрямках (позначені на рис. 2.3 через A_{nm} і A'_{nm} для n -го шару границі розділу шарів) в m -ий момент часу, можна виразити наступними рівняннями:

$$A_{(n+1)(m+1)}^- = [A_{nm}^- \cdot W_n^- \pm A'_{(n+1)m}^- \cdot V_n^-] \cdot \beta;$$

$$A'_{n(m+1)} = [A'_{(n+1)m} \cdot W'_n \pm A_{nm} \cdot V'_n] \cdot \beta \quad (2.14)$$

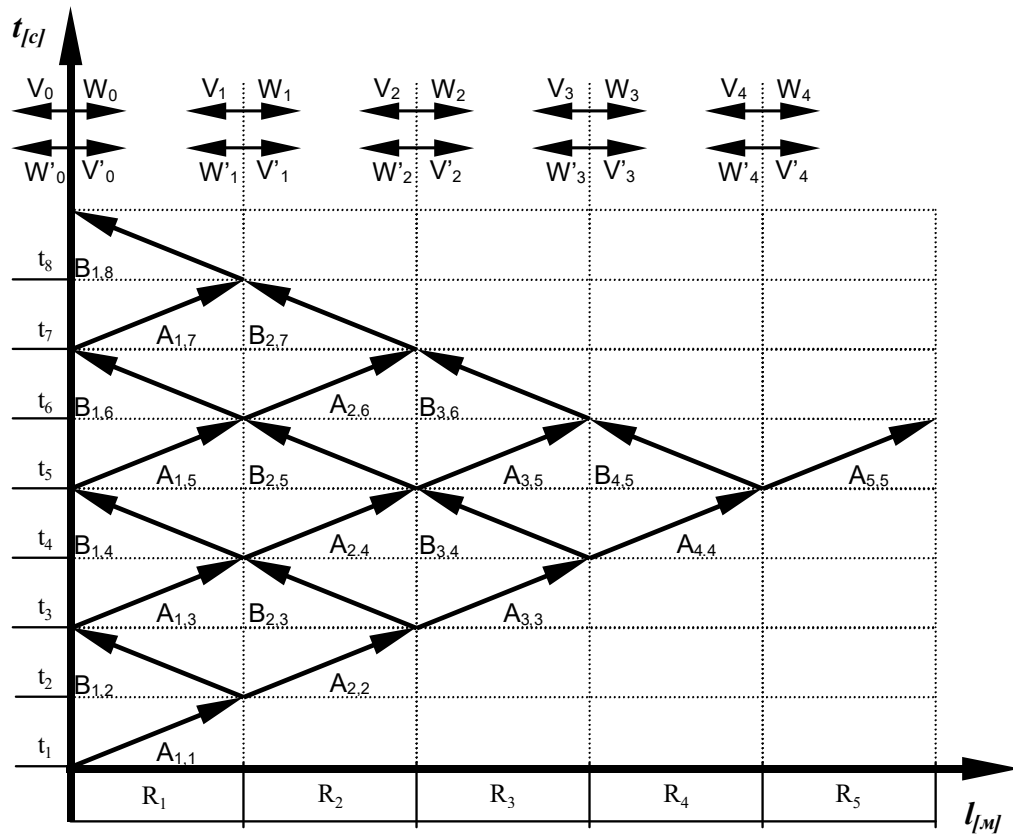


Рис. 2.3 Просторово-часова діаграма поширення хвилі стиску в багатошаровому лінійно-протяжному виробі: A і A' – миттєві значення хвиль, що поширюються в прямому й зворотному напрямках; V' і W – показники відбиття й переломлення хвиль, що приходять до границі розділу шарів ліворуч; V і W' – показники відбиття й переломлення хвиль, що приходять до границі розділу шарів праворуч; $R_1 \dots R_5$ – хвильові опори

Миттєве значення хвилі, що повертається назад до нульової границі розділу R_0 в m -ий момент часу, виражається рівнянням:

$$A'_{1,m} = [A'_{2(m-1)} \cdot W' \pm A_{1(m-1)} \cdot V'_1] \cdot \beta \quad (2.15)$$

Якщо за відомих параметрів An , V , W і β вирішити систему рівнянь щодо миттєвих значень відбитих хвиль, що прийшли назад у перший шар у різні моменти часу, а потім зробити підсумовування хвиль, зрушуючи в часі кожен чергову хвилю на подвійний час пробігу по шару, то отриманий у такий спосіб

графік $A'(t)$ буде тією реалізацією хвильового процесу, яку приймає і реєструє апаратура забезпечення луна-методу.

Таку задачу назвемо "прямим" завданням або синтезом сигналограми. Якщо в системі задати миттєві значення сигналограми й просторовий коефіцієнт загасання, то вирішивши систему щодо коефіцієнта відбиття, можна визначити хвильові опори шарів, що є кінцевою метою даної роботи – аналіз сигналограм або зворотне завдання [61].

Безпосереднє рішення системи рівнянь прямої і зворотної задач за великої кількості шарів досить громіздко, тому довжина шару при синтезі й часовий "крок" при аналізі сигналограм вибираються виходячи з необхідної точності.

Під час рішення прямої задачі було створено базу даних типових сигналограм хвильових процесів, що відповідають різним варіантам розподілу хвильових опорів по довжині стовбура бетонної паль.

2.3 Стохастичні моделі

У попередньому розділі запропоновано та проаналізовано механічну (рис. 2.1, а і б) та електричну (рис. 2.2, а і б) моделі відкритої та зануреної у ґрунт залізобетонних паль.

За прийнятих допущень, та базуючись на методі електромеханічних аналогій [67-69], модель палі представляється як система з розподіленими параметрами (рис. 2.1, а), що складається з n -ої кількості шарів із зосередженими масами m , зв'язаними між собою й ґрунтом пружно-грузлими зв'язками E і η . Якщо паля перебуває в землі (рис. 2.1, б), то під час її поздовжнього зсуву виникають пружно-грузлі сили реакції ґрунту E' і η' , пропорційні величині й швидкості зсуву шарів щодо ґрунту. Електричним аналогом такої механічної хвильової моделі є довга лінія. В електричній моделі системи (рис. 2.2) параметри індуктивності L , омичного опору R і електричної ємності C імітують відповідно масу, грузле тертя й пружність у палі на довжину шару, а пружність і в'язкість ґрунту імітують C'_l і R'_l .

Таким чином, на основі зроблених припущень, прийнятих під час побудови детермінованих моделей хвильових процесів у зануреної у ґрунт палі, останню можна розглядати як об'єкт, що складається з певним чином з'єднаних RLC -контурів, з'єднаних певним чином.

У відповідності з [60-67], під час ударного впливу на таку систему, її відгук має багаторезонансний характер, оскільки залізобетонну палю занурену у ґрунт можна розглядати як багато резонансну систему певним чином зв'язаних RLC -контурів. Як відомо [70, 71, 72], такі системи характеризуються вектором імпульсних перехідних функцій з компонентами

$$\varphi_j(\tau) = \frac{\omega_j^2}{\psi_j} \cdot e^{-\beta_j \tau} \cdot \sin(\psi_j \tau) \cdot U(\tau), \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.16)$$

де

$$\psi_j = \sqrt{\omega_j^2 - \beta_j^2}, \quad \omega_j = \frac{1}{\sqrt{L_j C_j}}, \quad \beta_j = \frac{R_j}{2 L_j} > 0, \quad \omega_j > \beta_j,$$

а $U(x)$ – нормалізована функція Хевісайда.

Віб्राції в точці розміщення акселерометра в сталому режимі можна розглядати як суму випадкових процесів [70,71], що надходять у цю точку по різних каналах поширення у палі, що діагностується, тобто

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^n a_j \xi_j(t), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad (2.17)$$

де n – деяке додатне ціле число, обумовлене конструктивними, технологічними й експлуатаційні характеристиками палі, що діагностується і у якій поширюється вібраційна хвиля;

a_j – вагові коефіцієнти, що враховують згасання вібраційної хвилі по відповідному каналу.

Як правило, числом n визначається кількість резонансів у досліджуваній палі.

У розглянутому випадку кожна компонента-відгук, яка пов'язана з певним каналом поширення і входить як доданок у (2.17), може бути

представлена в усталеному режимі у вигляді лінійного випадкового процесу (ЛВП) [60,61]:

$$\xi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(t-\tau) d\eta_j(\tau), \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.18)$$

де функції $\varphi_j(\tau)$, $\tau \in (-\infty, \infty)$ визначаються з (2.16) для всіх компонент;

$\{\eta_j(\tau), j = \overline{1, n}\}$ – вектор породжуючих процесів з незалежними приростами, похідні компонент якого впливають на входи досліджуваного об'єкту.

При цьому передбачається, що компоненти вектору породжуючого процесу або стохастично зв'язані, або цей зв'язок настільки сильний, що їх можна розглядати як стохастично еквівалентні.

Таким чином, розгляд сумарного процесу вібрацій у точці реєстрації здійснюється відповідно до резонансних властивостей кожного каналу в коливальній системі, у вигляді якої представляється діагностичний об'єкт.

У рамках енергетичної теорії розглянемо деякі характеристики процесу (2.17) з урахуванням виразу (2.18).

На підставі викладок, наведених у [70, 72], кореляційна функція процесу (2.17) запишеться в такий спосіб:

$$R(s) = \sum e^{-\beta_j |s|} [A_{jn} \cos \psi_j s + \sin \psi_j |s|] \quad \text{для всіх } s \in (-\infty, \infty), \quad (2.19)$$

де

$$A_{jn} = \frac{a_j \omega_j^2}{2\psi_j} \sum_{k=1}^n \frac{a_k \omega_k^2 a_{kj}}{\psi_k} \kappa_{2kj} \geq 0, \quad B_{jn} = \frac{a_j \omega_j^2}{2\psi_j} \sum_{k=1}^n \frac{a_j \omega_k^2 b_{kj}}{\psi_k} \kappa_{2kj};$$

a_j, a_k – вагові коефіцієнти для j -го і k -го входів:

$$a_{kj} = \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \tilde{\psi}_{kj}^2} - \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \psi_{kj}^2} \geq 0;$$

$$\beta_{kj} = \frac{\tilde{\psi}_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \tilde{\psi}_{kj}^2} + \frac{\psi_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \psi_{kj}^2};$$

$$\beta_{kj} = \beta_k + \beta_j; \quad \psi_{kj} = \psi_k + \psi_j; \quad \tilde{\psi}_{kj} = \psi_k - \psi_j,$$

κ_{2kj} – змішаний другий семіінваріант випадкових величин $\eta_k(1)$ і $\eta_j(1)$, $\kappa_{2kj} = \kappa_2[\eta_k(1)\eta_j(1)]$, так що при $k=j$ він переходить у звичайну дисперсію відповідної величини.

Процес (2.17) є стаціонарним і гільбертовим, $R(0) < \infty$, тому для нього існує спектральна щільність, що визначається як косинус-перетворення Фур'є згідно [70-72] з урахуванням (2.19) у вигляді

$$S(\omega) = \sum \frac{A_{jn} \beta_j (\omega_j^2 + \omega^2) + \beta_{jn} \psi_j (\omega_j^2 + \omega^2)}{(\omega_j^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \psi_j^2}. \quad (2.20)$$

Функція (2.19) і спектральна щільність (2.20) процесу визначаються параметрами ψ_j , і β_j , $j = \overline{1, n}$, які можна використовувати для дослідження характеру вібрацій вузла, що діагностується. Зокрема, як впливає з досліджень, розглянутих у роботах [63, 70, 73, 74], їх можна використовувати як діагностичні ознаки задля визначення ряду дефектів.

Логарифм одновимірної характеристичної функції процесу (2.17) у припущенні, що всі компоненти вектору породжуючого процесу стохастично еквівалентні, можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \ln f_{\xi}(u) = ium \sum_{j=1}^n a_{jn} + \\ + \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} [\exp(iux \sum_{j=1}^n a_{jn} \varphi_j(\tau)) - 1 - iux \sum_{j=1}^n a_{jn} \varphi_j(\tau)] \frac{dK(x)}{x^2} d\tau, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де параметри m і $K(x)$ – відповідно [60, 62].

Вираз (2.21) дозволяє за відомими характеристиками породжуючого процесу з використанням перетворення Фур'є-Стільтьєса обчислювати значення функції розподілу ймовірностей процесу (2.17).

З використанням виразів (2.19) і (2.20) проілюструємо характер зміни кореляційної функції і спектральної щільності потужності процесу (2.17) для стовбурів, що діагностуються, за наявності в них одного і декількох резонансів.

Під час проведення моделювання з метою встановлення діагностичних ознак варто враховувати, що зміна мас m_j , пружних зв'язків c_j' і тертя r_j в механічній схемі палі, відповідає зміні індуктивностей L_j , ємностей C_j і опорів R_j у еквівалентній електричній схемі цього вузла. Зміна пружних зв'язків обумовлена зміною геометричних розмірів чи фізичних властивостей шарів палі, а також зміною властивостей ґрунту, що оточує палю. Збільшення діаметра палі, а також зміна пластності ґрунту викликає відповідну зміну величини тертя.

Зрештою зміна величин цих параметрів призводить до зміни характеристик вібраційних процесів, що спостерігаються в точках розміщення акселерометрів на поверхні палі. Отже, параметри L_j, C_j, R_j в еквівалентній електричній схемі можуть виступають як діагностичні ознаки технічного стану улаштуваннях бетонних паль в ґрунті при проведенні їхньої діагностики.

Проте, безпосередньо виміряти й оцінити ці параметри, які характеризують шар палі, що власне діагностується, через його багатовимірну імпульсну перехідну функцію не завжди вдається. Тому про наявність тих або інших дефектів судять за деякими характеристиками спостережуваного вібраційного процесу, що характеризується моделлю (2.17).

На прикладі розгляду математичних моделей для однорезонансної коливальної системи розглянемо питання обґрунтування діагностичних ознак задля визначення технічного стану залізобетонних паль.

Найбільш доступну та в той же час достатньо повну інформацію задля вирішення задач діагностики містять кореляційна функція (2.19) та спектральна щільність (2.20). У цих виразах компоненти вектору $\psi_j, j=\overline{1,n}$ являють собою резонансні частоти, так як вони визначають положення максимумів спектру, а компоненти вектору $\beta_j, j=\overline{1,n}$ - коефіцієнти згасання. Таким чином, автокореляційна функція (2.19) та спектральна щільність (2.20) процесу (2.17) повністю визначаються параметрами ψ_j , та $\beta_j, j=\overline{1,n}$. В даному випадку ці

параметри можна використати як діагностичні ознаки задля визначення певних дефектів у залізобетонних палях.

Зупинимось на питанні статистичної оцінки цих параметрів. Як показали результати експериментів, кореляційна функція відгуку палі, на збудження вібраційною ударною хвилею має експоненційно-синусоїдальний вигляд. Необхідно за визначеній експериментально кореляційній функції $R(s)$ знайти параметри, які б можна було використати як діагностичні ознаки.

Значення резонансних частот можна визначити наближено за оцінки спектральної щільності (2.20). Таким чином можна робити у випадку, коли спостерігається багато яскраво виражених резонансних максимумів. Точніше можна визначити ці параметри за допомогою ПЕОМ під час розв'язку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які отримуємо за різних значеннях s з (2.19) або при різних значеннях ω з (2.19). Зручно в якості таких значень вибрати точки екстремуму або нулі вихідних функцій.

У випадку, коли спектральна щільність потужності процесу має тільки один яскраво визначений максимум за умови, що інші практично незначущі (тобто в (2.17) можна аргументовано прийняти $n = 1$), (2.19) представимо у вигляді

$$R(s) = R(0) \hat{R}(s), \text{ де } R(0) = \frac{a_1^2 \chi_2 \omega_1^2}{4\beta_1};$$

$\hat{R}(s)$ - нормована кореляційна функція.

$$\hat{R}(s) = e^{-\beta_1 |s|} \left(\cos \psi_1 s + \frac{\beta_1}{\psi_1} \sin \psi_1 |s| \right). \quad (2.22)$$

На рис.2.4а наведено нормовану кореляційна функцію за $a \geq 0$ для випадку одного резонансу. Точки екстремумів функції (2.22) легко можна знайти диференціюванням. Їх нескінченна множина. Позначимо їх через

$s_j, j = 1, 2, 3, \dots$, причому $s_j = \frac{\pi j}{\psi_1}$. Тому як статистичну оцінку $\tilde{\psi}_1$ можна вибрати лінійну оцінку $\tilde{s}_j$ у вигляді

$$\tilde{\psi}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\pi j}{s_j},$$

де n - об'єм випадкової вибірки $\{\tilde{s}_j, j = \overline{1, n}\}$.

Побудувати оцінки коефіцієнта затухання β_1 можна наступним чином. З (2.22) видно, що

$$\hat{R}(s_j) = (-1)^j e^{-\beta_1 s_j} \quad \text{за } s_j > 0, j = 1, 2, \dots$$

Тому як статистичну оцінку β_j візьмемо середнє арифметичне

$$\tilde{\beta}_1 = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\ln[(-1)^j \hat{R}(s_j)]}{\tilde{s}_j},$$

де $\hat{R}(s_j), j = \overline{1, n}$ - оцінки експериментальних значень кореляційної функції (2.22).

Нормована спектральна щільність потужності у випадку $n=1$ у відповідності з (2.20) і за припущенням, що $S(\omega) = S(0) \hat{S}(\omega)$, дорівнює

$$\hat{S}(\omega) = \frac{\omega_1^4}{(\omega_1^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \psi_1^2},$$

де $S(0) = a_1^2 \chi_2$.

Характер зміни цієї функції показаний на рис. 2.4 б. За $2\psi_1^2 > \omega_1$ вона досягає в точці $\omega_m = \sqrt{2\psi_1^2 - \omega_1^2} = \sqrt{\omega_1^2 - 2\beta_1^2}$ максимуму, значення якого $\hat{S}(\omega_m) = \frac{\omega_1^2}{4\psi_1^2 \beta_1^2}$.

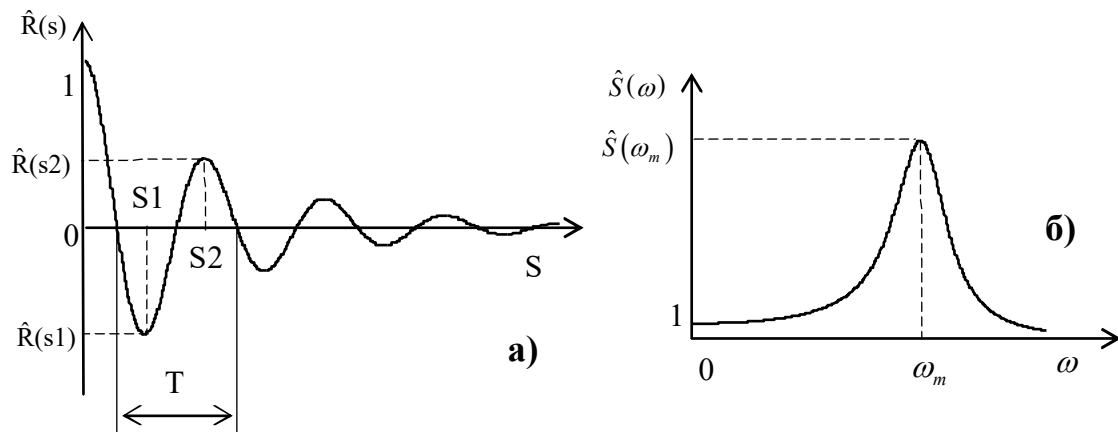


Рис. 2.4 Нормована кореляційна функція

В коливальному режимі за малих затуханнях, тобто за $\beta_1 \rightarrow 0$, маємо $\psi_1 \rightarrow \omega_1$ та $\omega_m \rightarrow \psi_1$, а $\hat{S}(\omega_m) \rightarrow \infty$.

Якщо побудувати статистичну оцінку спектральної функції, по ній можна оцінити значення параметрів ψ_1 та β_1 , виходячи з наведених вище виразів і враховуючи, що $\omega_1^2 = \psi_1^2 + \beta_1^2$. Для цього необхідно оцінити ω_m та $S(\omega_m)$, а також рішити систему двох рівнянь.

Як вже вказувалося, точне вирішення задачі статистичного оцінювання β_j та ψ_j занадто громіздке. Припускаючи, що породжуючі процеси для резонансних частот некорельовані, тобто $\chi_{2kl} = 0$ при $k \neq j$, (2.19) приймає вигляд

$$R(s) = \sum_{j=1}^n \frac{a_j^2 \chi_{2jj} \omega_j^2}{4\beta_j} e^{-\beta_j |s|} \left(\cos \psi_j s + \frac{\beta_j}{\psi_j} \sin \psi_j |s| \right) \quad (2.23)$$

а за $s \geq 0$

$$R'(s) = - \sum_{j=1}^n \frac{a_j^2 \chi_{2jj} \omega_j^2}{\psi_j} e^{-\beta_j |s|} \cdot \sin \psi_j |s| \quad (2.24)$$

В цьому випадку у відповідності з (2.20) спектральна щільність потужності має вигляд

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^n \frac{a_j^2 \chi_{2jj} \omega_j^2}{(\omega_j^2 + \omega^2) - 4\omega^2 \psi_j^2} \quad (2.25)$$

Маючи значення $R(s)$ та $S(\omega)$ при різних значеннях s і ω , можемо побудувати по (2.23) – (2.25) систему лінійно незалежних рівнянь, до яких в них входять невідомих числових параметрів, а також оцінки β_j і ψ_j , $j = \overline{1, n}$.

За малих β_j значення резонансних частот ψ_j можна наближено визначити по максимумам на спектральній щільності потужності (2.25).

Як відомо [70, 73], ефективне вирішення задачі діагностики певних видів дефектів технічних об'єктів можливе тільки за умови попереднього формування так званих навчаючих сукупностей, або банку даних. Основою для побудови такого банку служать запропоновані за результатами аналізу моделей

досліджуваних об'єктів діагностичні параметри, за якими і формуються навчальні сукупності, що відповідають певним технічним станам цих об'єктів.

У нашому випадку для створення банку даних для певних видів дефектів у різних палях будуть використані часові і спектральні характеристики вібраційних сигналів, основними з яких є β_1 – просторові коефіцієнти загасання; ψ_1 – основні частоти максимумів спектрограми сигналу.

Саме за результатами багаточисельних експериментів з вимірювання статистичних оцінок запропонованих діагностичних ознак будуються навчаючі сукупності, що відповідають умовно справному стану та певним дефектам, що можливі у досліджуваній палі.

2.4 Комп'ютерне моделювання хвильових процесів у бетонній палі, що занурена в ґрунт, за дії зовнішньої імпульсної сили

Під час діагностики бетонної палі як на наявність внутрішніх дефектів, так із метою визначення її несучої спроможності, до її торцевої поверхні прикладається імпульсна сила малої або великої амплітуди та вимірюються швидкість та прискорення цієї поверхні як функції часу. Задля моделювання хвильових процесів в палі, що виникають під дією такої імпульсної сили, найпоширеніша модель є модель із зосередженими параметрами [63]. В рамках цієї моделі (див. рис. 2.5 а) паля можна представити у вигляді сукупності пов'язаних між собою зосереджених елементів масою m_k , де k - номер елемента, та розміщених вздовж палі. Між елементами існує в'язко-пружний зв'язок, обумовлений внутрішніми властивостями бетонної палі. Ці елементи, на ділянці палі, зануреної у ґрунт, мають поверхневий контакт із ґрунтом, що призводить до дії додаткових сил. В разі, коли просторове зміщення цих елементів не перевищує 2 – 3 мм [78], ці контактні сили можуть моделюватися як в'язко-пружний зв'язок між поверхнею палі та ґрунтом. За більших значень зміщення поверхні палі відносно ґрунту необхідно враховувати його пластичні властивості, що обумовлює необхідність вирішувати при цьому хвильову задачу у нелінійній постановці. На рис. 2.5,б показано імпульсну силу, що діє

на верхній елемент палі та в'язко-пружні сили, які діють на нижній елемент палі та моделюють опір ґрунту, діючий на нижній торець палі.

В даній роботі розглядається лінійна в'язко-пружна модель як для матеріалу палі, так і для ґрунту, в який вона занурена. Це справедливо, як вже було сказано, за переміщення елементів пал, що виникають під дією зовнішньої сили, менше ніж 2 мм. Таку лінійну модель для розрахунку хвильових процесів наведено на рис. 2.5,б.

Задля розрахунку параметрів механічної моделі (рис. 2.5.б) використовувалися наступні вирази [78, 81]:

$$\begin{aligned} k_p &= E_p S / l \text{ [Н/м]}, \quad c_p = \eta_p S / l \text{ [кг/с]}, \\ k &= 2.3 G_s \text{ [Н/м}^2\text{]}, \quad c = 2\pi\rho_s V_s a \text{ [кг/м}\cdot\text{с]}, \quad K = 4G_s a / (1 - \nu_s) \text{ [Н/м]}, \\ C &= 0.85 K a / V_s \text{ [кг/с]}, \quad G_s = E_s / (2(1 + \nu_s)) \text{ [Н/м}^2\text{]}, \quad V_s = \sqrt{G_s / \rho_s} \text{ [м/с]}, \end{aligned}$$

де a – радіус перетину палі, $S = \pi a^2$, l – відповідно площа перетину палі та довжина елемента із масою m_k , E_p, η_p – модуль Юнга та коефіцієнт в'язкості матеріалу палі (бетону), E_s, ν_s, ρ_s – модуль Юнга, число Пуассона та щільність ґрунту.

Задля комп'ютерної реалізації такої моделі, що відображає розповсюдження імпульсних хвиль в об'ємі палі та в прилежному ґрунті, в даній роботі використовувався пакет програм Matlab/Simulink та метод електромеханічної аналогії, який дає змогу використовувати апарат теорії електричних кіл для моделювання таких механічних хвильових процесів.

Використовуючи основні положення цього методу електромеханічної аналогії [79, 80] та методи теорії мультифізичних еквівалентних кіл [82] механічній схемі на рис. 2.5,б можна поставити у відповідність еквівалентне електричне коло, що містить каскадно-з'єднані RLC-кола, схему якого наведено на рис. 2.6, а. Таке коло дає змогу моделювати механічні процеси в силу існуючої електромеханічної аналогії між механічними величинами – сила і швидкість – та електричними величинами – струм і напруга.

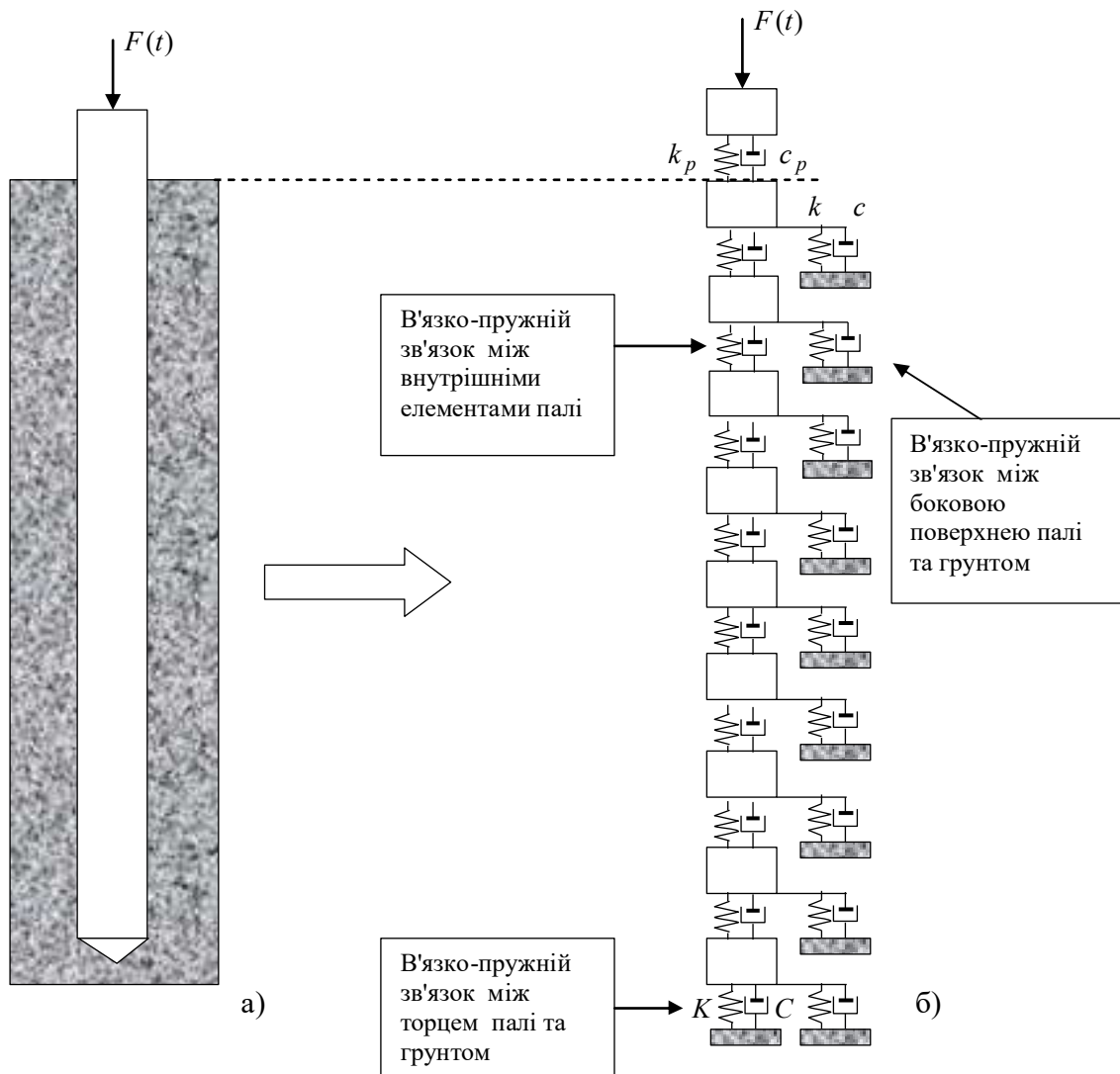


Рис. 2.5 Схематичне зображення палі, зануреної у ґрунт а), та її хвильова механічна модель для дослідження реакції палі на дію зовнішньої імпульсної сили $F(t)$

Відповідно до цієї моделі палю можна представити у вигляді послідовно розташованих зосереджених елементів з масою m_k , $k=1, \dots, N$ де N – загальна кількість елементів. Ці елементи з'єднуються між собою за допомогою пружних зв'язків із демпфуючими елементами, які відображаються як індуктивності та резистори, як показано на рис. 2.6, г. Для моделювання з високою точністю процесу поширення акустичної хвилі довжиною λ вздовж палі за явності дефектів в її об'ємі, довжина кожного елемента Δx_k повинна

визбиратися, виходячи із наступних умов: $\Delta x_k \ll \lambda$, $\Delta x_k \ll \delta$, де λ – довжина хвилі, а δ – характерний розмір дефекту.

В моделі на рис. 2.6, а паля, що заглиблена в ґрунт, містить зосереджені маси у кількості $N = 100$. Ці маси розташовані в блоках по 10 шт. в кожному (див. рис. 2.6, б), і таких блоків, що послідовно з'єднані вибрано також 10 шт. (див. рис. 2.6, в).

Еквівалентні електричні параметри схеми заміщення на рис. 2.6, г розраховуються за допомогою наступних формул:

- параметри палі: $L_p = 0.5 / k_p$, $R_p = 0.5 / c_p$, $C_p = m_k$;
- параметри ґрунту для бокової поверхні: $L_s = l / k$, $R_s = l / c$;
- параметри ґрунту для нижньої торцевої поверхні: $L_s^{(T)} = 1 / K$, $R_s^{(T)} = 1 / C$.

Джерело струму $F(t)$ на вході в таку систему моделює імпульсну механічну силу, що діє на поверхні палі. Форма імпульсу задається у вигляді гармонічної функції:

$$F(t) = \begin{cases} F_m (1 - \cos 2\pi t / \tau) / 2, & t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau. \end{cases}$$

де F_m - амплітудне значення імпульсу сили, а τ – тривалість імпульсу.

Наведена на рис.2.6 Simulink-модель також містить засоби візуалізації результатів розрахунку, а саме, на віртуальний осцилограф виводяться зміни в часі швидкості руху, зміщення та прискорення на поверхні палі та її нижньому торці, що контактує із ґрунтом.

Розрахунки проводилися при наступних значеннях параметрів: параметри палі: довжина $L_p = 10$ м, діаметр $D_p = 2a = 0,4$ м, щільність 2400 кг/м³, модуль Юнга $E_p = 35 \cdot 10^9$ Па; параметри ґрунту: щільність $\rho_s = 1924$ кг/м³, модуль Юнга $E_s = 1,8 \cdot 10^8$, $\nu_s = 0,3$; параметри силового імпульсу: $F_m = 2$ МН, $\tau = 1 \div 50$ мс.

На рис. 2.7 наведено результати розрахунку швидкості руху поверхні палі при накладання імпульсу сили амплітудою 2МН та довжиною 10мс (форму імпульсу також можна побачити на цьому рисунку). Відзначимо, що саме ці величини вимірюються на практиці. Як видно із цього рисунку, рух поверхні

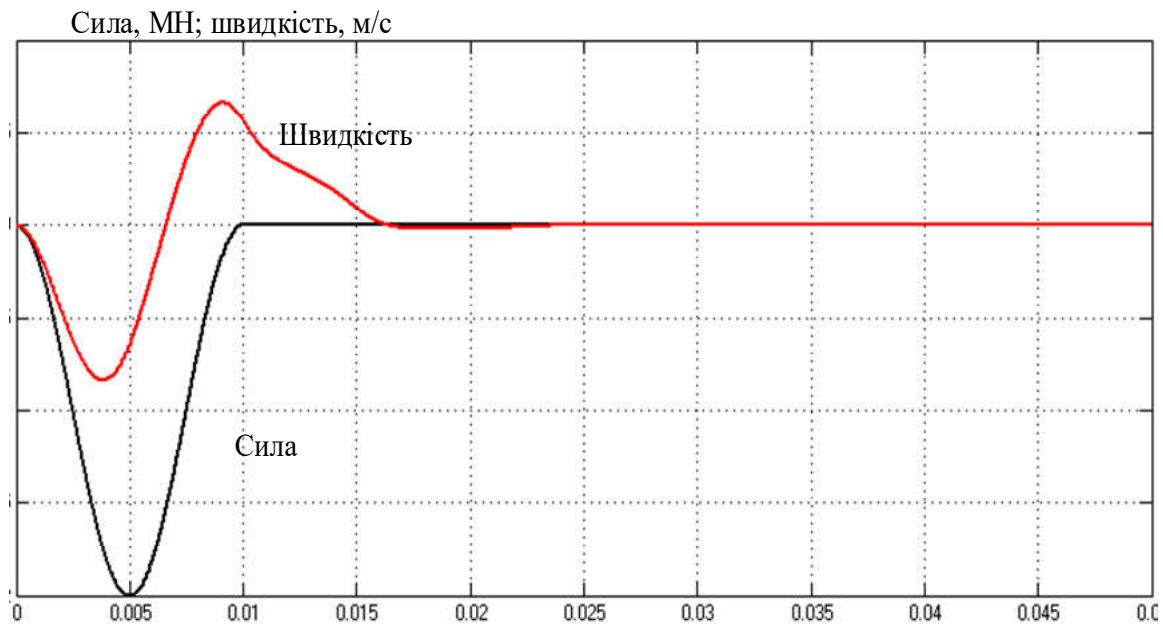


Рис. 2.7 Характер змінення у часі механічної сили та швидкості на поверхні палі за імпульсного навантаження. Параметри силового імпульсу: $F_m = 2\text{ МН}$, $\tau = 10\text{ мс}$

На рис. 2.8 наведено динамічні характеристики на верхньому та нижньому торцях палі, які є найбільш важливими з точки зору практичного використання результатів розрахунків (див., наприклад, [63]). Як можна побачити, результати якісно узгоджуються із результатами роботи [78]. Максимальне зміщення поверхні складає 3 мм, тобто за цього значенні амплітуди сили згідно зданими [78] в ґрунті вже починається пластична деформація. Максимальна ж деформація нижнього торця складає 1,6 мм, тобто не перевищує поріг початку пластичної деформації.

На рис. 2.9 та 2.10 наведено динамічні характеристики палі відповідно за дії короткого силового імпульсу тривалістю 1мс та довгого тривалістю 50 мс. В разі короткого імпульсу швидкість руху елементів палі значно зростає (див. рис. 2.8), але внаслідок короткочасності процесу величина зміщення елементів палі зменшується. В разі прикладання довгого імпульсу максимальне значення зміщення майже таке ж, як і при 10 мс, але така велика тривалість силового імпульсу потребує більших затрат механічної енергії, що є недоцільним під час реалізації такого процесу.

Задля визначення впливу тривалості силового імпульсу на максимальну величину зміщення поверхневих елементів палі в роботі виконувалися багатоваріантні розрахунки за різних значення тривалості τ та незмінній амплітуді імпульсу, яка дорівнювала 2 МН. Результаті цих розрахунків наведені на рис. 2.7. Як можна бачити з цього рисунку, в разі коротких силових імпульсів (менше 10 мс), величина зміщення значно зменшується. За довгих імпульсах (більше 20 мс) амплітудне значення зміщення майже не змінюється із зростання величини τ , тобто залежність величини максимального зміщення верхнього торця палі від тривалості цього імпульсу має характер кривої насичення.. Отже для палі, що досліджується, оптимальне значення довжини силового імпульсу розташовано в діапазоні 10 – 20 мс.

Під час розрахунків повздовжніх хвильових процесів в палі за імпульсного навантаження важливо встановити таке граничне значення амплітуди механічної сили F_m , за який відбувається пластична деформація ґрунту, що знаходиться біля палі, тому що саме наявність такої пластичної деформації обумовлює несучу здатність палі, що використовується у будівництві. За даними роботи [78], така пластична деформація здійснюється за зміщення поверхні палі, що дорівнює 2 – 3 мм. За допомогою проведених комп'ютерних розрахунків для палі, що досліджується) встановлені граничні значення амплітуди механічної сили, за яких здійснюється пластична деформація ґрунту, а саме, коли зміщення ґрунту на поверхні палі дорівнює 2 мм. Результати залежності цієї граничної сили від тривалості імпульсу τ наведені на рис. 2.8 – 2.10. Як можна побачити з цих рисунків, за оптимальних значеннях тривалості імпульсу (10 – 20мс),

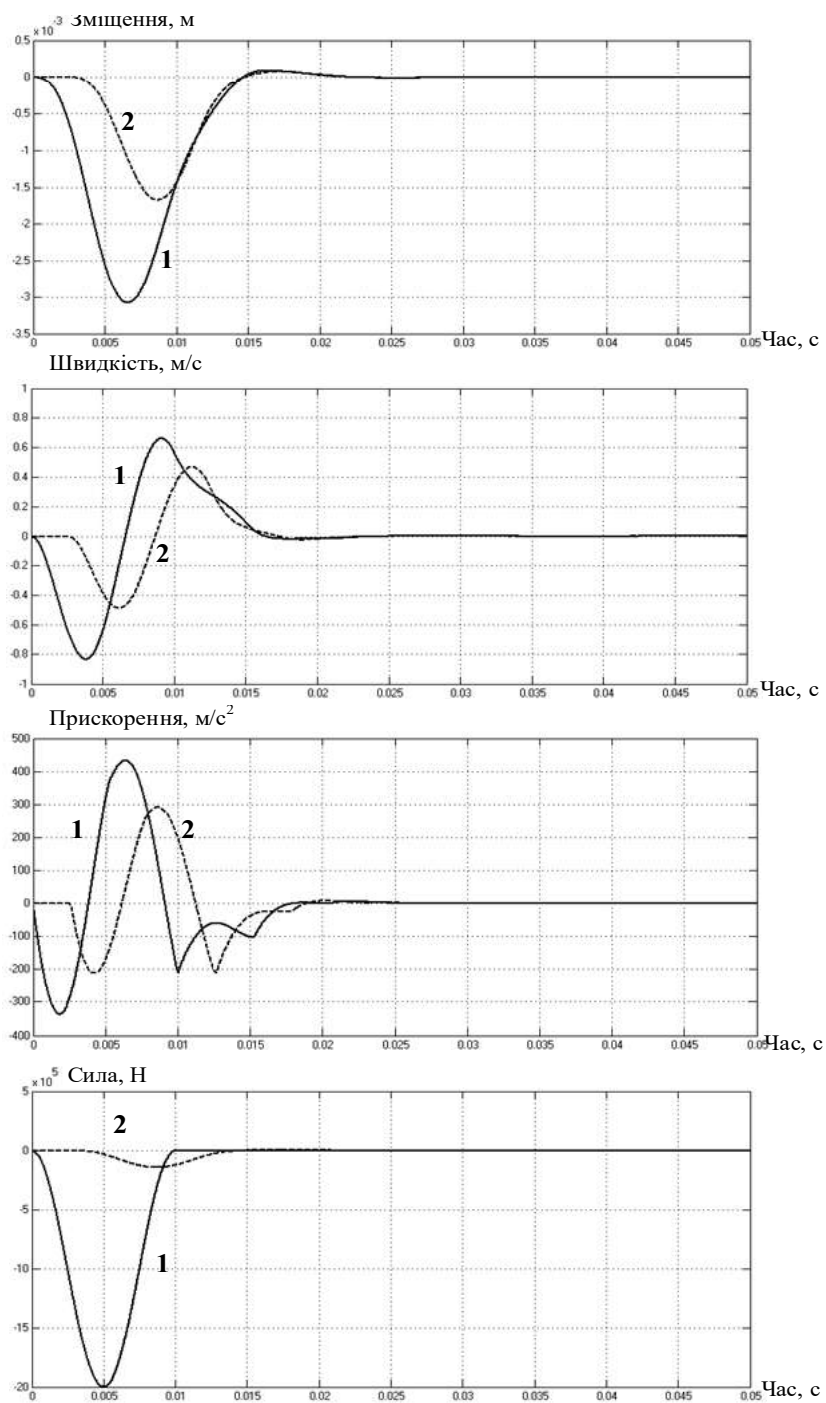


Рис. 2.8 Динамічні характеристики палі за імпульсного навантаження: 1 – верхня частина палі, 2 – нижня частина палі. Параметри силового

імпульсу: $F_m = 2\text{МН}$, $\tau = 10\text{мс}$

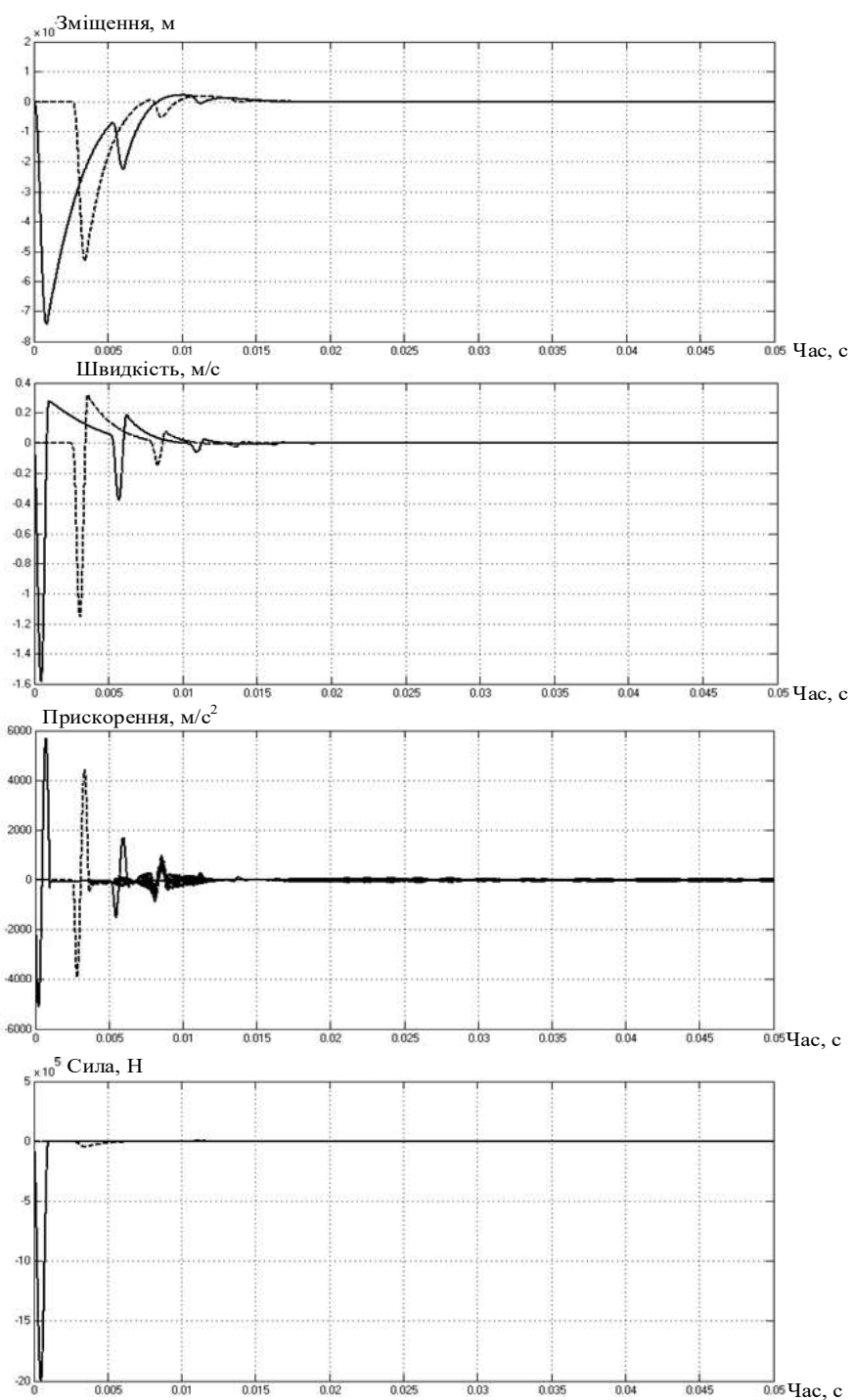


Рис. 2.9 Динамічні характеристики палі за імпульсного навантаження: 1 – верхня частина палі, 2 – нижня частина палі. Параметри силового імпульсу:

$$F_m = 2\text{МН}, \tau = 1\text{мс}$$

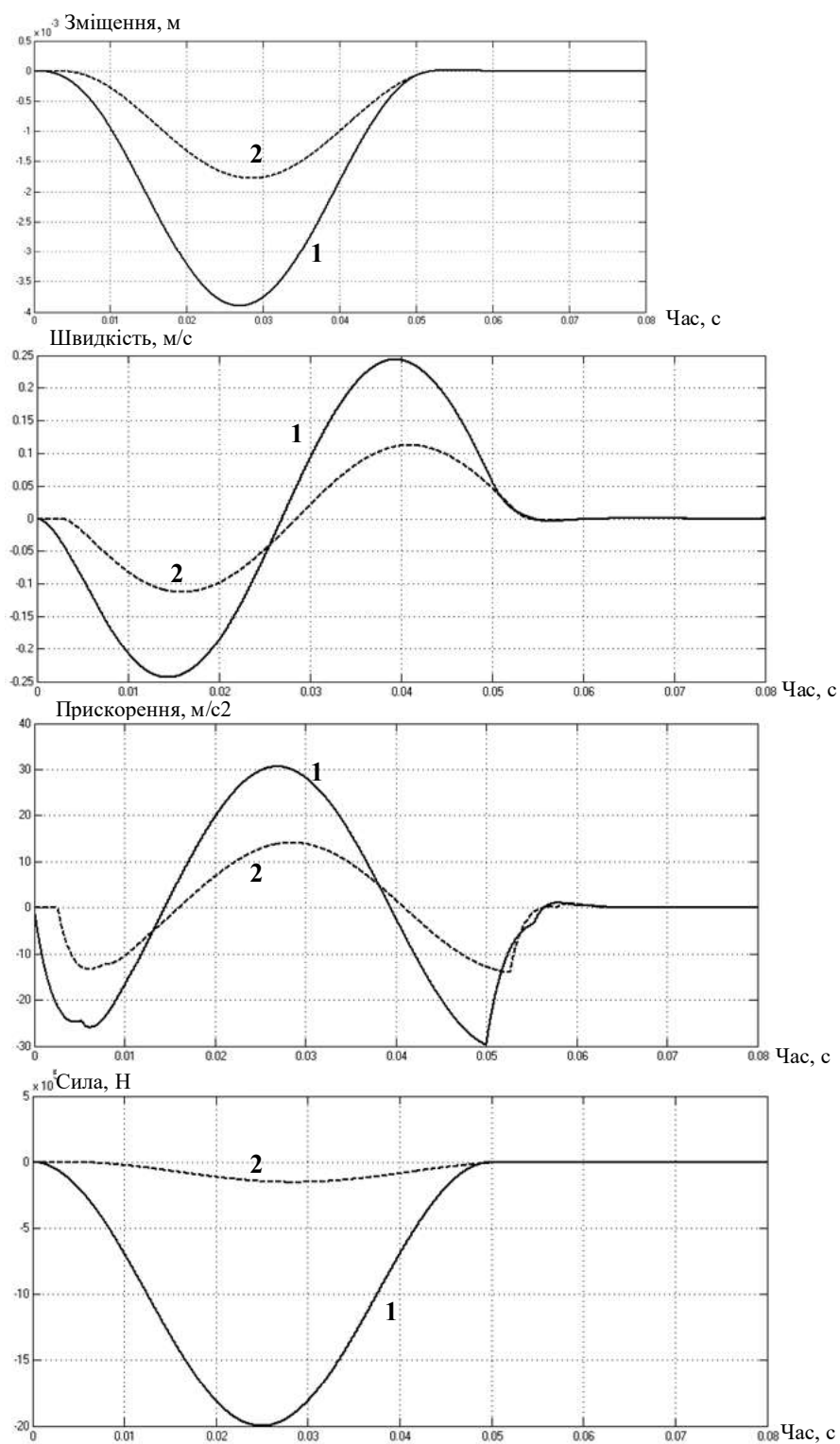


Рис. 2.10 Динамічні характеристики палі за імпульсного навантаження: 1 – верхня частина палі, 2 – нижня частина палі. Параметри силового імпульсу:

$$F_m = 2\text{МН}, \tau = 50\text{мс}$$

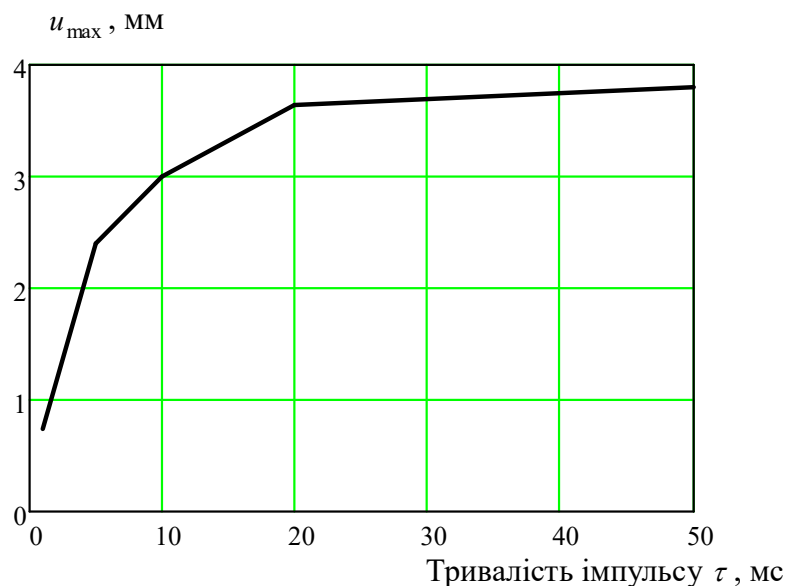


Рис. 2.11 Максимальне значення зміщення поверхні палі в залежності від тривалості силового імпульсу τ за амплітуди $F_m = 2$ МН

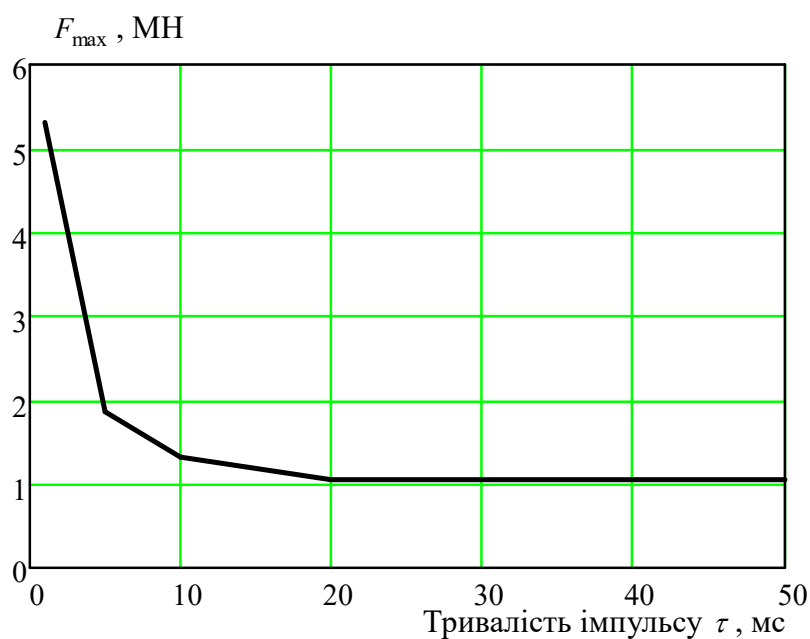


Рис. 2.12 Значення амплітуди силового імпульсу, за якого відбувається пластична деформація ґрунту на поверхні палі (зміщення дорівнює 2 мм) в залежності від тривалості силового імпульсу τ

величина амплітуди силового імпульсу повинна перевищувати 1,2 МН, а за менших значення тривалості імпульсу це граничне значення значно зростає. Слід зазначити, що для здійснення пластичної деформації ґрунту по всій

довжині палі, необхідно збільшувати величину силового імпульсу. Це значення необхідно встановлювати для кожного конкретного випадку за допомогою розробленої методики (рис 2.11, 2.12).

Таким чином розроблено комп'ютерну модель для аналізу повздовжніх хвильових процесів у бетонній палі, що занурена у ґрунт, які виникають при накладанні на її верхній торець імпульсної сили. Ця модель дає змогу розраховувати значення швидкостей, прискорень та зміщень від положення рівноваги зосереджених елементів палі, бокова поверхня яких контактує із ґрунтом, в залежності від параметрів силового імпульсу, матеріалу палі та ґрунту та може бути використана для оцінки за результатами експериментів несучої здатності палі.

Проведені розрахунки за різних значень тривалості силового імпульсу свідчать про існування оптимального його значення, яке для палі довжиною 10 м та діаметром 0,4 м розташовано у діапазоні $10 \div 20$ мс. За більш коротких імпульсах швидкість руху елементів палі зростає, але внаслідок короткочасності процесу величина зміщення зменшується. За більш довших імпульсах максимальне значення зміщення має приблизно таке ж значення, як і за стаціонарного навантаження палі і майже не залежить від тривалості імпульсу. Здійснення такого режиму є недоцільним, тому що потребує значних затрат механічної енергії і.

За результатами розрахунків встановлені граничні значення амплітуди імпульсної механічної сили, за яких починається пластична деформація ґрунту (коли зміщення ґрунту перевищує 2 мм), що важливо в експериментах вимірювання несучої здатності палі. Показано, що при оптимальних значеннях тривалості імпульсу – $10 \div 20$ мс, амплітуда сили повинна перевищувати 2МН, а при малих значеннях тривалості імпульсу (менше 10мс) це граничне значення сили суттєво зростає.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено математичні моделі (механічні та їхні електричні аналоги) відкритої і зануреної у ґрунт залізобетонний палі та проаналізовано хвильові процеси, за імпульсного збудження хвиль з одного торця.

2. Вперше механічна модель палі представляється як система з розподіленими параметрами, що складається з n -ої кількості шарів із зосередженими масами, зв'язаними між собою й ґрунтом невагомими пружно-грузлими зв'язками. Електричним аналогом такої механічної хвильової моделі є довга лінія, в якій параметри індуктивності, омичного опору і електричної ємності імітують відповідно масу, грузле тертя й пружність у палі на довжину шару (ланки).

3. На основі аналізу математичних моделей запропоновано просторово-часову діаграму поширення хвилі стиску в багат шаровому лінійно-протяжному виробі (палі), яка автором використовується для: синтезу (отримання сигналограми хвильового процесу по заданим параметрам палі) та аналізу результатів обстеження палі (визначаються параметри – довжина, наявність дефектів та інш.).

4. За результатами комп'ютерного моделювання хвильових процесів в зануреній у ґрунт палі, при змінних параметрах ударного імпульсу і різних характеристиках ґрунту, який оточує палю, встановлені граничні значення амплітуди імпульсної механічної сили, при яких починається пластична деформація ґрунту, що свідчить про можливість визначення несучої здатності палі.

Таким чином, на базі розроблених математичних моделей теоретично обґрунтовано діагностичні параметри задля визначення дефектів у палях, що надає можливість частково автоматизувати процеси аналізу результатів обстеження палей.

Посилання: [17, 20, 22, 25, 41, 49, 55-74, 78, 81– 86, 90] див. список використаних джерел стор. 171 – 167

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ ІНФОРМАЦІЙНО ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАЛЬ

У даному розділі наведено описання структури експериментального зразку ІВСАД ЗП, яку у подальшому було використано задля обробки експериментальних даних і практичної перевірки розроблених математичних моделей та методів визначення технічного стану залізобетонних паль та бурових стовпів.

Розглянуто основні види програмного забезпечення, що розроблено для управління роботою створеної ІВСАД ЗП, обробки експериментальних даних та побудови розв'язуючих правил з діагностування і класифікації можливих дефектів у палях.

Основні результати, що наведено в даному розділі дисертації, опубліковано в роботах автора [9, 10, 12], а також у звіті про наукову роботу [50].

3.1 Узагальнена структура ІВСАД ЗП

Дослідний зразок ІВСАД ЗП призначений для дослідження та діагностики технічного стану виробів з бетону та інших матеріалів на основі розповсюдження акустичних хвиль в цих виробках (луна-метод, каротаж) в лабораторних, замкнутих умовах, а також на будівельних майданчиках.

Пристрій побудований із застосуванням портативних комп'ютерів для програмної обробки сигналів системи датчиків, що дає змогу виконувати обчислення різноманітних параметрів (в тому числі швидкості розповсюдження ультразвукових коливань, розмірів будівельних конструкцій, відстані до дефектних ділянок у цих конструкціях та інше).

Результати обчислень відображаються на екрані комп'ютера в графічному і текстовому вигляді в зручній для людини формі. Застосування

портативних комп'ютерів дає змогу використовувати відомі і спеціальні програмно-математичні методи обробки сигналів датчиків з можливістю подальшого поліпшення цих методів. Крім того, завдяки застосуванню портативних комп'ютерів є можливість одержувати результати досліджень безпосередньо на об'єкті з подальшою їхньою документацією у відповідній формі. В деяких випадках більш доцільно використовувати як комп'ютер сучасні смартфони, тому інтерфейс між ІВСАД та комп'ютером може бути різним. Узагальнену структурну схему ІВСАД залізобетонних паль наведено на рис. 3.1.

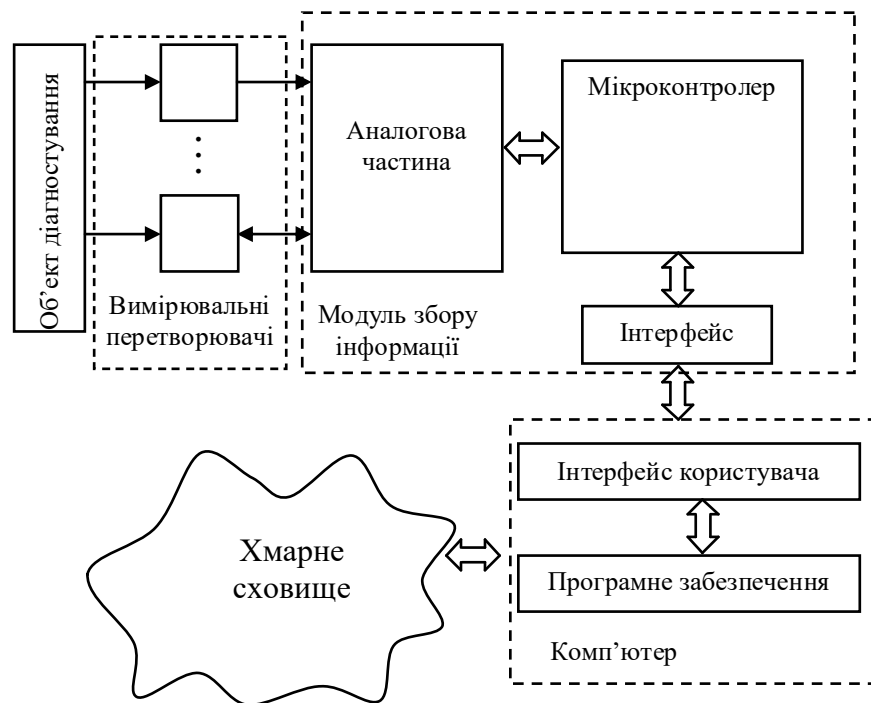


Рис. 3.1 Структурна схема ІВСАД ЗП

Система складається з наступних основних частин:

- перетворювачів для вимірювання сигналів різних фізичних процесів, які виникають під час проведенні обстежень;
- модуля збору інформації (МЗІ), аналогова частина якого виконує функції перетворення та попередньої обробці аналогових сигналів (узгодження входів і виходів, посилення сигналу, попередньої фільтрації і т.інш.), що

надходять з різних перетворювачів, та їхню передачу в мікро контролер (МК). Основним завданням мікроконтролеру, що працює за закладеними алгоритмами і здійснює керування всією схемою, є перетворення вимірних сигналів в цифровий код і подальша його передача через вибраний інтерфейс до комп'ютера;

- комп'ютер, зі створеним інтерфейсом користувача, за допомогою якого оператор управляє роботою системи і отримує інформацію про стан конструкції та для якого розроблене програмне забезпечення яке реалізує закладені алгоритми по обробці і збереженню даних;

- зберігаються зібрані дані про технічний стан обстежених конструкцій у вигляді бази даних в хмарному сховищі, що надає можливість синхронізувати дані з польового комп'ютера зі стаціонарними.

3.2 Структура модулю збору інформації

Узагальнену структурну схему модуля збору інформації системи акустичного каротажу та віброударної діагностики зображено на рис. 3.2.

Електронні блоки випромінювача та приймача, а також дискретного інтерфейсу для взаємодії з енкодером глибини задіяні лише підсистемами акустичного каротажу. Інші елементи, включаючи блок підсилювачів, не мають суттєвих відмінностей від застосовуваного методу діагностики.

Робота системи здійснюється під впливом сигналів управління, які надсилаються через інтерфейс комп'ютера зі спеціальним програмним забезпеченням. Вхідні дані заносяться в блок регістрів керування режимами роботи задля визначення необхідного режиму роботи апаратури.

Вхідна інформація містить:

- коефіцієнти підсилення для каналів датчиків;
- задану комутацію підсилювачів датчиків;
- вибір частоти перетворення аналогових сигналів у цифрову форму;
- ознаку способу запуску апаратури під час проведення вимірювання.

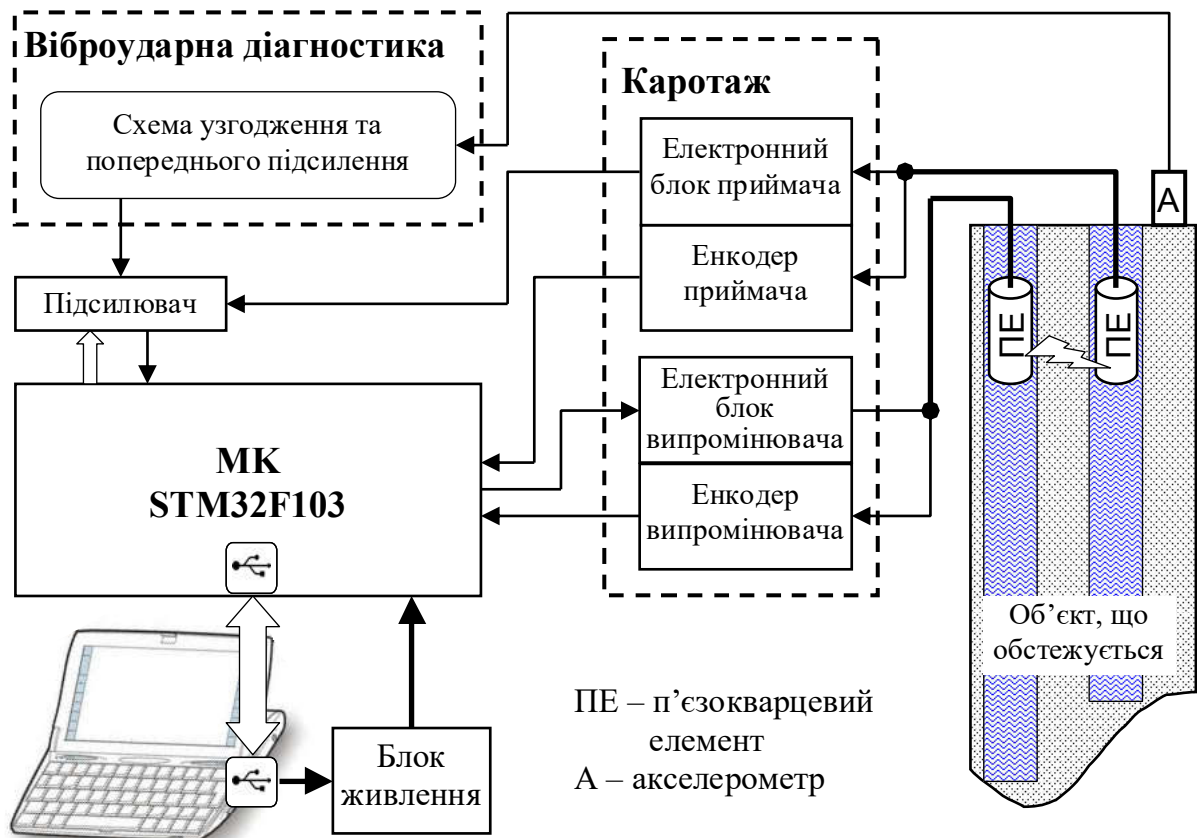


Рис. 3.2 Узагальнена структурна схема модуля збору інформації системи акустичного каротажу та віброударної діагностики

Керування режимами здійснюється мікроконтролером за закладеними алгоритмами. Завдяки вбудованому контролеру USB здійснюється живлення схеми та обмін інформацією з комп'ютером.

Підсилений сигнал поступає на вбудований в мікроконтролер АЦП, режими роботи задаються в залежності від виду вимірювань. Зазначимо, що мікроконтролер має два АЦП, використання яких одночасно надає можливість під час виконання каротажу піднімати частоту дискретизації до 2 МГц, а в режимі луно-методу виконувати усереднення даних, тим самим збільшувати роздільну здатність перетворювача. Дискретні входи і виходи використовуються для під'єднання енкодера глибини та додаткових дискретних сигналів, а також для керування випромінювачем ультразвукових коливань. Отримані дані накопичуються в статичному ОЗП мікроконтролера і після

виконання вимірювань передаються через шину USB у комп'ютер. Використання такого режиму роботи зменшує кількість цифрових завад під час проведення виміру.

Також можливий режим попередньої обробки отриманих даних в мікроконтролері, що зменшує обмін даними по шині USB, цей режим необхідний для автоматичного налаштування коефіцієнтів підсилення. Також під час обстеження конструкції зі значною акустичною базою виникає ситуація, що весь обсяг даних не може бути розміщений в оперативній пам'яті, тому початкова частина не реєструється, адже вона не містить діагностичної інформації.

Задля виконання вимірювань акустичних та вібраційних процесів, що відбуваються в процесі акустичного каротажу паль, а також для подальшої передачі отриманих даних в комп'ютер розроблено спеціальну апаратуру, яка дає можливість здійснювати перетворення аналогових сигналів, що надходять від датчиків різних типів, у цифрову форму і запис їх у пам'ять обчислювальної машини задля наступної обробки та збереження.

Таблиця 3.1

Основні технічні параметри модуля збору інформації системи віброударної діагностики будівельних та мостових конструкцій

1. Кількість аналогових вхідних каналів	2
2. Кількість дискретних каналів	8
3. Кількість підсилювачів	2
4. Коефіцієнти підсилення	2, 4, 8, 16, 32, 128, 256
5. Запуск апаратури	внутрішній, зовн., прогр.
6. Частота аналого-цифрового перетворення	100кГц..2мГц
7. Розрядність АЦП	12...16 біт
8. Включення-виключення живлення	автоматичне
9. Інтерфейс	USB/BlueTooth
10. Габарити контролера	150x150x30 мм
11. Маса контролера	0,2 кг
12. Максимальний струм споживання	60 мА

Відмінністю такого контролера є необхідність забезпечення цифрового інтерфейсу для зв'язку з енкодером глибини, який входить до структури системи і є одним з основних елементів під час проведенні акустичного каротажу паль.

Технічні характеристики модуля збору інформації наведено у табл. 3.1.

Використання сучасного потужного мікро контролеру дає можливість впровадження і використання в системі нових режимів роботи та алгоритмів обробки вимірюваних реалізацій сигналів без змін у апаратної частини.

3.2.1 Блок мікроконтролера

Зупинимося на виборі мікроконтролера (МК), який виконує функції обчислювального ядра модуля збору інформації системи.

На даний час на ринку мікроконтролерів представлено широкий спектр продукції. В табл. 3.2 представлено найпоширеніші на даний час рішення основних виробників мікро контролерів [99–107].

Таблиця 3.2

Порівняння основних параметрів сучасних мікроконтролерів

№	Позначення	Ядро	Орієнтовна ціна	Flash-пам'ять (кб)	ОЗП (кб)	Продуктивність (MIPS)	Споживання енергії (мА/Mhz)
1	LPC1111FHN33	ARM 32-bit Cortex M0	13	8	2	0.9*50	0.15
2	STM32F103	ARM 32-bit Cortex-M3	28.15	16	4	1.25*24	0.23
3	AtTiny13A	Atmel 8bit	25.5	1	0.064	20	0.3 (1 МГц) 0.55 (20 МГц)
4	atmega48	Atmel 8bit	47.06	4	0.5	20	0.3 (1 МГц) 0.55 (20 МГц)
5	MSP430F2101IPW	TI 16bit MSP430	52.12	1	0.12	16	0.25 (1 МГц) 0.4 (16 МГц)
6	PIC16F676	PIC16 8bit	36.8	2	0.22	5	0.1*4
7	PIC12F509	PIC12 8bit	26.3	2	0.041	5	0.087*4
8	PIC10F200T	PIC10 8bit	14	0.25	0.016	1	0.043*4

Як видно з таблиці, мікроконтролери, виконані на базі технології Cortex-M3, значно переважають конкурентів за основними показниками. Зазначимо, що в даному випадку 8-бітні мікроконтролери не мають достатньої для виконання поставлених задач продуктивності та оперативної пам'яті.

Сімейство ARM Cortex-M3 – нове покоління процесорів, які виконані за стандартною архітектурою і відповідають сучасним технологічним вимогам. На відміну від інших мікропроцесорів, ARM сімейство Cortex є завершеним процесорним ядром, яке об'єднує стандартний арифметично-логічний пристрій і системну архітектуру. Сімейство Cortex доступне в трьох основних профілях: профіль A – для високопродуктивних застосувань, профіль R – для застосування в системах реального часу і профіль M – для бюджетних застосувань.

Мікроконтролери STM32 виконані на основі технології Cortex-M3, яка спеціально розроблено задля застосувань, де необхідні розвинені системні ресурси і при цьому мале енергоспоживання. Вони характеризуються настільки низькою вартістю, що можуть конкурувати з традиційними 8- і 16-бітними мікроконтролерами.

Cortex-M3 є стандартизованим мікроконтролерним ядром, яке крім власне логічно-арифметичного пристрою містить всі інші складові елементи основи мікроконтролера (в т.ч. систему переривань, системний таймер SysTick, відкладочну систему та карту пам'яті). Адресний простір Cortex-M3 максимальним обсягом в 4 ГБ чітко розділений на області коду програми, SRAM, пристроїв вводу-виводу і системних ресурсів. На відміну від ядра ARM7, Cortex-M3 виконано по Гарвардської архітектурі, він має кілька шин, що дають змогу виконувати операції паралельно. Сімейство Cortex має можливість оперувати з фрагментованими даними (unaligned data), що також відрізняє його від попередніх архітектур ARM. Завдяки цьому досягається максимальна ефективність використання внутрішнього статичного ОЗП: економія порівняно з ядром ARM складає приблизно 1.5 разів. Сімейство Cortex також підтримує можливості установки і скидання бітів у межах двох

областей пам'яті розміром 1 Мбайт за методом bit banding. Цей метод надає ефективний доступ до регістрів і прапорців пристрою вводу-виводу, розташованих в області статичного ОЗП, і виключає необхідність інтеграції повнофункціонального бітового процесора.

Мікроконтролери STM32, ціна яких за штуку за покупки великої кількості складає трохи більше одного Євро, значно переважають існуючі 8-бітні мікроконтролери. Спочатку вони виготовлялися в 14 різних варіантах і були розділені на дві групи: Performance Line, до якої увійшли мікроконтролери з тактовою частотою до 72 МГц, і Access Line – з тактовою частотою до 36 МГц. Обидві групи мікроконтролерів сумісні по розташуванню виводів і програмному забезпеченню. Обсяг їхньої вбудованої Flash пам'яті досягав 128 кбайт, а статичного ОЗП – 20 кбайт. З моменту першої появи мікроконтролерів STM32 їх асортимент був істотно розширений новими представниками з підвищеними розмірами ОЗУ і Flash пам'яті, а також з більш складними UWB [96].

STM32F103 – одна з найширших лінійок мікроконтролерів компанії STMicroelectronics на базі ядра Cortex-M3. Мікроконтролери включають в себе широкий набір інтерфейсів і великий об'єм вбудованої пам'яті: ядро Cortex-M3 з частотою процесора до 72 МГц, Flash до 1024 кБ, до 96 кБ RAM, більша кількість таймерів, годинник реального часу (RTC), USB Full-Speed Device, до 5 UART, до 2 I2C, CAN, до 3 SPI, I2S, 12-бітний АЦП і 12-бітний ЦАП, інтерфейс карт SD, вбудований температурний датчик [96].

Це надає змогу розробити недорогий з малим споживанням енергії і разом з цим потужний і гнучкий універсальний контролер.

Зовнішній вигляд цифрової частини розробленого лабораторного зразка модуля збору інформації універсальної системи віброударної діагностики та акустичного каротажу паливних фундаментів зображено на рис. 3.3.

Вимірювальні канали можуть включати п'єзокерамічні акселерометри (під'єднуються на вхід попереднього підсилювача) або інші типи акселерометрів (з виходом по напрузі), що під'єднуються безпосередньо.

Окремо встановлений вхід блоку запуску використовується під час роботі пристрою в імпульсному режимі. Як основний елемент використовується компаратор, поріг запуску якого задається програмно з мікроконтролера з використанням ЦАП.

Наступним блоком в обробці сигналу є попередній підсилювач, що забезпечує підсилення сигналу по струму і усунення можливості накладання завад на корисний сигнал.

Режекторний фільтр необхідний задля усунення завад на промисловій частоті 50 Гц.

Сигнал поступає на підсилювач напруги зі змінним коефіцієнтом підсилення. Значення коефіцієнта підсилення задається мікроконтролером для кожного підсилювача окремо. Блок підсилювача виконано на основі диференційних підсилювачів як підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення використовується AD8231, де отримується необхідне підсилення на операційних підсилювачах типу AD8231 [100]. Крім того в ньому міститься додатковий операційний підсилювач, який має широке призначення. В нашому випадку, на ньому реалізовано активний електронний 2-полісний фільтр Сален-Ки. Він видаляє надмірні шуми та виконує згладжування перед аналого-цифровим перетворювачем. Після підсилення сигнал пропускається через фільтр низької частоти. В разі недостатнього підсилення програмованим підсилювачем він може використовуватися як додатковий підсилювач з відповідною його «обв'язкою» пасивними і активними елементами.

Цей операційний підсилювач має низький дрейф нуля, працює в режимі “Rail to Rail”, є інструментальним підсилювачем з програмованим коефіцієнтом підсилення в межах від 1 до 128 у відповідності до табл. 3.3.

Також відзначимо, що знаходження електронного блоку приймача в центральному модулі системи знімає проблему, пов'язану з тим, як по

забезпечити живлення електронного блоку приймача з одночасною передачею сигналів цього ж приймача центральній жилі кабелю. Передача по кабелю лише сигналу п'єзокварцового елемента датчика зменшує електричні завади, що виникають по лінії живлення.

Таблиця 3.3

Значення коефіцієнта підсилення ОП AD8231

X1	X2	X3	K
0	0	0	1
1	0	0	2
0	1	0	4
1	1	0	8
0	0	1	16
1	0	1	32
0	1	1	64
1	1	1	128

Структурну схему електронного блоку приймача зображено на рис. 3.5, а його електричну принципову схему – на рис. 3.6.

Сигнал, що надходить по кабелю від приймача, отримує необхідне підсилення в електронному блоці на двох підсилювачах. На першому каскаді підсилення, в наведених вище межах, задається мікроконтролером у відповідності до трьох-бітного коду, що поступає на вхід цього підсилювача.

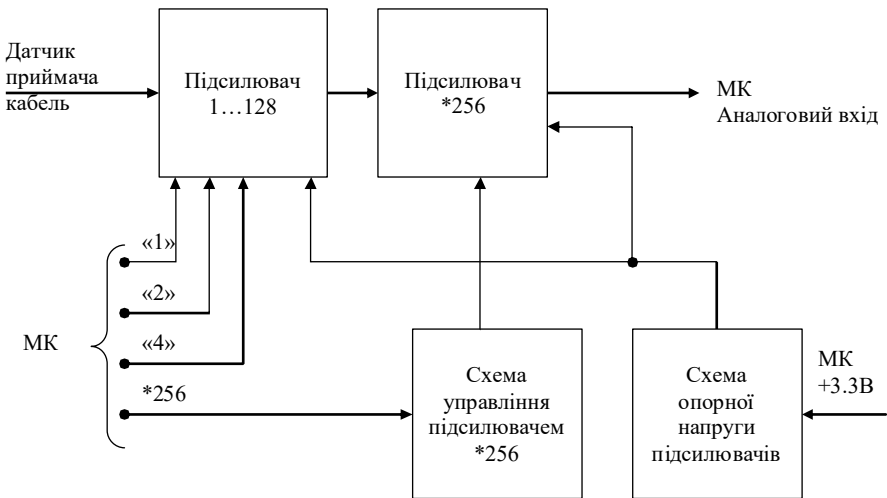


Рис. 3.5 Структурна схема електронного блоку приймача

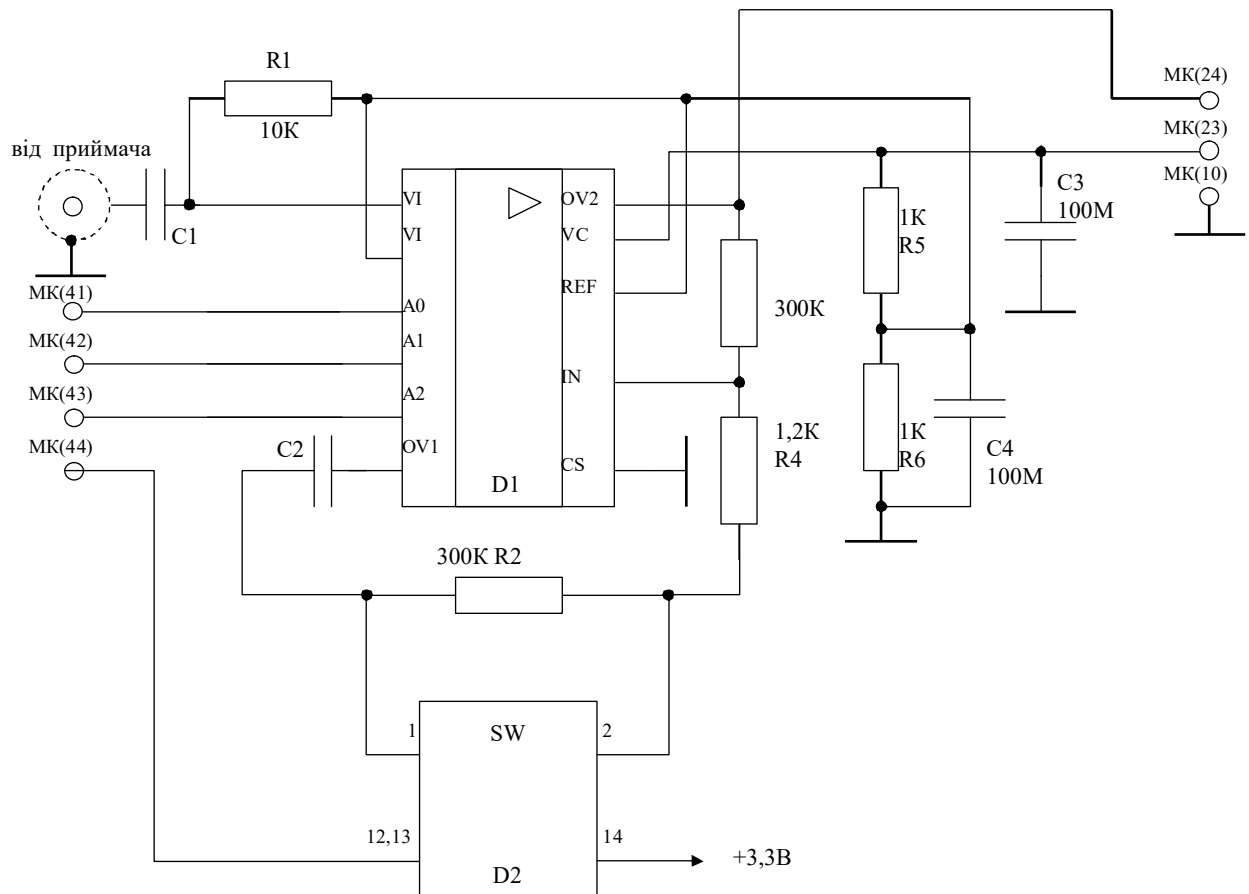


Рис. 3.6 Електрична принципова схема електронного блоку приймача

Другий каскад підсилення сигналу приймача спрацьовує тоді, коли його амплітуда не досягає необхідної величини. В такому разі від мікроконтролера поступає сигнал «256», і коефіцієнт підсилення сигналу збільшується. Задля вибору правильного режиму роботи підсилювачів в схемі електронного блоку приймача передбачено схему вироблення опорної напруги $V_{ref} = 3.3V/2 = 1.65V$.

Опорна напруга формується на резистивному дільнику R5, R6, C3, на який подається напруга 3.3 В відносно нульового потенціалу. Завдяки колу C1, R1 сигнал з датчика приймача «прив'язується» до опорної напруги. Сигнал, що підсилений на першому каскаді підсилювача, поступає на вхід другого підсилювача. За відсутності сигналу від мікроконтролера «256» на вході 12, 13 аналогового комутатора CD4066 коефіцієнт підсилення на другому каскаді буде рівним 1, тому що відношення між входними резисторами R2, R4 і резистором зворотного зв'язку R3 складає приблизно одиницю. За появи сигналу від

мікроконтролера «256» на вході комутатора D2 резистор R2 перемикається і тоді коефіцієнт підсилення на цьому підсилювачі визначається відношенням R3 до R4, а саме $k = 300\text{кОм} / 1.2\text{кОм} = 256$. Випадок, коли на входах двох підсилювачів знаходяться чотири одиниці, відповідає максимальному коефіцієнту підсилення.

Сигнал з виходу електронного блоку приймача поступає на аналоговий вхід мікроконтролера, де він приймає цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача, що знаходиться в самому мікроконтролері.

Після цього сигнал перетворюється за допомогою АЦП в цифрову форму (АЦП встановлюється для кожного каналу окремий). Всі сигнали з АЦП поступають по інтерфейсній шині SPI у мікроконтролер.

Подальша обробка сигналу виконується мікроконтролером по закладених у його пам'яті алгоритмах.

3.2.3 Інтерфейс обміну даними

Як зазначалося раніше, відстань від портативного комп'ютеру до модулю збору інформації, під час проведення вимірів може бути відносно велика і може складати 10...20 м. Використання кабелів для розташування пристрою біля комп'ютеру не завжди є оптимальним рішенням. Під час проведення обстеження на будівельному майданчику в зв'язку з складними умовами втрачається мобільність, гнучкість і швидкість проведення обстежень. Сигнали, що вимірюються мають малі амплітуди, тому необхідно використання дорожчих кабелів, що можуть бути пошкодженні під час проведення обстежень. Використання бездротових рішень задля сполучення модуля збору з комп'ютером здається природнім. Тому доцільне використання одночасно двох інтерфейсів сполучення: дротового і бездротового. Перевага дротового інтерфейсу в можливості здійснювати живлення пристроїв. Так, як в одному пристрої реалізація обох можливостей не потребує значних витрат, пропонується задля реалізації два виду інтерфейсів, аби підвищити гнучкість і можливості системи. Для дротового інтерфейсу найбільш зручним є

використання USB 2.0. Досвід використання цього інтерфейсу свідчить про його надійність і невибагливість, а також забезпечення достатніх швидкостей.

Як інтерфейс між комп'ютером та модулем збору інформації використано два стандарти, це Universal Serial Bus (USB) і BlueTooth. Завдяки вбудованим лініям живлення, що забезпечують струм до 500 мА, USB дає змогу використовувати модуль збору без власного блоку живлення, а також забезпечує достатню швидкість передачі даних в комп'ютер (480 МБіт/с), що дає можливість передавати значні обсяги інформації без використання буферної оперативної пам'яті. Обмін даними здійснюється через блок USB-PORT, який виконує основні вимоги USB протоколу і надає можливість здійснювати обмін даними між мікроконтролером і комп'ютером.

Для бездротового з'єднання доцільно використання стандартного типу, аби не підвищувати вартість і складність системи. Серед систем, що набули поширення в системах автоматики і контролю, представлено три основних технології: Xbee, Bluetooth, WiFi. Нажаль Xbee технологія, яка створювалась саме для цієї мети наразі відмирає, тому що пристрої забезпечення мають високу вартість, малу надійність і невисокі характеристики по швидкості обміну. Технологія Bluetooth має достатні показники по дистанції на якій вона працює, і з програмної точки зору вона простіша та зручніша для реалізації за технологію WiFi.

3.2.4 Режим вимірювання і обробки віброударних сигналів

Апаратура для підсистеми реалізації луно-методу не потребує розробки окремих електронних блоків. Задля здійснення збудження пружних коливань використовується інструментальний ударний молоток (рис. 3.7а) з вбудованим датчиком прискорення та змінними насадками. Датчик прискорення використовується як запускар системи. Перевищення певного рівня прискорення (тобто початку удару) сигналізує системі, що необхідно розпочинати запис даних. Сигнал з датчика прискорення, що розташований на

торці молотка, може бути використаний задля визначення фізичних матеріалу, по якому було здійснено удар.



а)



б)

Рис. 3.7 а) Інструментальний молоток із змінними бойками, обладнаний акселерометром для проведення іспитів луно-методом. б) Адаптований для луно-методу датчик швидкості

Для реєстрації сигналів хвильових процесів у палі використовуються акселерометри або датчики швидкості відповідного частотного діапазону (рис 3.2б), у конструкцію яких додається кріплення для фіксації датчика на поверхні оголовку палі. Задля забезпечення акустичного контакту використовуються спеціальні акустичні мастики, що наносяться на очищену поверхню бетону.

Запуск реєстрації

Запуск реєстрації даних є важливим моментом в даному методі. Адже для аналізу хвильових процесів необхідно зареєструвати весь хвильовий процес з самого початку. Використання електричних контактних способів в цьому випадку не практично – монтаж і демонтаж займає багато часу, цей метод має

невисоку надійність, за наявності вологи, що є досить частим явищем через доступ ґрунтових води і відкритість конструкції для атмосферних опадів. Запуск реєстрації з використанням порогових значень, теж не є оптимальним, адже за низького порогу система може запуститися від завади, а за високого значення губиться початкова частина сигналу, що може призвести до ускладнень під час аналізу сигналу. Тому пропонується запуск по порогу з передісторією. В цьому випадку по команді з комп'ютера пристрій переходить в режим готовності, данні АЦП записуються циклічно в проміжний буфер, а по досягненню заданого з комп'ютера порогу проходить повний цикл реєстрації.

Перевагою цього методу є те, що в даному випадку рівні запуску можливо встановлювати дуже високо, адже в зареєстрованому процесі можливо встановити достатню «передісторію», аби зареєстрований процес був повністю відтворений (див рис. 3.8).

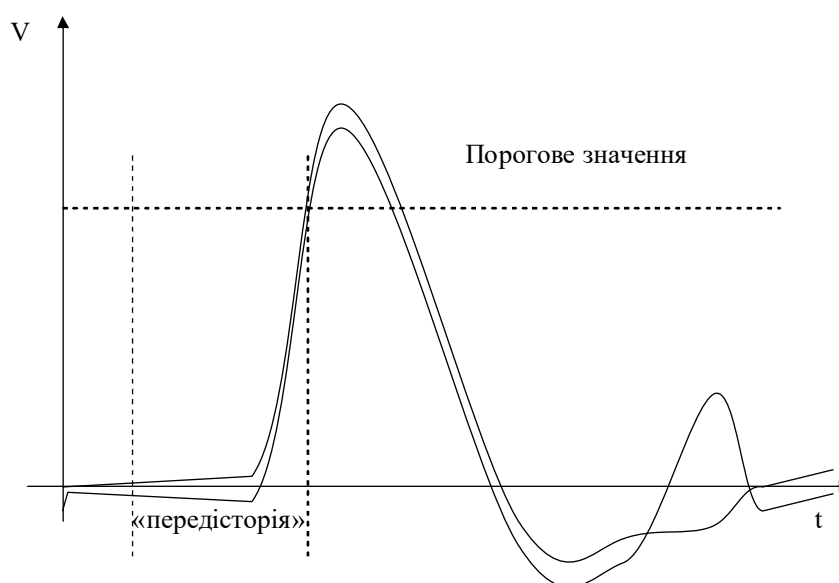


Рис. 3.8 Система запуску з «передісторією»

3.2.5 Режим вимірювання і обробки сигналів акустичного каротажу

Задля реалізації методу акустичного каротажу як датчику сигналів застосовуються п'єзокварцові елементи трубчатої форми невеликого розміру,

що пов'язано з розміром внутрішнього діаметра каналів доступу. Металеві труби, що використовуються як канали доступу та закладаються у будівельних конструкціях, можуть мати максимальну довжину понад 50 м з внутрішнім діаметром не менше 50 мм. Діаметр труб може бути порушений внаслідок неякісного зварювання окремих відрізків труб для досягнення необхідної їхньої довжини або інших причин, що порушують наведений розмір діаметра всієї труби вздовж будівельної конструкції.

Враховуючи ці обставини, можна вважати, що на окремих ділянках труб внутрішній розмір в порушених місцях становить не менше 40 мм, що підтверджується отриманим досвідом під час обстежень на реальних об'єктах. Цей розмір (40 мм) накладає вимогу до конструкції датчиків(зондів) акустичного каротажу, тобто зовнішній діаметр датчиків має бути меншим цієї величини.

Задля забезпечення акустичного контакту між зондами труби заповнюються водою. Тому підчас занурення зондів у труби на них діє значний тиск, величина якого сягає до 7 Атм. Ця обставина накладає суттєві вимоги до герметичності конструкції зондів, порушення яких призводить до проникнення води всередину зондів.

Наступна вимога до конструкції датчиків пов'язана з необхідністю передачі аналогових сигналів до контролера, який забезпечує необхідне підсилення та перетворення в цифрову форму сигналів. Тому в корпусі датчиків повинен буди герметично вмонтований з'єднувач для під'єднання до нього кабелю зв'язку з контролером. Досліди показали, що для цього можна застосувати коаксіальний кабель типу RJ-48, який забезпечує не лише захист сигналів датчиків від електромагнітних завад, а й витримує механічне навантаження, що виникає під час зануренні і вийманні зондів.

Внутрішні розміри корпусу датчиків повинні бути достатніми для розміщення в них п'єзокварцевих елементів. П'єзокварцові елементи, що використовувалися під час проведення досліджень в рамках даного проекту,

мають циліндричну форму двох типів і відрізняються між собою діаметром, довжиною та товщиною стінок (рис. 3.9).

Випробування показали, що розміщення електронних блоків всередині датчиків недоцільне внаслідок того, що забезпечити достатню герметичність корпусу датчика без суттєвого його здорожчання неможливо. Тому було прийнято рішення розміщувати в них тільки п'єзокварцові та було розроблено уніфіковану конструкцію зонду, який є взаємозамінним, тобто кожен зонд може виступати як випромінювач, так і приймач сигналів. На рис. 3.10 наведено зовнішній вигляд датчика в зборі (зліва на фото), його деталей і з'єднувача для кабелю.



Рис. 3.9 Зовнішній вигляд зразків 2х типів п'єзокварцевих елементів



Рис. 3.10 Зовнішній вигляд датчика і його конструктивних елементів

Для проведення обстеження з метою визначення технічного стану пальових фундаментів та мостових будівельних конструкцій необхідно мати один датчик-випромінювач і один або кілька датчиків-приймачів. Ці датчики занурюються поступово у відповідні труби, для оперативного вимірювання глибини використовуються два енкодери глибини (рис. 3.11).

На кожній позначці глибини запускається датчик-випромінювач, який збуджує в радіальному напрямку ультразвукові хвилі, що розповсюджуються в тілі конструкції. Запуск випромінювача відбувається з боку комп'ютера через контролер у відповідності до програмного забезпечення. При цьому збуджені в

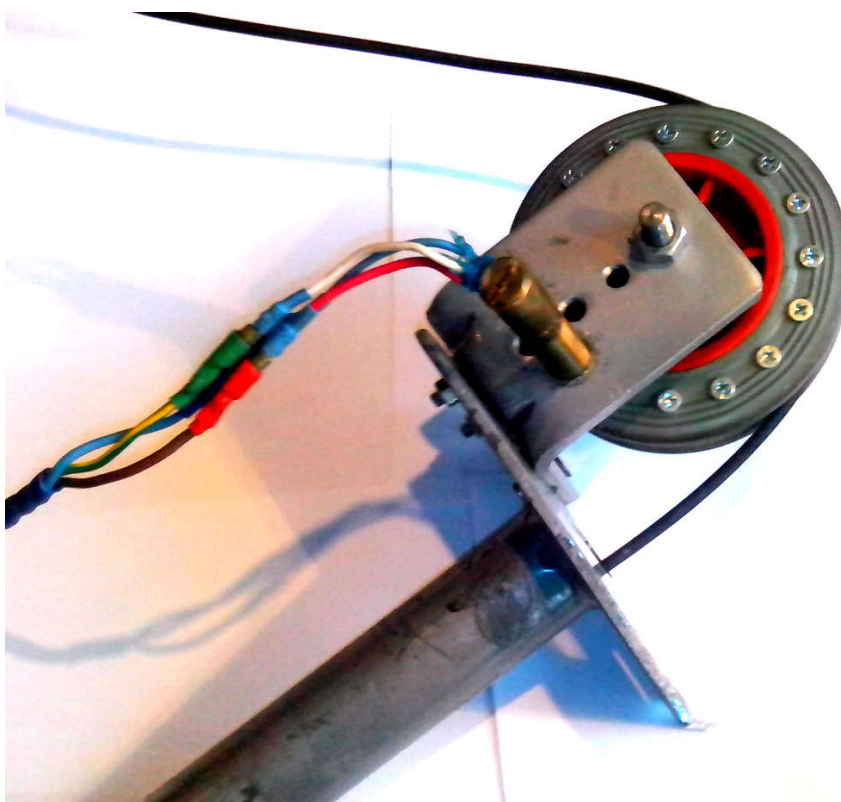


Рис. 3.11 Зовнішній вигляд енкодера глибини

приймачі аналогові сигнали поступають по кабелю в контролер, де вони підсилюються до заданого рівня амплітуди і після перетворення сигналів в цифрову форму прямують через порт USB в комп'ютер для їхньої подальшої обробки.

В комп'ютері сигнали відфільтровуються від електромагнітних завад, усереднюються значення їхніх амплітуд у кожній точці вимірів і визначається

час запізнення сигналів приймачів відносно сигналів випромінювача задля визначення швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль.

Електронні блоки випромінювача і приймачів розташовуються в центральному модулі збору інформації, а передача сигналів між ним і датчиками відбувається по кабелях значної довжини (до 100 м). Знаходження електронного блоку випромінювача в безпосередній близькості до мікроконтролера дає можливість формування необхідних сигналів в самому мікроконтролері для роботи зонда-випромінювача. Мікроконтролер виробляє два сигнали управління електронним блоком випромінювача, а саме: серію сигналів «накачки» високої напруги на високовольтному трансформаторі та сигналу миттєвого розряду цієї напруги, в результаті чого в п'єзокварцовому елементі з'являється ультразвукові коливання, що розповсюджуються в тілі будівельної конструкції.

Структурну схему електронного блоку випромінювача зображено на рис. 3.12.

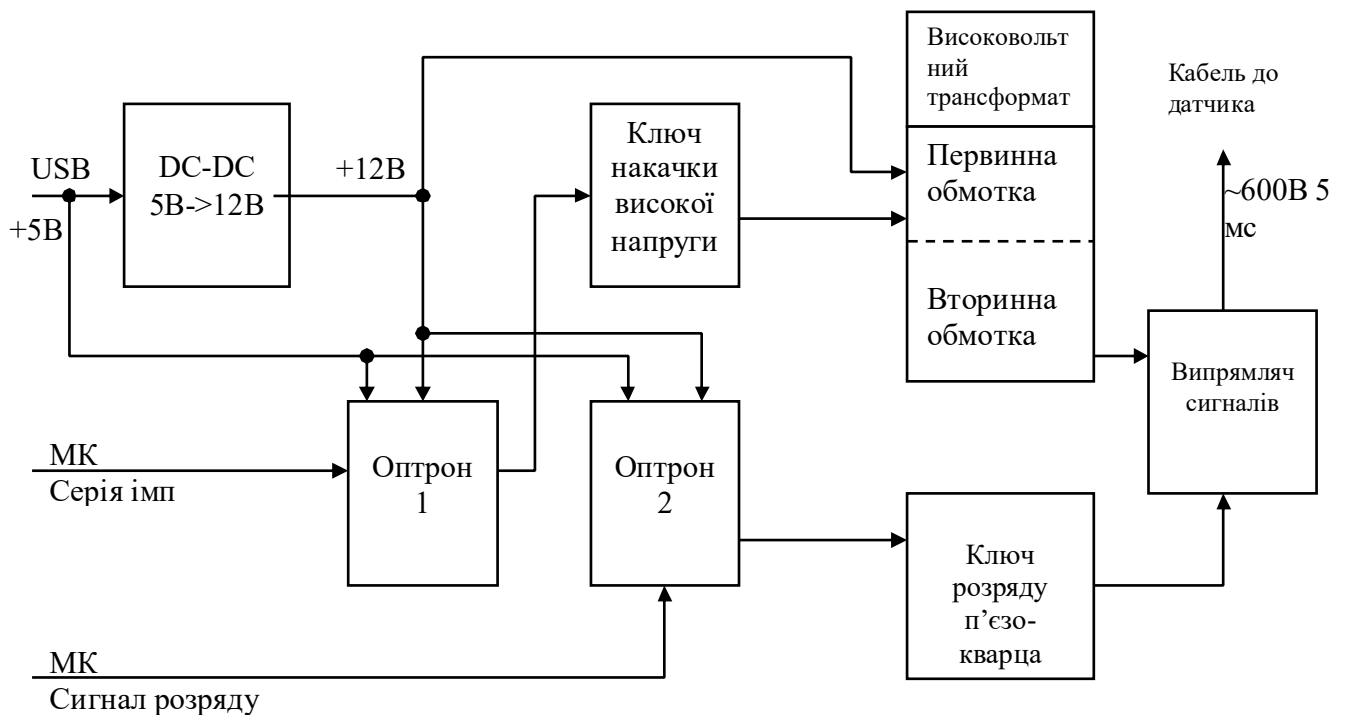


Рис.3.12 Структурна схема електронного блоку випромінювача

Оскільки електронний блок випромінювача генерує короткий (2...5мс) високовольтний сигнал амплітудою приблизно 600 В, який проходить по кабелю довжиною до 100 м до датчика, то виникає необхідність виконання гальванічної розв'язки цього блоку від іншої частини універсальної системи акустичного каротажу та віброударної діагностики (комп'ютер, електронні блоки тощо).

Для цього до складу електронного блоку введено наступні елементи: перетворювач напруги, що поступає по USB порту комп'ютера, з +5В в +12В з гальванічною розв'язкою цієї напруги; дві мікросхеми оптронів, що застосовані для гальванічної розв'язки сигналів мікроконтролера від електронного блоку випромінювача. В такому разі ключ накачки високої напруги, ключ розряду п'єзокварцового елемента датчика, високовольтний трансформатор, випрямляч сигналів, кабель з датчиком не мають електричного зв'язку з іншими частинами вимірювальної системи. Треба відзначити, що під час виконанні робіт бажано використовувати більш низьку напругу, що зменшує витрату електроенергії в польових умовах і збільшує ресурс використання п'єзокварцевих елементів.

Принципова електрична схема електронного блоку випромінювача зображена на рис 3.13.

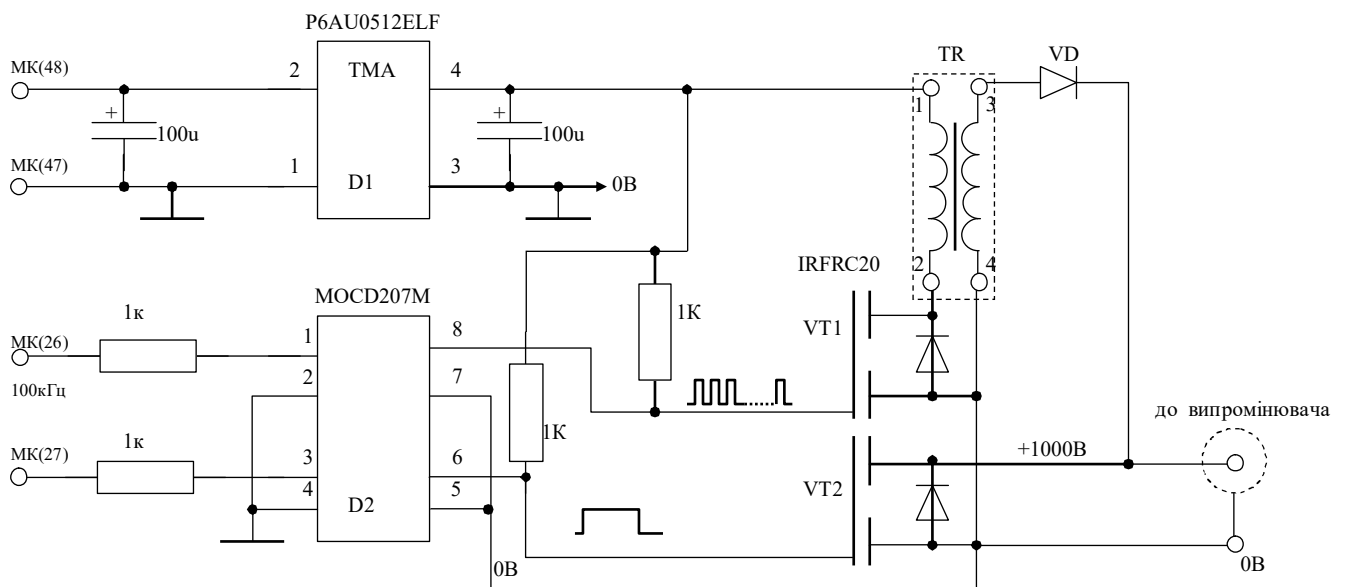


Рис. 3.13 Електрична принципова схема електронного блоку випромінювача

Перетворювач типу P6AU06512ELF, на вхід якого поступає напруга +5 В по USB порту комп'ютера, виробляє напругу +12 В з гальванічною розв'язкою відносно комп'ютера та всіх інших електричних кіл. Гальванічна розв'язка мікроконтролера від електронного блоку випромінювача відбувається за допомогою зведеного оптрона типу MOC207M, на виході якого сигнали з амплітудою 12В поступають на вхід відповідних ключів, що управляють роботою високовольтного трансформатора.

Серія сигналів з частотою 100 кГц, що надходять після першого оптрона на вхід першого ключа VT1, виконаного на високовольтному n-канальному польовому транзисторі типу IRFRC20, запускає в роботу первинну обмотку трансформатора з коефіцієнтом трансформації 100. При цьому амплітуда сигналів на вторинній обмотці трансформатора в кінці серії імпульсів тривалістю 5 мс досягає величини до 600 В. Після випрямлення сигналів на вторинній обмотці трансформаторів п'єзокварцовий елемент випромінювача буде заряджений до потенціалу тієї ж величини. В кінці серії імпульсів на мікроконтролері виробляється імпульс тривалістю 20 мс, який після другого оптрона поступає на другий високовольтний ключ VT2 того ж типу задля миттєвого розряду потенціалу на п'єзокварці випромінювача. Часова діаграма роботи електронного блоку випромінювача зображена на рис. 3.14.

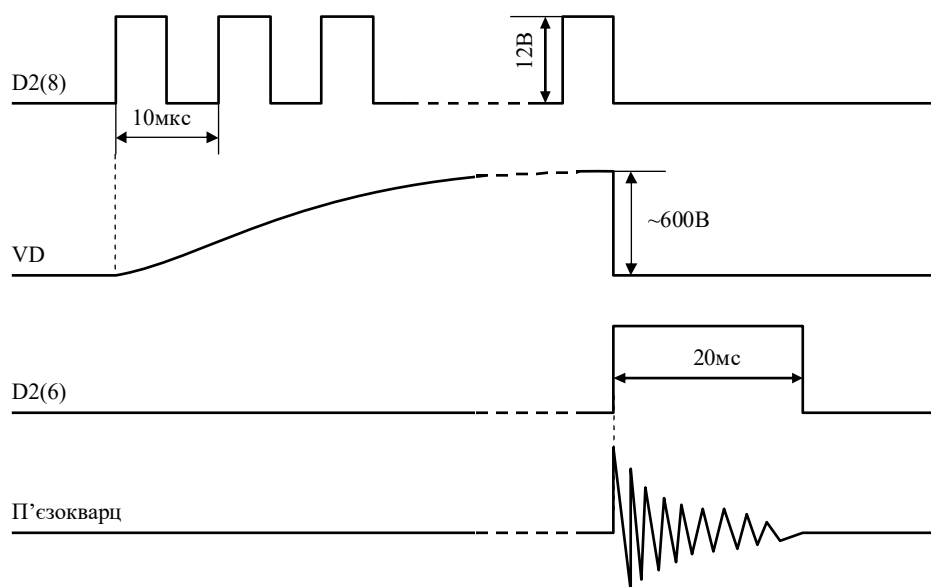


Рис. 3.14 Часова діаграма роботи електронного блоку випромінювача

Миттєвий розряд потенціалу на п'єзокварцовому елементі призводить до появи на ньому ультразвукових коливань, що затухають поступово на протязі 20 мс. Ці ультразвукові коливання, розповсюджуючись в тілі будівельної конструкції, через деякий час досягають приймача, в якому генеруються електричні сигнали з тією ж частотою, що і у випромінювача. При цьому дуже важливо, щоб частоти сигналів п'єзокварців співпадали зі значною точністю. Розходження цих частот допускається не більше 0.5%.

Як зазначалося вище, електронні блоки датчиків в новій конструкції експериментального зразку універсальної системи акустичного каротажу розміщені в центральному модулі управління. Це значно вплинуло на електричні принципові схеми датчиків, завдяки широким можливостям застосованого у системі мікроконтролера STM32F103 [99] її було спрощено без погіршення якості та надійності роботи експериментального зразка в цілому.

Сигнали випромінювача після проходження ними відповідної дистанції між випромінювачем і приймачем сприймаються п'єзокварцом приймача з запізненням у часі, що визначається швидкістю розповсюдження сигналів та відстанню між датчиками. Після перетворення акустичних коливань в електричні в п'єзокварцовому елементі приймача вони по кабелю поступають в центральний модуль електронного блока приймача.

Часову діаграму сумісної роботи електронних блоків випромінювача і приймача зображено на рис. 3.15.

Величини t_1 і t_2 (рис. 3.15) це час запізнення електричного сигналу на приймачі відносно початку генерації сигналів випромінювача і визначаються швидкістю їх розповсюдження в середовищі контрольованого об'єкту. Значення t_1 і t_2 будуть різними, якщо це середовище неоднорідне, що залежить від дефектів в конструкції.

Для проведення налаштувань по взаємодії між різними електронними блоками з відповідним програмним забезпеченням, а також задля налагодження та регулювання режимів роботи, був розроблений спеціальний прилад, який

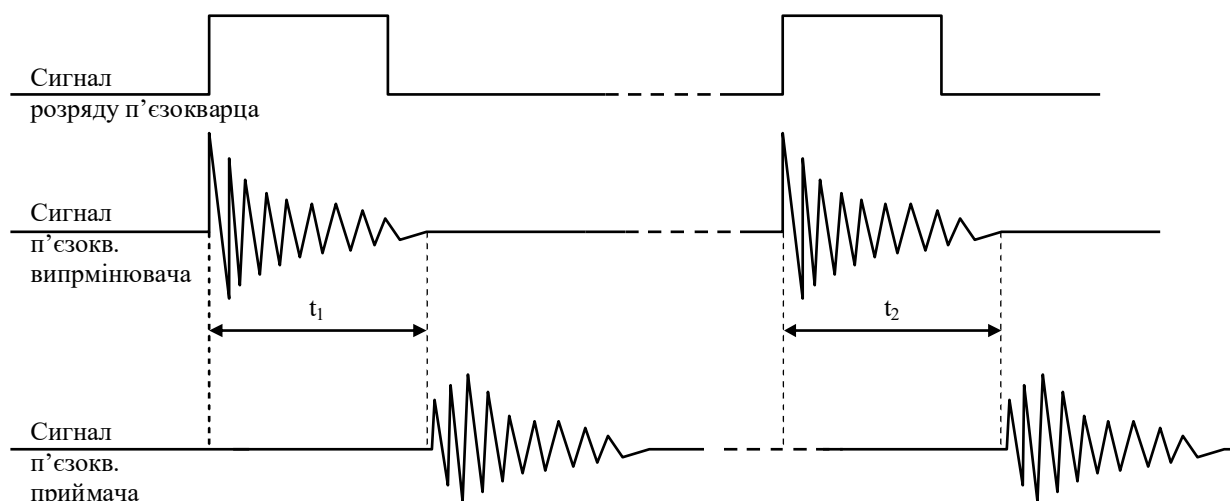


Рис. 3.15 Часова діаграма сумісної роботи електронних блоків випромінювача і приймача

виробляє необхідні сигнали в системі і окремо в електронних блоках – імітатор контролера, зовнішній вигляд якого показано на рис. 3.16. Цей прилад дає змогу за допомогою інших приладів (осцилограф, лабораторний блок живлення і т.п.) опрацювати сигнали і налаштовувати вузли для встановлення оптимальних режимів їхньої роботи.

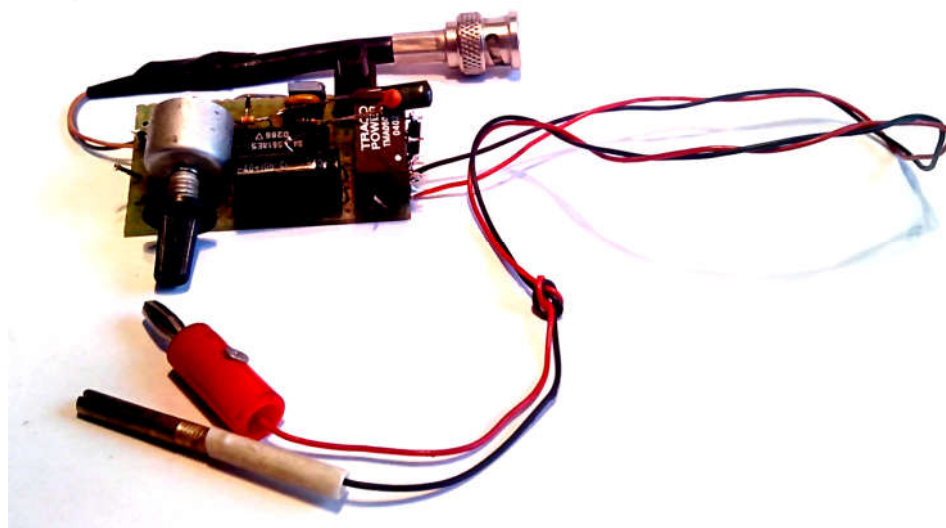


Рис. 3.16 Електричний блок імітатора

3.3 Програмне забезпечення для створеного зразку ІВСАД

Важливою складовою експериментального зразка системи віброударної діагностики є програмне забезпечення (ПЗ). Саме ПЗ надає гнучкість системі і забезпечує функціонування під час різних випробувань.

Структурну схему взаємодії ПЗ зображена на рис. 3.17. ПЗ ділиться на дві основних складові: прикладне ПЗ та вбудоване ПЗ (firmware). Прикладне ПЗ системи працює на звичайному комп'ютері, де відбувається математична обробка та зберігання даних обстежень та забезпечується візуальний інтерфейс для управління режимами роботи вбудованого ПЗ, яке «зашите» у флеш-пам'ять мікроконтролера і виконується безпосередньо у мікроконтролері.

Задля реалізації взаємодії через USB було вибрано режим віртуального послідовного порту [104]. Це надає наступні переваги:

- немає необхідності розробляти власний драйвер пристрою, оскільки в якості драйвера використовується ПЗ, розроблене фірмою STM, яке знаходиться у вільному доступі і може бути завантажене з сайту виробника мікросхем;
- використання віртуального послідовного порту спрощує написання ПЗ, оскільки не накладає суттєвих обмежень по протоколу взаємодії пристрою з комп'ютером.

Управління режимами роботи пристрою відбувається за допомогою командного режиму роботи. Після виконання необхідних команд пристрій переходить в «бінарний» режим роботи, що дає змогу підвищити швидкість обміну інформації до відповідної швидкості роботи USB 2.0.

3.3.1 Функціонування вбудованого програмного забезпечення

Вбудоване ПЗ для роботи модуля збору інформації розроблено на мові Cі у середовищі Keil uVision 4.0. Як шаблон проекту взято за основу проект VirtualComPort. Саме на вбудоване ПЗ покладено завдання по взаємодії з периферійними модулями мікроконтролера та додаткової електронної частини. На початковій стадії мікроконтролер ініціалізує початкові установки периферії,

здійснюється налаштування режимів роботи АЦП, налаштовуються необхідні порти GPIO на вхід чи вихід. Надалі програма переходить у нескінченний цикл, в якому очікує команди і виконує відповідні дії.

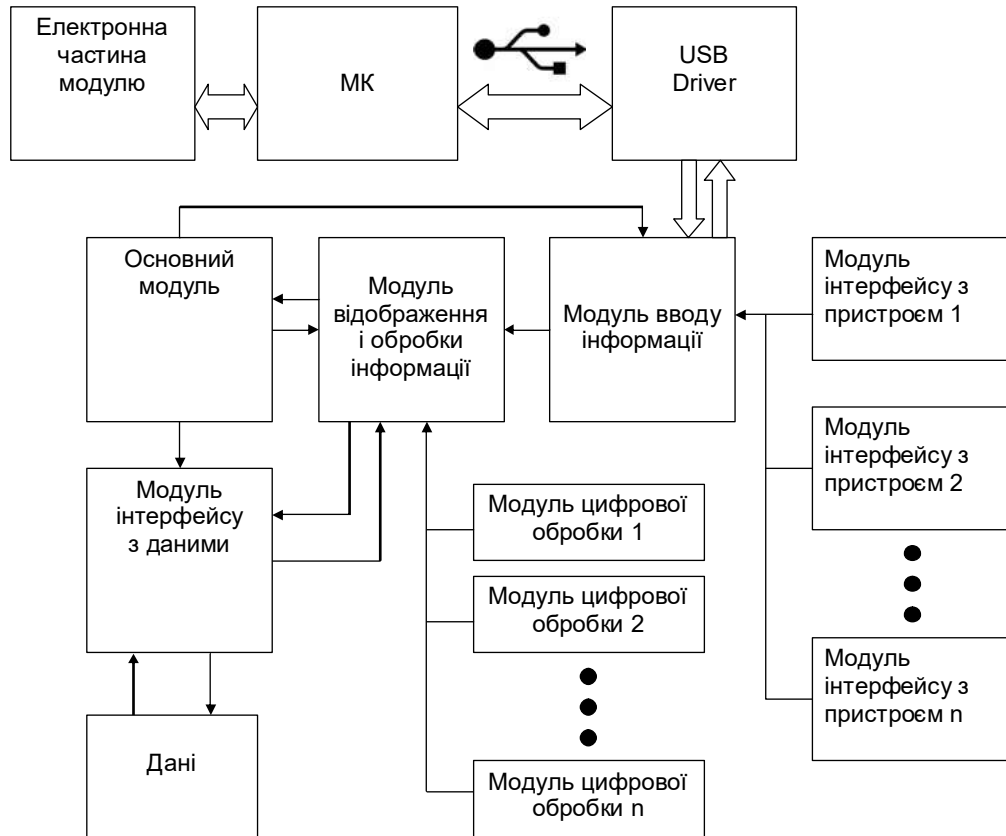


Рис. 3.17 Структурна схема взаємодії програмного забезпечення

У процесі розробки вбудованого ПЗ необхідно враховувати, що робота у різних режимах відрізняється не лише частотними характеристиками, а й логікою. Зупинимося на режимах роботи більш детально.

Під час **випробування паль у режимі каротажу** задля забезпечення високої швидкості надходження даних використовується асинхронний режим зчитування даних. Він забезпечує обмін пакетами даних з частотою 1 кГц, що є достатньою швидкістю задля забезпечення методу і є прийнятною з точки зору оператора проведення випробувань, тобто людина не має необхідності враховувати швидкість пересування датчиків під час проведення обстеження.

Прикладна програма на початку випробувань вмикає режим випробувань «каротаж», при цьому відбувається налаштування режимів роботи

мікроконтролера відповідним чином, а саме: вибір режиму роботи АЦП та налаштування DIO і таймерів мікропроцесора. На відміну від віброударної діагностики керування режимами запуску і іншими апаратними змінними відбувається безпосередньо в мікроконтролері. Як зазначено вище, для роботи електронної частини необхідно вироблення несучої частоти 100 кГц для накачки високою напругою п'єзокварців. Це виконується за допомогою налаштування таймерів мікропроцесора. Надалі мікроконтролер переходить в режим очікування команди з USB, одночасно з цим здійснюється опитування енкодерів глибини, що під'єднанні безпосередньо до портів контролера. Часову діаграму обробки сигналів енкодерів наведено на рис. 3.18.

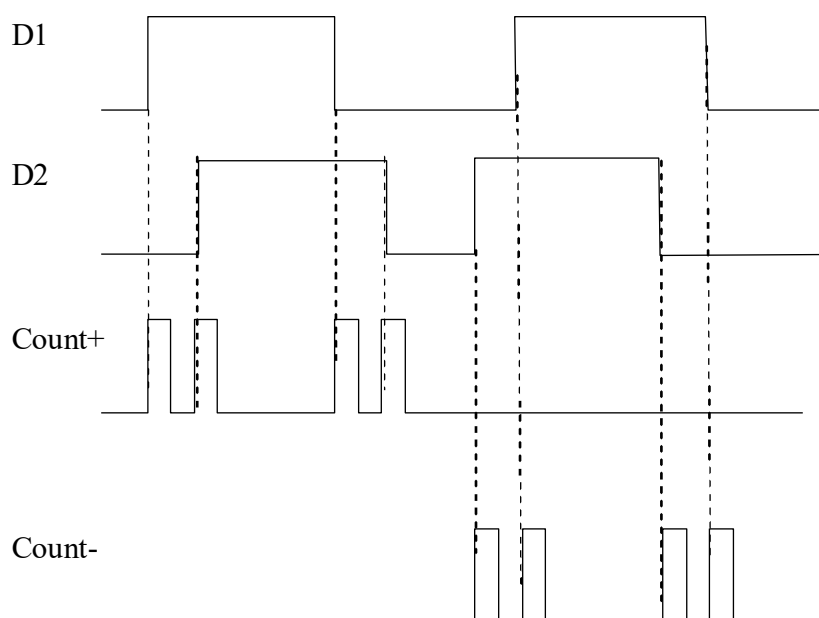


Рис. 3.18 Часова діаграма обробки сигналів енкодерів

Як показано на структурній схемі (рис. 3.2), до складу системи входять не менше двох енкодерів: один – для випромінювача та другий – приймача. Значення лічильників енкодерів розміщуються на початку буфера пам'яті. Ця важлива для проведення точних вимірювань інформація відображається у прикладній програмі, що надає можливість оператору випробувань корегувати свої дії у відповідності до значень, що надаються енкодерами.

Задля оптимізації процесу передачі даних та зменшення їхнього обсягу задається спеціальний режим упаковки даних. Суть його полягає у наступному: якщо нам відома база прозвучування, то за відомої максимальної швидкості розповсюдження пружних хвиль, викликаних вібраційними коливаннями п'єзокварцевих елементів, є деякий час, коли достовірно відомо, що хвилі не можуть надійти до приймача коливань. Тобто можна знехтувати деякою визначеного розміру вибіркою даних, тим самим зменшити обсяг буфера даних, необхідних до передачі в комп'ютер. Використовуючи цю властивість, можна передавати однаковий за розміром буфер, не зважаючи на різну базу прозвучування. Це значно спрощує структуру як прикладної, так і апаратної частин, тому що статичний розмір буфера дає змогу уникнути зайвого використання пам'яті для зберігання результатів вимірювання.

Режим віброударної діагностики паль забезпечується налаштуванням апаратної частини та відповідними алгоритмами функціонування. Включення режиму відбувається наступними командами: `cmdLEVEL`, `cmdAMPL`, `cmdSIZE`, `cmdSTART`, `cmdSTARTEX`, `cmdSIGN`, `cmdSTOP`.

`cmdSIGN` – дає змогу перевірити стан готовності апаратури, при виконанні даної команди мікроконтролер повертає до комп'ютера дані про версію вбудованого ПЗ та ідентифікатор ПЗ. Якщо існують якісь проблеми, наприклад, помилка та «зависання» ПЗ у мікроконтролері, то виникає виключна ситуація по таймауту, і оператору системи надається відповідна інформація. Оператор може виконати перевантаження системи для відновлення функціонування ПЗ належним чином.

`cmdSIZE` – надає можливість змінити розмір робочого буфера модуля збору інформації, який задається прикладним ПЗ в залежності від проектних геометричних розмірів конструкції. Встановлення режиму розміру буфера надає можливість більш оптимально використовувати лінії зв'язку та не перевантажувати зайвими обсягами інформації.

`cmdLEVEL` – задає рівень тригера старту, який вибирається таким чином, щоб система спрацювала саме під час проведення випробувань. Для цього рівень тригера старту повинен перевищувати рівень завад.

На вибір рівня тригера старту впливає багато факторів, наприклад працююча поряд будівельна техніка. Як показали експерименти, найкраще значення тригера запуску відповідає найвищому рівню завад на конкретному будівельному майданчику на час проведення обстеження. Тому вибір рівня запуску здійснюється індивідуально для кожного конкретного об'єкта шляхом проведення декількох експериментальних запусків системи. У разі хибного спрацювання системи рівень запуску підвищується. Задля визначення необхідного рівня використовується команда `cmdAMPL`.

`cmdAMPL` – визначає рівень вібрацій на даному об'єкті під час виконання цієї команди відбувається вибірка даних з АЦП з набранням статистики для даного об'єкту. В результаті виконання даної команди до комп'ютера надсилаються дані по рекомендованому рівню запуску для даного об'єкта.

`cmdSTART` – після надсилання даної команди модуль переходить в режим вимірювання. Алгоритм роботи даної команди полягає в тому, що модуль переходить в режим очікування до того моменту, коли рівень вимірюваного сигналу не перевищить рівень тригера старту, заданий раніше командою `cmdLEVEL`. У разі перевищенні цього рівня модуль починає накопичення даних в буфері з подальшою їх передачею через USB до комп'ютера.

Розмір буфера задається попередньо командою `cmdSIZE`.

`cmdSTARTEX(n:LONGINT)` – розширена версія команди `cmdSTART`, на відміну від якої, після виконання даної команди модуль переходить в режим збору інформації безпосередньо в момент запуску, але дані записуються у буфер циклічно. Використовується два лічильника: перший лічильник вказує на поточний вказівник у буфері, а другий лічильник перебуває у стані очікування до моменту, коли рівень вимірюваного сигналу перевищить рівень тригера старту,

заданий раніше командою `cmdLEVEL`. Тільки при перевищенні заданого рівня другий лічильник починає працювати.

Даний режим роботи надає можливість на відміну від попереднього записати сигнал повністю. Параметр `n` задає кількість вимірів, які необхідно зберегти у буфері до моменту перевернення рівня, вказаного в `cmdLEVEL`. В результаті використання даного режиму з'являється можливість підвищення рівня тригера запуску без втрати інформації про початок випробувань. Таким чином можна значно збільшувати рівень запуску над рівнем завад без втрати інформації.

`cmdSTOP` – використовується для переривання виконання попередніх команд.

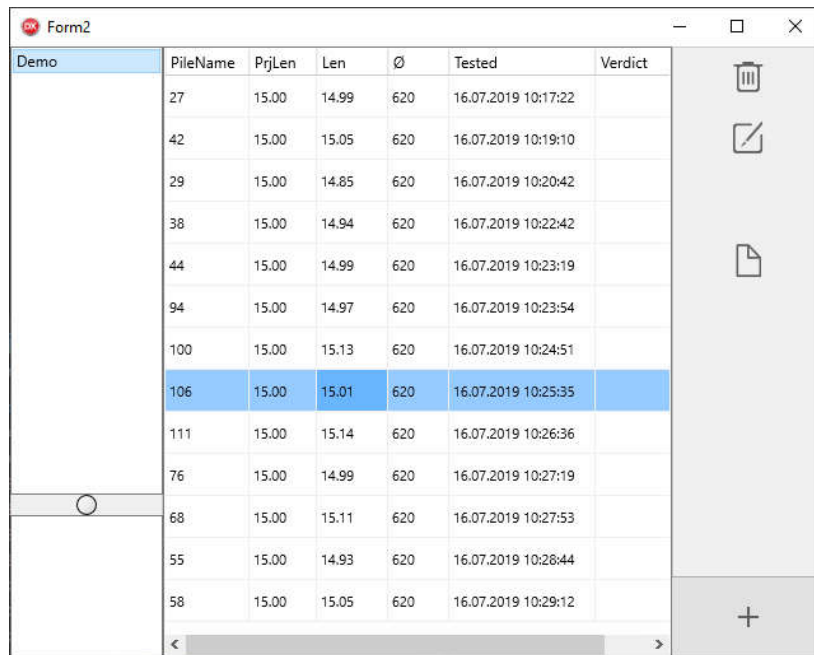
3.3.2 Прикладне програмне забезпечення для управління роботою експериментального зразку ІВСАД ЗП

Для проведення випробувань було розроблено спеціальне ПЗ, яке дає можливість враховувати велику кількість параметрів під час проведення обстежень, що зручно задля подальшого створення звітної документації. Для цього використовувалось середовище Embracadero RAD Studio 10.3. Це надало можливість зручно поєднати вихідний код для ОС Windows так і ОС Android. Зовнішній вигляд основного екрану програми для проведення обстежень неруйнівними методами зображено на рис. 3.19.

Всі випробування складаються у базу даних відповідно до наступних критеріїв: Фірма замовник → Об'єкт замовника → Елемент Об'єкта → Номер/назва конструкції.

Вибір даних критеріїв виконується оператором за допомогою візуальних компонентів перед початком обстежень.

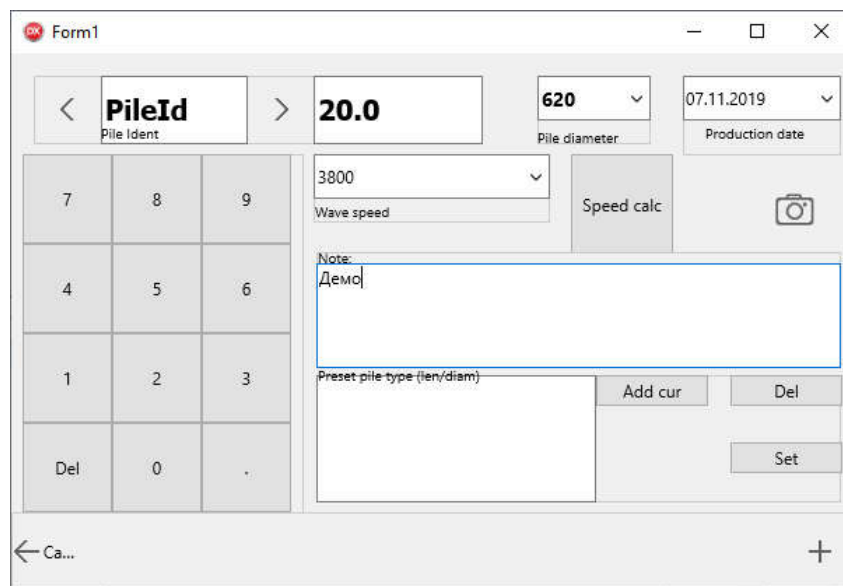
Випробування відображаються у вигляді списку з основними параметрами конструкції, у випадку паль це: номер, проектна довжина, діаметр палі, також включається дата проведення обстеження.



PileName	PrjLen	Len	Ø	Tested	Verdict
27	15.00	14.99	620	16.07.2019 10:17:22	
42	15.00	15.05	620	16.07.2019 10:19:10	
29	15.00	14.85	620	16.07.2019 10:20:42	
38	15.00	14.94	620	16.07.2019 10:22:42	
44	15.00	14.99	620	16.07.2019 10:23:19	
94	15.00	14.97	620	16.07.2019 10:23:54	
100	15.00	15.13	620	16.07.2019 10:24:51	
106	15.00	15.01	620	16.07.2019 10:25:35	
111	15.00	15.14	620	16.07.2019 10:26:36	
76	15.00	14.99	620	16.07.2019 10:27:19	
68	15.00	15.11	620	16.07.2019 10:27:53	
55	15.00	14.93	620	16.07.2019 10:28:44	
58	15.00	15.05	620	16.07.2019 10:29:12	

Рис. 3.19 Зовнішній вигляд основного екрану програми

Таким чином, для проведення нового обстеження необхідно спочатку вибрати чи задати параметри розташування конструкції. Діалог завдання параметрів конструкції наведено на рис. 3.20. Як видно з рисунку, є можливість вибору типу з/б конструкції з переліку, також є можливість для кожної конструкції додавати коментар, що надає допомогу під час проведенні аналізу результатів обстежень.



Form1

< **PileId** > **20.0** **620** 07.11.2019

Pile Ident Pile diameter Production date

7 8 9

4 5 6

1 2 3

Del 0 .

3800

Wave speed

Speed calc

Note:

Демо

Preset pile type (len/diam)

Add cur Del

Set

← Ca... +

Рис. 3.20 Діалог завдання параметрів конструкції

В перше поле вводиться ідентифікатор конструкції. За масового контролю, задля прискорення вводу за допомогою екранних кнопок «<» та «>» надається можливість швидкого вибору номера конструкції. За наявності суфіксів та префіксів у позначенні конструкцій необхідно ввести їх у відповідні поля. Таким чином назва конструкції формується автоматично у формі “Prefix.NPile.Suffix”.

В наступному полі вказується проектна довжина (За наявності цієї інформації). Якщо відомості щодо проектної довжини відсутні, рекомендується задавати проектну довжину рівною п'ятидесяти діаметрам палі; це надає можливість проаналізувати повністю всі данні, отримані в ході обстеження.

В поле «Ø» вводиться діаметр конструкції в точці проведення обстеження (зазвичай діаметр оголовку палі) або геометричні розміри у випадку прямокутного перетину конструкції.

В наступне поле вводиться дата виготовлення конструкції (при наявності відомостей). Дата проведення обстеження фіксується автоматично.

В поле «Wave speed» вводиться швидкість розповсюдження пружної хвилі стиску в бетоні. Даний параметр можна отримати за результатами поверхневого або наскрізного прозвучування. За відсутності цих відомостей слід використовувати розрахункове значення. Задля розрахунку швидкості пружної хвилі необхідно натиснути екранну кнопку «Speed calc», після чого з'явиться окреме діалогове вікно (рис. 3.21).

У лівій нижній частині вікна введення параметрів об'єкту обстежень знаходиться віртуальна цифрова клавіатура (KeyPad), призначена задля полегшення використання програми на планшетних комп'ютерах, які не обладнані «фізичною» клавіатурою.

Для розрахунку швидкості необхідно ввести вік палі та клас бетону. Також можна зробити зворотній рахунок за наявності відомих параметрів. По розрахунковій діаграмі у користувача є можливість зробити візуальний експрес-аналіз можливої похибки розрахунків.

В поле «Note» користувач може ввести додаткові відомості щодо конструкції, або примітки у довільній формі.

За необхідності можна здійснити фотофіксацію конструкції, натиснувши кнопку з відповідною піктограмою.

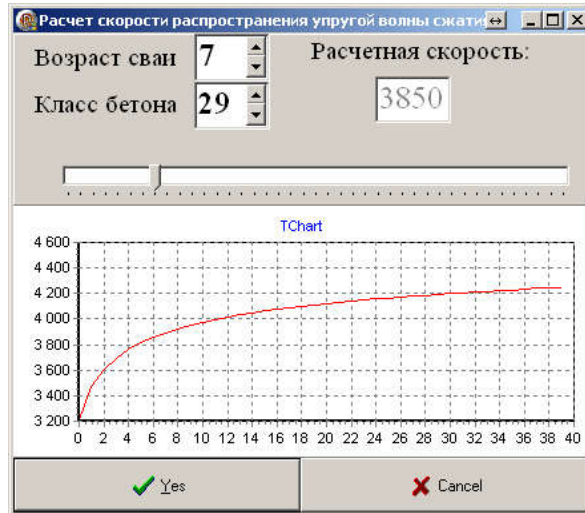


Рис. 3.21 Діалог розрахунку швидкості пружної хвилі

Для додаткових відомостей, що налаштовуються окремо, необхідно натиснути кнопку «More». У правій нижній частині знаходиться список типів паль, який зручно використовувати під час обстеження пального поля з декількома типами паль. Для додавання нового типу палі необхідно встановити параметри і натиснути кнопку «Add Cur», в результаті чого в список додається поточний тип палі. За необхідності видалення із списку елемента треба вибрати тип палі та натиснути кнопку «Del».

3.3.3 Прикладне програмне забезпечення для режиму віброударної діагностики паль

Для роботи з апаратним забезпечення системи віброударної діагностики паль створюється спеціальний «потік» (thread), який має звичайний пріоритет. На початку роботи потоку виконуються команди cmdLEVEL, cmdAMPL, cmdSIZE, cmdSIGN, які забезпечують базове функціонування системи. Решта команд виконується у відповідності до візуальної частини програми (рис. 3.22).

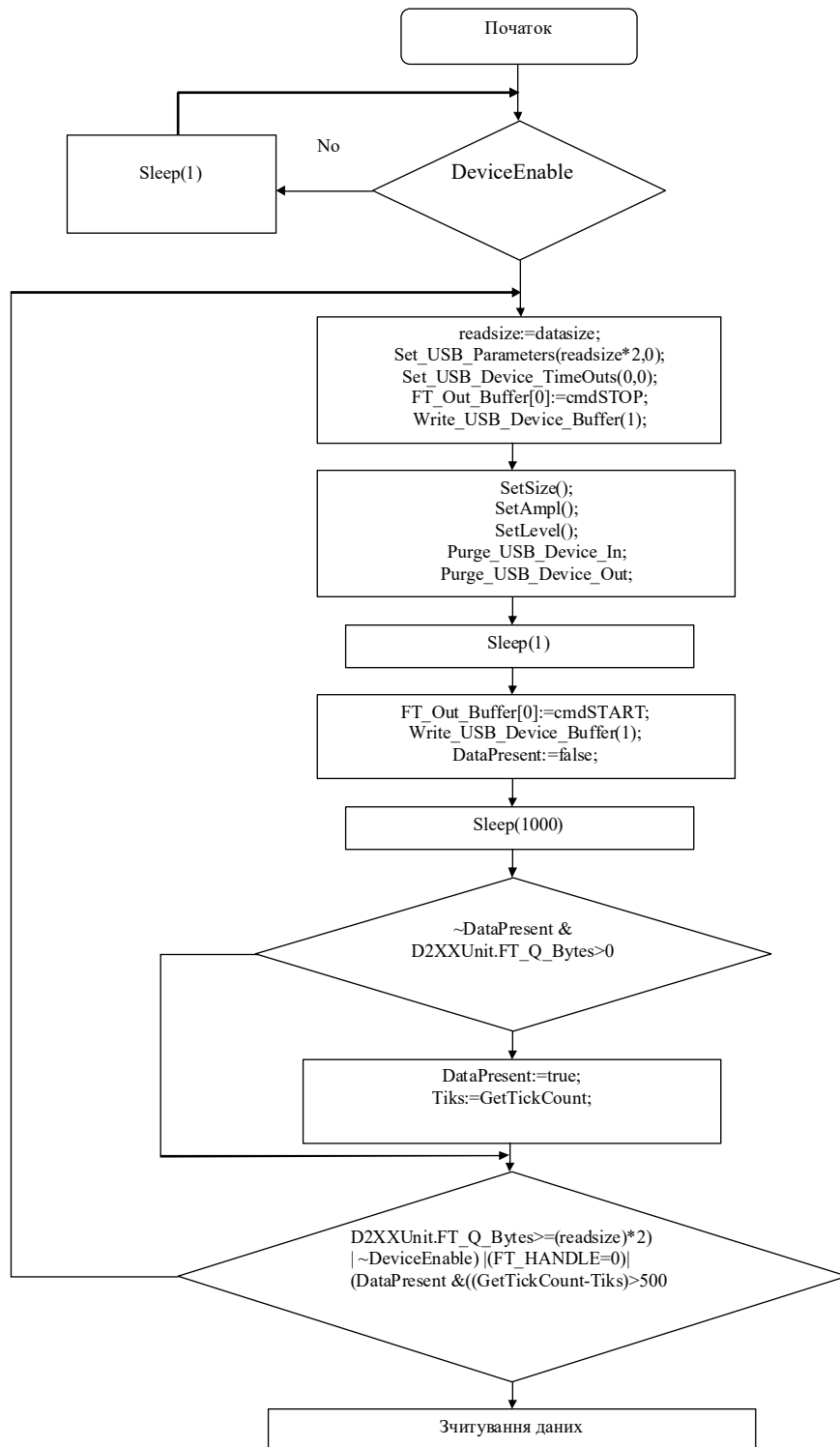


Рис. 3.22 Блок-схема функціонування програмного забезпечення збору інформації віброударної діагностики

Як видно з блок-схеми, програма функціонує як окремий потік, і отримання даних виконується як асинхронний процес, що залежить від

зовнішніх факторів, заданих основною програмою виконання. Керування процесом здійснюється за допомогою семафорів із основного потоку програми.

Задля зчитування даних використовується так звана call-back, процедура. Що викликається з асинхронного процесу зчитування даних при «готовності» даних з модулю збору інформації. Використання call-back процедури надає гнучкість системі, за різних режимів використовуються різні call-back процедури.

Процес проведення випробувань підлягає повному контролю оператором. Робоче вікно програми зображено на рис. 3.23. Для кожної конструкції, що обстежується, проводиться запис щонайменше п'яти вібраційних процесів. Оператор має доступ до кожного запису вібраційного процесу, зокрема, він може контролювати спектр виміряних вібраційних процесів. За необхідності оператор може видалити «невдалі» записи.

Зовнішній вигляд спектру надає оператору інформацію щодо якості проведеного обстеження. В деяких випадках по спектральному аналізу оператор має прийняти рішення по повторному обстеженню, якості закріплення датчиків, якості зовнішнього шару бетону тощо.

Під час проведення випробувань методом каротажу використовується автоматичне регулювання рівня підсилення. Який передається у буфері одразу після отримання значень лічильників енкодерів у буфері пакету даних.

Робочий екран під час проведення випробувань в режимі каротажу наведено на рис. 3.24.

У верхній лівій частині відображається поточна реалізація хвильового процесу. Центральна частина екрану відображає спеціальний режим, де по вертикальній шкалі відкладається значення енкодерів глибини, а по горизонтальній, з урахуванням бази прозвучування, відтворюються значення реалізацій у режимі контрастності, що надає можливість контролювати весь процес каротажу по всій глибині палі.

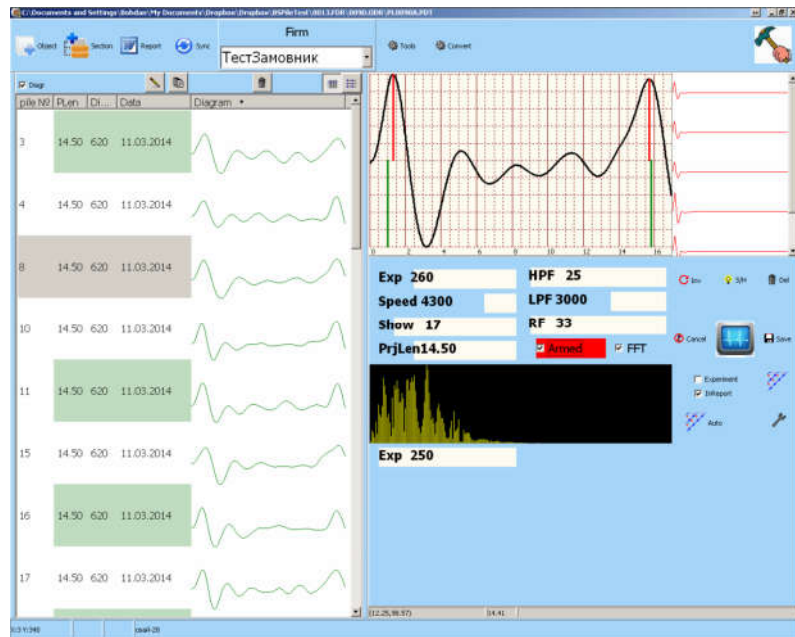


Рис.3.23 Робоче вікно програми віброударної діагностики

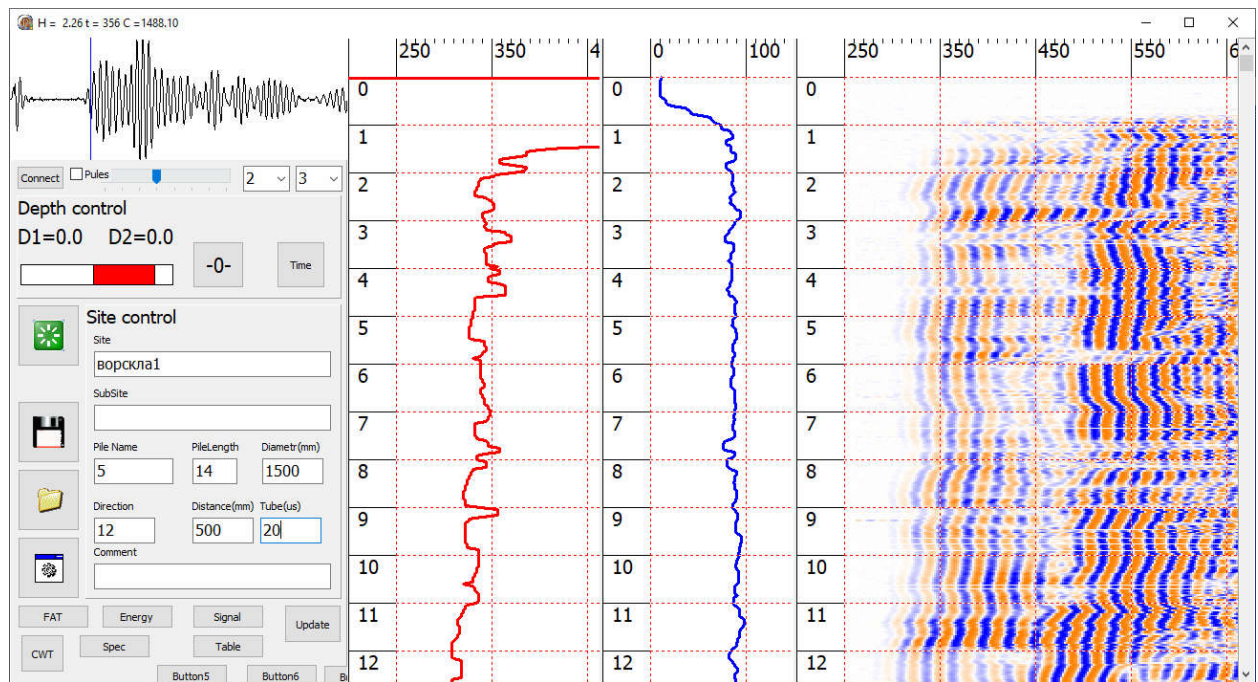


Рис. 3.24 Робочий екран програми в режимі каротажу

3.3.4 Формат зберігання даних

Задля збереження даних було вибрано деревоподібну структуру. На нижньому рівні дані представлені у вигляді файлів, які зберігаються у бінарному вигляді з блочною структурою, показаною на рис. 3.25.

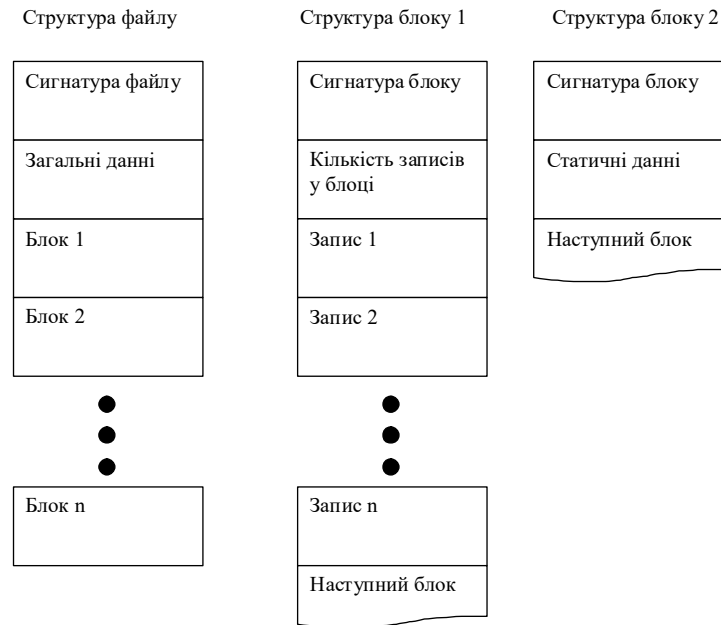


Рис. 3.25 Структура бінарного файлу

На початку файлу записується сигнатура (підпис) файлу (табл. 3.4), яка вказує процедурі зчитування правильно ідентифікувати данні з огляду на номер версії, оскільки після оновлення програмного забезпечення можливі зміни формату блоків. Далі зберігаються загальні дані по обстеженню конструкції. Блок починається з сигнатури. Блоки можуть бути двох основних типів: блок із статичними даними та блок із записами. Дана структура файлу дає змогу легко нарощувати можливості, забезпечує швидке завантаження і збереження даних. Дані в блоці можуть зберігатися в стиснутому вигляді. Тип алгоритму стиснення може варіюватися в залежності від типу даних. Приклад запису у блоці може мати наступну структуру (табл. 3.5):

Під час роботи з даними програма забезпечує «швидкий перегляд» з раніше встановленими параметрами, що дає змогу швидко знаходити необхідну інформацію. Для кожного рівня існує «картка», у який вказуються умови і характеристики вимірювань (розташування об'єкта, дата проведення експерименту тощо).

Всі збережені дані синхронізуються з хмарним сховищем за допомогою відомих програмних пакетів, наприклад, MEGASync або DropBox, що надають на даний момент 50Гб безкоштовного хмарного простору з можливістю

розширення понад 16Тб на комерційній основі та функціонують як на ОС Windows, так і ОС Android.

Таблиця 3.4

Формат файлу

Розмір	Тип даних	Призначення параметра
20	Byte	Сигнатура
20	String	Ім'я випробування
6	Real	Проектна довжина
4	Integer	Параметри бетону
8	TDateTime	Дата і час початку випробування
8	TDateTime	Дата і час завершення випробування
255	String	Коментар
4	Integer	Швидкість розповсюдження пружної хвилі
4	Integer	Масштаб відтворення
6	Real	Значення експоненціального підсилення
20	String	Ім'я випробування

Таблиця 3.5

Формат запису у блоці

Розмір	Тип даних	Призначення параметра
2	Word	Сигнатура блоку
4	Dword	Розмір блоку
...	...	Дані

3.3.5 Програмне забезпечення для попередньої обробки

У процесі луна дефектоскопії, як було розглянуто, за ударного збудження виникає низка хвильових процесів (продольні, поперечні, поверхневі, структурні і т.д.), з яких задля подальшого аналізу використовуються лише продольні хвилі. Отже до проведення аналізу необхідно провести цифрову фільтрацію даних. Для таких сигналів згідно з [107, 108, 110, 111] найбільш підходять рекурсивні фільтри високих порядків. Особливістю обробки є те, що корисний частотний діапазон може змінюватися в залежності від конструкції,

що діагностується, тому по [110, 111, 112, 113] було закладено розрахунок параметрів цифрових фільтрів.

Слід зазначити, що фаза приходу імпульсу від зміни хвильового опору є важливою діагностичною ознакою. Для усунення фазового зсуву фільтрів, виконується фільтрація вхідних даних в двох напрямках. Завдяки цьому прийому зсув фази фільтра значно зменшується і не впливає на подальший аналіз. Текст основного модуля розрахунку має лінійну структуру, тому алгоритми не наводяться.

Як показала практика каротажу, під час проведені обстежень внаслідок тертя та ударів в каналах доступу виникають завади імпульсного характеру. Для усунення таких завад найбільш підходить фільтрація нелінійним медіанним фільтром.

3.3.6 Програмне забезпечення для визначення чисельних параметрів розподілу та гістограмного аналізу по системі кривих Пірсона

У результаті вимірювання за допомогою ІВСАД процесу протягом фіксованого проміжку часу отримується низка послідовних впорядкованих у часі відліків, що називається часовим рядом. Таким чином, фізичний процес з неперервним часом замінюється послідовністю випадкових величин, отриманих в окремі моменти часу. Для того, щоб проводити аналіз такого процесу коректно з імовірнісної точки зору, необхідно припустити, що процес є сепарабельним [72]. Практично сепарабельність процесу означає, що він повністю описується послідовністю скінчено-вимірних функцій розподілу. Крім того, самі випадкові величини, послідовністю яких замінюється реальний фізичний процес, квантовані по рівню, тобто їхні значення належать деякому фіксованому набору, що залежить від кількості розрядів АЦП. Внаслідок цього значення статистичних оцінок моментів, обчислені за такими послідовностями, мають методичну похибку, усунути цю похибку можна за допомогою поправок Шеппарда [92, 93]. Але, враховуючи той факт, що сучасні АЦП мають досить велику кількість розрядів, поправки Шеппарда мають настільки малі значення,

що практично не впливають на кінцевий результат оцінки. Тому явище квантування по рівню не будемо брати до уваги.

Вібраційні процеси, що реєструються ІВАСД ЗП під час діагностики, є, по суті, нестационарними випадковими процесами, але параметри, що характеризують їхні розподіли з імовірнісної точки зору, змінюються в часі досить повільно [93, 94]. Цей факт дає можливість вважати часові ряди, отримані під час вимірювання згаданих процесів на коротких часових проміжках, стаціонарними.

Додатково припустимо, що для досліджуваних часових рядів справедлива ергодична гіпотеза. Умова ергодичності дає змогу під час знаходження статистичних оцінок параметрів процесу, який представлений часовим рядом, замінити усереднення по ансамблю реалізацій усередненням за часом по одному часовому ряду.

Нехай X_k – відліки часового ряду, $k = \overline{1, N}$, N – ціле число, кількість елементів вибірки. В рамках вказаних вище припущень статистичні оцінки параметрів розподілу досліджуваного процесу мають наступний вигляд [73].

математичне сподівання:

$$\nu_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k.$$

центрований часовий ряд:

$$\overset{\circ}{X}_k = X_k - \nu_1, \quad k = \overline{1, N}.$$

початковий момент n -го порядку:

$$\nu_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_k)^n, \quad n = 1, 2, \dots. \quad (3.1)$$

центральний момент n -го порядку:

$$\mu_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\overset{\circ}{X}_k \right)^n, \quad n = 3, 4, \dots. \quad (3.2)$$

Зазначимо, що формула оцінки математичного сподівання ν_1 (початковий момент першого порядку) співпадає з виразом (3.1) за $n=1$. Але оцінка

дисперсії μ_2 (центрального моменту другого порядку) за виразом (3.2) за $n = 2$ виявляється зміщеною [73], тому вона не використовується.

Незміщена оцінка дисперсії знаходиться за виразом [73]

$$\mu_2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(X_k - \bar{X} \right)^2.$$

Коефіцієнт асиметрії і коефіцієнт ексцесу відповідно:

$$k = \frac{\mu_3}{\sqrt{\mu_2^3}}; \quad \gamma = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3.$$

Параметри Пірсона:

$$\beta_1 = k^2; \quad \beta_2 = \gamma + 3; \quad S = \frac{6(\beta_2 - \beta_1 - 1)}{3\beta_1 - 2\beta_2 + 6}; \quad \kappa = \frac{-\beta_1(S+2)^2}{16(S+1)}.$$

Алгоритм вибору типу кривої, що найкращим чином відповідає розподілу експериментальних даних, наведений на рис. 3.26.

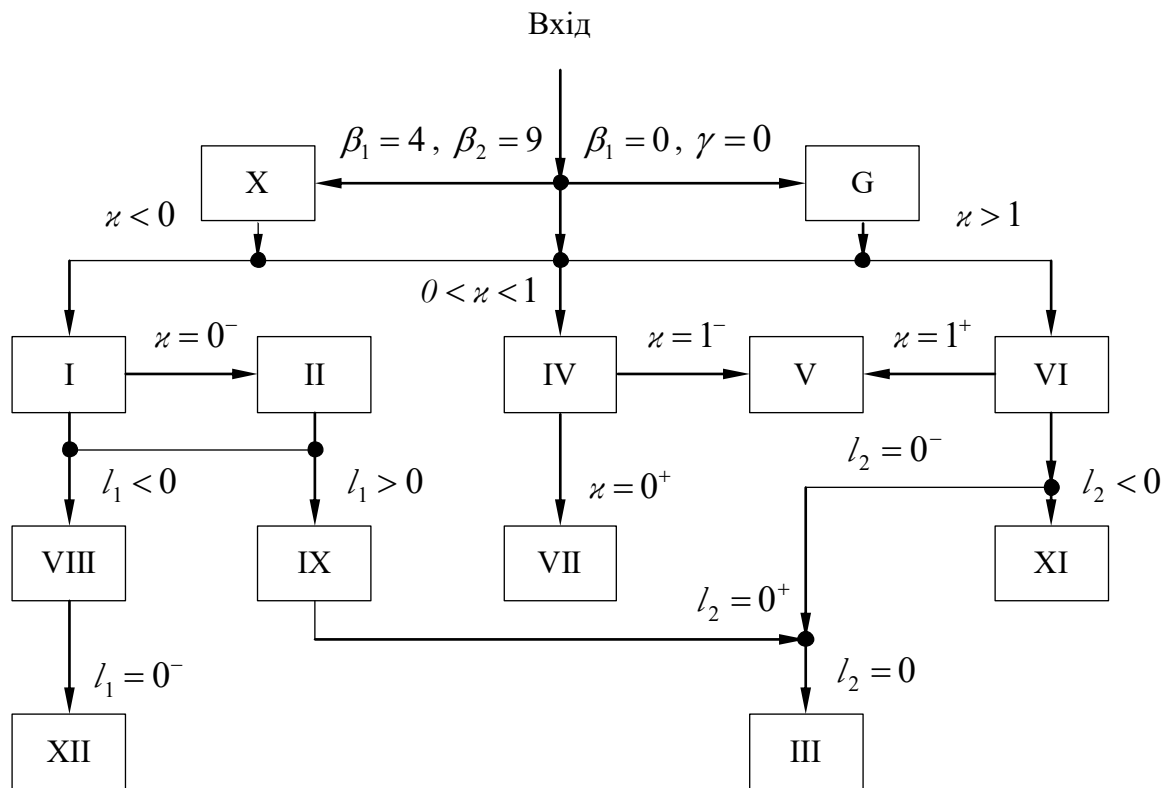


Рис. 3.26 Схема алгоритму підбору кривих Пірсона

Вирази для щільності розподілу в залежності від типу кривої, межі області визначення кривих, формули для визначення додаткових параметрів для вибору типу кривої (таких як l_1 , l_2) не наведено, їх можна знайти в [72].

Діаграму розподілу типів кривих Пірсона, побудовану в площині параметрів форми кривої (β_1, β_2) , зображено на рис. 3.27.

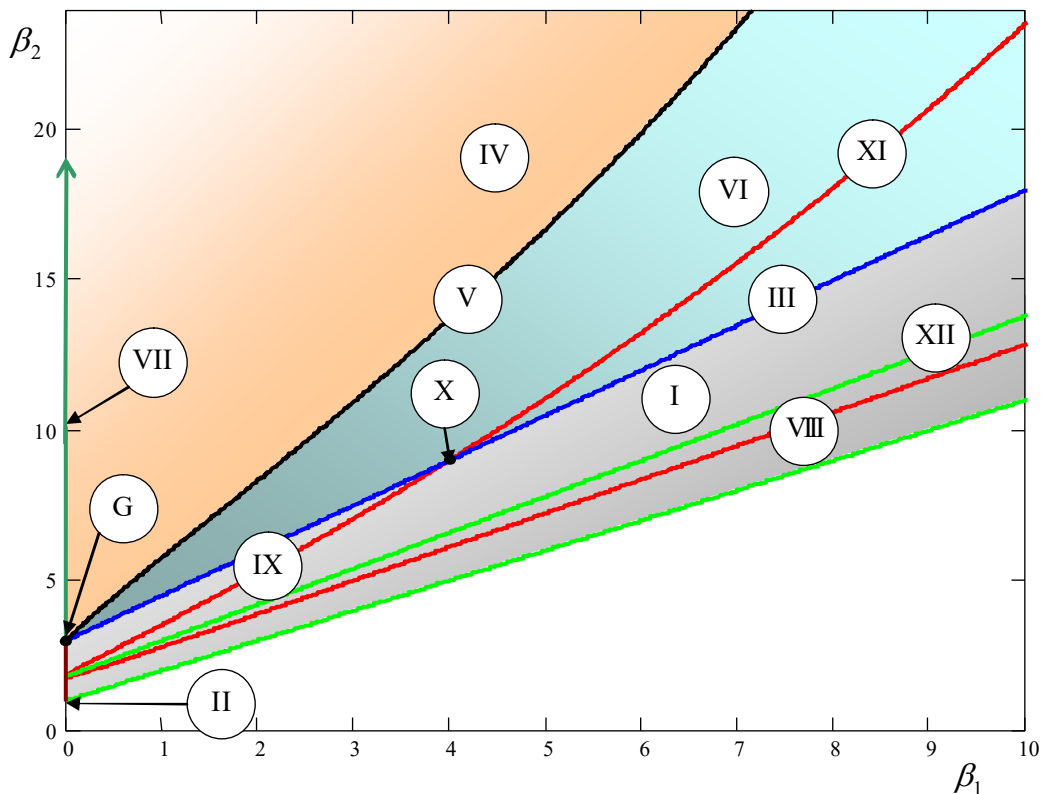


Рис. 3.27 Діаграма кривих Пірсона в площині (β_1, β_2)

Параметри β_1 і β_2 визначають, наскільки крива асиметрична і деформована по вертикальній осі відносно нормальної кривої Гауса (точка G на діаграмі рис. 3.27). Кожній експериментально отриманій гістограмі відповідає деяка точка на цій діаграмі.

Алгоритм на рис. 3.27 фактично визначає, до якої області потрапляє ця точка. Це дає основний тип Пірсона: I, IV або VI. Далі визначається, до якої з ліній (чи точок) перехідних типів експериментальна точка лежить достатньо близько. Ці типи пропонуються як альтернативи основним типам, оскільки їхні вирази простіші за записом і містять менше параметрів, ніж основні. Тому з

ними простіше працювати у подальшому проведенні статистичного аналізу експериментальних даних.

Використання програми гістограмного аналізу діагностичних сигналів

Основне вікно програми PIRSON наведено на рис. 3.28. Воно розділено на кілька смислових частин.

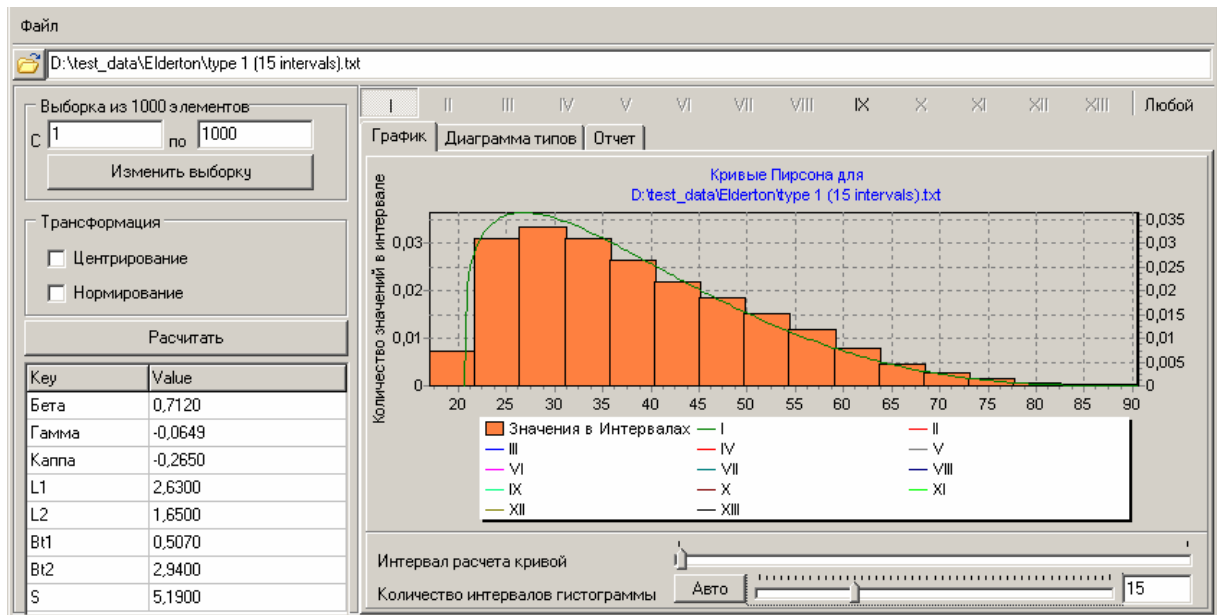


Рис. 3.28 Основне вікно програми PIRSON

Вхідні дані для програми PIRSON оформляються у виді текстового файлу (у кодах ASCII).

В лівій частині вікна містяться елементи управління для вибору частини вибірки: «С (.....) по (.....)», центрування та нормування часового ряду, а також кнопка для запуску розрахунків. Після натискання на неї в нижньому лівому куті вікна програми виводяться числові значення розрахованих параметрів, а в правій частині вікна – графічні або табличні результати, вибір між якими здійснюється за допомогою закладок.

Приклад відображення гістограми з накладеним на неї графіком вибраної кривої наведено на рис. 3.28, а діаграми типів – на рис. 3.29.

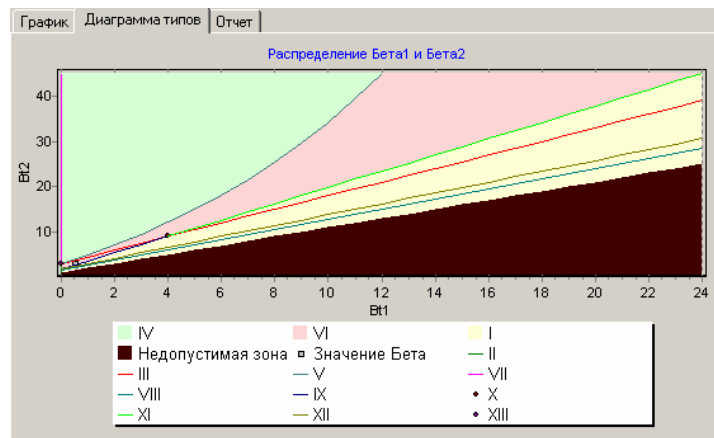


Рис. 3.29 Діаграма типів

Звіт про результати розрахунків у текстовій формі, що містить значення всіх розрахованих параметрів, а також таблиці, за якими можна побудувати графіки, в сторонній програмі.

Звіт містить наступне:

- вид гістограми: центрована, нормована чи ні;
- обсяг вибірки, кількість інтервалів у гістограмі;
- оцінки початкових моментів;
- оцінку дисперсії, середньоквадратичного відхилення, інтервал гістограми, найменше і найбільше спостереження;
- оцінки центральних моментів, коефіцієнти асиметрії й ексцесу, каппи Пірсона;
- тип згладжуючої кривої та її параметри (по можливості – більше однієї кривої);
- таблиці значень згладжуючої кривої та гістограми, відповідні їм графіки.

На закладці, котра відображає звіт про результати розрахунків у текстовій формі, є додаткові кнопки, що дозволяють записати в текстовий файл вибірково деякі табличні результати.

За можливості підбору кількох типів кривих Пірсона одночасно, з'являється можливість вибрати тільки ті з них, які необхідні, для цього введено кнопки від «I» до «XIII».

Програма спектрально-кореляційного аналізу

Для спектрально-кореляційного аналізу вимірних реалізацій вібраційних процесів для ІВСАД ЗП було включено програму SPECTR. Вона вирішує задачу обчислення авто-кореляційної функції і спектра потужності досліджуваного сигналу.

Під час визначення оцінки авто-кореляційної функції використовується метод усереднення за часом, а при перевірці гіпотези про “нуль-кореляцію” – t^2 -статистика Стюдента. Задля одержання згладжених оцінок спектральної щільності застосовується метод спектрального вікна.

Програма працює у відповідності з наступним узагальненим алгоритмом:

- знаходиться оцінка математичного сподівання часового ряду;
- здійснюється центрування ряду;
- знаходяться оцінки авто-кореляційної функції за виразом:

$$\tilde{R}_1(S) = \frac{1}{N-S-1} \sum_{k=1}^{N-S} \overset{\circ}{X}_k \cdot \overset{\circ}{X}_{k+S}, \quad S = \overline{0, I},$$

де $\overset{\circ}{X}_k$ – відліки центрованого часового ряду; N – кількість елементів вибірки; I – максимальний зсув.

– знаходяться оцінки нормованої авто-кореляційної функції (нормування за дисперсією);

– для оцінок нормованих кореляційних функцій гаусових часових рядів здійснюється перевірка гіпотези про «нуль-кореляцію»;

– за допомогою перетворення Фур’є знаходиться оцінка спектральної щільності досліджуваного процесу.

Задля побудови згладжених оцінок спектральних щільностей $\tilde{S}_k(f)$ досліджуваного сигналу використовується метод спектрального вікна [72, 73].

У розробленій програмі використовується наступне вікно:

$$V(S) = \begin{cases} 0,5 \left(1 + \cos \frac{\pi S}{I} \right), & S \leq I, \\ 0, & S > I. \end{cases}$$

Часовий ряд, що аналізується, програма зчитує з файлу вхідних даних. Числові результати записуються у файл, графіки спектрів виводяться на екран монітора.

Якщо всі параметри задані вірно, слід натиснути кнопку «ОК». Після цього з'явиться нове вікно, в якому можна задати крок або частоту дискретизації та параметри відображення спектру. Після виконаних дій буде розраховано і відображено розрахований графік спектра потужності досліджуваного сигналу (рис. 3.31), а також автоматично буде створено текстові файли з таблицями даних по кореляційній функції та спектру потужності.

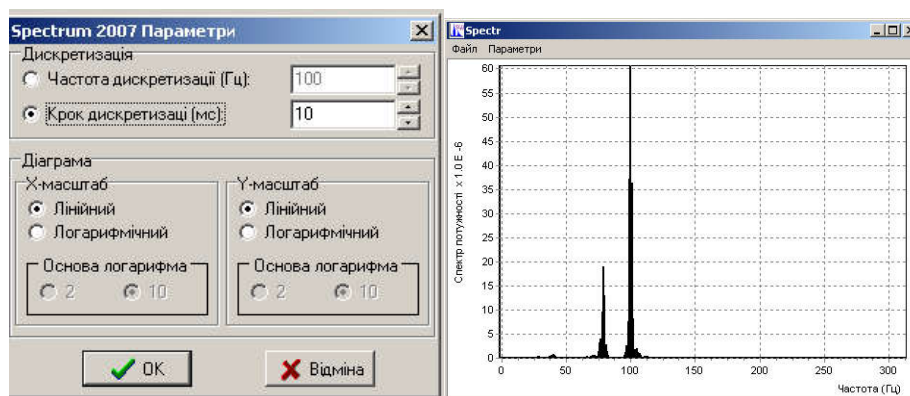


Рис. 3.30 Вікно вибору параметрів та отриманий спектр потужності

Детальна блок-схема алгоритму роботи програми не наводиться, оскільки програму побудовано за принципом обробки подій, внаслідок чого не має чіткої послідовності операторів.

Текст основного модуля програми SPECTR знаходиться в Фонді алгоритмів і програм.

3.3.7. Формування звітної документації

Формування звітної документації здійснюється в автоматичному режимі відповідно до підготовленого шаблону. Для формування звіту необхідно зі списку вибрати об'єкт, де були збереженні дані, та натиснути кнопку  Report.

Після цього автоматично з'явиться вікно програми MS Word, у якому біде

відкрито файл зі сформованим звітом, котрий можна роздрукувати, зберегти чи надіслати електронною поштою.

Шаблон для формування звітної документації слід підготувати заздалегідь за допомогою програми MS Word. Для цього створюється документ за необхідною для користувача формою, у якому на місці необхідних параметрів вставляються умовні маркери, які у процесі формуванні звіту будуть автоматично замінені на значення відповідних параметрів. Приклад шаблону наведено на рис. 3.32, де маркери задля кращого сприйняття виділено штриховкою.

Шаблони звітів мають розташовуватися у папці Reports.

АКТ №{AktNum} від {Date}
 “ЗАТВЕРДЖУЮ”
 Керівник лаб. ДАКіС
 _____ Городжа А. Д.
 “___” _____ 2015р.

АКТ №{AktNum}
 за результатами обстежень
 паль акустичним неруйнівним методом звукової луно-дефектоскопії
 на об’єкті будівництва: {ObjName}/{SecName}

Свідчення ДП «Укрметртестстандарт» про перевірку робочого засобу вимірювальної техніки {SvidNum} чинне до {SvidDate}.

Результати обстеження:

№ з/п	№ палі	Швидкість поширення пружної хвилі стиснення, м/с	Визначена довжина, м	Характер та наявність дефектних ділянок стовбуру палі (від верхньої відмітки палі)
{BeginTbl}				
{Npp}	{PileN}	{PileSpeed}	{PileLen}	{PileVerdict}
{EndTbl}				

Параметр	Значення	Діаграма/Висновок
{BeginTbl}		
{Npp}	палі № {PileN} Швидкість (м/с) {PileSpeed} Експонента {PileExp} Проектна довжина (м) {PilePrjLen} Визначена довжина (м) {PileLen} Діаметр палі (мм) {PileDiam} Дата обстеження {PileDate}	{PileDiagr} {PileVerdict}
{EndTbl}		

Сертифікований спеціаліст (II рівень)
 з неруйнівного контролю

Трощинський Б.О.

Рис.3.31 Приклад шаблону звіту про результати обстеження

3.4. Основні види похибок і оцінка метрологічних характеристик розробленого експериментального зразка комп'ютерної системи акустичної діагностики залізобетонних паль

Вимір і наступна обробка зареєстрованих реалізацій хвильових процесів з використанням системи, а отже і результати обстеження конкретних конструкцій, супроводжуються методичними та інструментальними похибками [117-120].

Методичні похибки виникають під час визначення:

- часових і амплітудних характеристик окремих імпульсів на зареєстрованій реалізації;
- лінійних розмірів обстежуваних конструкцій, розмірів дефектів та їхньою локалізацією.

Інструментальні похибки обумовлені:

- використанням датчиків для перетворення акустичних сигналів в електричні та аналогових елементів у тракці перетворення сигналів;
- перетворенням аналогових сигналів у цифровий код для наступної їхньої обробки в ПК.

Розглянемо методику експериментального визначення похибок системи. Метрологічна атестація і наступні перевірки [121-124] включають одержання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) та виміри:

- часових інтервалів;
- швидкості поширення пружної подовжньої хвилі в залізобетонних і кам'яних конструкціях;
- загасання пружної хвилі в матеріалі конструкції;
- лінійних розмірів конструкцій;
- відстаней від точки збудження пружної хвилі до відбивачів.

Одержання АЧХ системи повинно відбуватися в режимі реального часу в діапазоні частот від 0,1 до 51кГц. Спад і підйом АЧХ у децибелах варто визначати за формулою:

$$\delta = 20 \lg \frac{A_f}{A_1},$$

Де A_f - амплітуда запису на досліджуваній частоті;

A_1 — амплітуда запису на частоті 1кГц.

Задля одержання АЧХ на вхід кожного вимірювального каналу необхідно подати синусоїдальний сигнал від зразкового генератора, наприклад, Гб-28, різної частоти, з амплітудами, що відповідають $0,1U_{\max}$; $0,3U_{\max}$; $0,7U_{\max}$; і $1U_{\max}$, де $U_{\max}$ – верхня границя динамічного діапазону по вхідних напругах. Процедура перевірки у відповідності зі схемою, показаною на рис. 3.32, відбувається у наступному порядку:

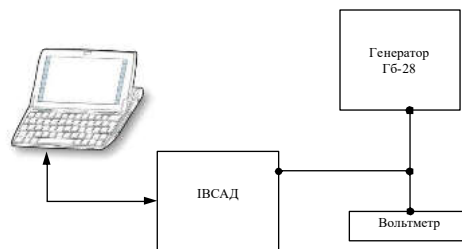


Рис. 3.32 Схема повірки АЧХ та визначення похибки під час вимірюванні напруги імпульсів, що виникають на виходах акустичних датчиків.

а) для дослідження каналу № 1 у діалоговому вікні програми (рис. 3.9) включається відповідний канал, коефіцієнт підсилення $K=10$, частота дискретизації $f=1\text{МГц}$, після чого включається режим передачі даних у ІВСАД. На виході генератора встановлюється діюча напруга $0,3\text{ В}$ частотою 100 Гц . Кнопкою ручного пуску активізується режим виміру, після чого в режимі обробки визначається величина вимірюваної напруги $U_{\text{вим}}$ що реєструється у протоколі метрологічної атестації. Процес вимірів продовжується на всьому діапазоні частот $100\dots 50\times 10^3\text{ Гц}$ із 1-октавною зміною. Ті самі дії повторюються з напругами на виході генератора $1; 2,1; 3\text{ В}$ при коефіцієнтах підсилення $K=4; 8; 16, 32, 64, 128$ відповідно.

б) для дослідження каналу №2 необхідно провести аналогічний набір вимірів (40 на канал) у зазначеному діапазоні частот за $U_{\text{дійсне}} = 0,15; 0,45; 1;$

1,5В та К 128, 64, 32, 16, 8, 4 відповідно. Відносна похибка δ_A , і під час виміру напруги сигналів визначається згідно з формулою:

$$\delta_A = \frac{U_{\text{дійсне}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{дійсне}}} \cdot 100\%$$

Задля визначення відносної похибки вимірювання часових інтервалів (δ_t) [121-124] до входів запуску і каналу №1 підключаються виходи генератора Г5-56, рис. 3.32. На виходах генератора необхідно сформувати сигнали прямокутної форми з амплітудою 1 В и тривалістю 50 мкс, зміщені одне відносно другого на час $t_d = (1000; 10000; 20000 \text{ мкс})$, де t_d - “дійсне” значення часового інтервалу, відповідно до сигналів, зображених на рис. 3.16. Потім, як і під час дослідженні АЧХ каналу №1, у діалоговому вікні програми включається відповідний канал, коефіцієнт підсилення $K=16$, частота дискретизації $f=1 \text{ МГц}$, показник експоненти $\beta = 0$; після чого включається режим передачі даних до КВІ. Режим виміру активізується автоматично, оскільки на вході запуску присутній сигнал від першого виходу генератора. У режимі обробки визначається величина вимірюваного інтервалу $t_{\text{вим}}$ і результат виміру заноситься до протоколу.

Відносна похибка δ_t , під час виміру часових інтервалів визначається за формулою:

$$\delta_t = \frac{U_d - U_{\text{вим}}}{U_d} \cdot 100\%$$

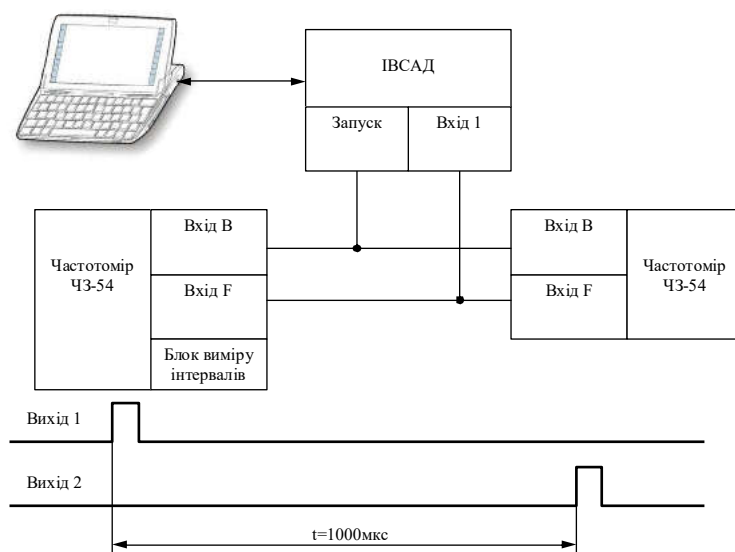


Рис. 3.32 Схема визначення відносної похибки вимірювання часових інтервалів та сигналів часових інтервалів на виході генератора Г5-56

Перевірку засобів акустичного неруйнівного контролю у режимах виміру швидкості пружних хвиль у матеріалах і виміру лінійних розмірів об'єктів контролю проводять на стандартних зразках з періодичним калібруванням останніх. Специфічного метрологічного забезпечення для засобів неруйнівного контролю великогабаритних залізобетонних конструкцій не розроблено. Для даних цілей пропонується використовувати стрижень із сталі або дюралюмінію довжиною 2-4 м. і діаметром 0,1-0,3 м. Калібрування цього зразка по швидкості пружної хвилі можна робити за допомогою ультразвукового приладу УК-10ПМС. Для цього необхідно зібрати схему у відповідності з рис. 3.29. Як датчики застосовуються шукачі з комплекту УК-10ПМС на 25 кГц. Далі, керуючись інструкцією з експлуатації приладу, виміряти “дійсну” швидкість пружної хвилі у зразку v_d , результат занести до протоколу, зібрати схему у відповідності з рис. 3.33.

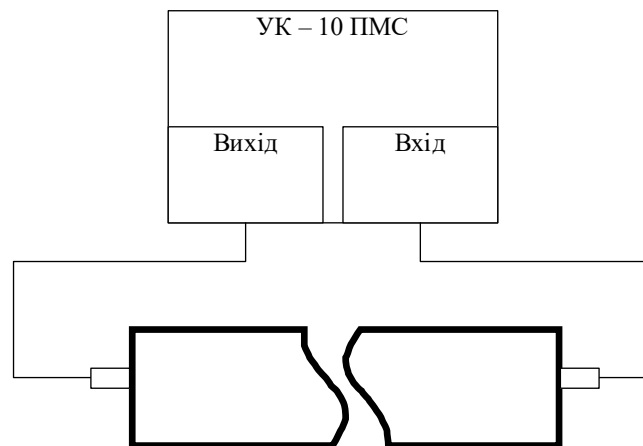


Рис. 3.33 Схема калібрування зразка по швидкості пружної хвилі.

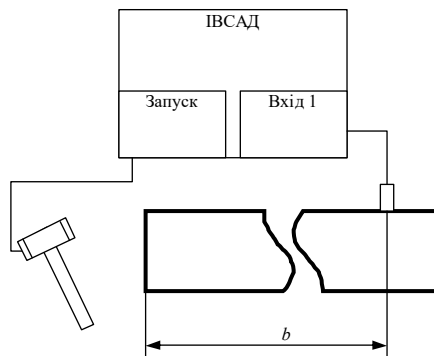


Рис. 3.34 Схема вимірювання «дійсної» швидкості пружної хвилі у зразку

База b вводиться в систему як постійний коефіцієнт. Вимір b , у свою чергу, необхідно робити сертифікованою рулеткою, що пройшла періодичну перевірку у встановленому порядку.

Під час вимірювання швидкості системою в діалоговому вікні включити канал №1 з коефіцієнтом підсилення $K=16$. Запустити систему ударом молотка по торцю стрижня. Вимірювану швидкість $V_{вим}$, проходження пружною хвилею у стрижні на базі b занести до протоколу. Відносна похибка δ_v визначається по формулі:

$$\delta_v = \frac{V_d - V_{вим}}{V_d} \cdot 100\%$$

Розрахунок похибки визначення лінійних розмірів конструкцій і відстаней від точки збудження пружної хвилі до відбивачів є заключним етапом метрологічної атестації. На відміну від попередніх пунктів досліджень, у даному випадку одночасно працюють усі входи, включаючи запуск. Як робочий еталон використовується той же металевий стрижень (див. рис. 3.35). “Дійсна” довжина стрижня l_d , вимірювана звичайними засобами, заноситься до протоколу. У діалоговому вікні програми включаються всі канали з коефіцієнтом підсилення $K=1$. Запускають систему ударом молотка по торцю стрижня, на якому встановлені датчики. Отримана системою довжина стрижня $l_{вим}$ вноситься до протоколу. Відносна похибка δ_l під час визначення лінійних розмірів конструкцій обчислюється за формулою:

$$\delta_l = \frac{l_d - l_{вим}}{l_d} \cdot 100\%$$

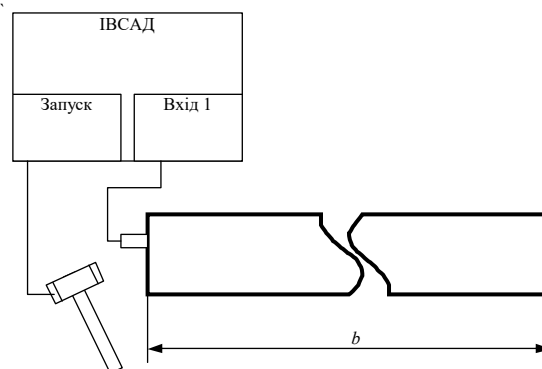


Рис 3.35 Схема визначення відносної похибки вимірювання лінійних розмірів конструкцій і відстаней від точки збудження пружної хвилі до відбивачів

На основі матеріалу, що викладений в підрозділі, розроблена програма метрологічної атестації, яка затверджена в Українському державному науково-виробничому центрі стандартизації, метрології і сертифікації (УкрЦСМ), інтервал проведення повірки 1 рік. У відповідності до програми було проведено метрологічну атестацію, про що отримано свідоцтво УкрЦСМ №22-03/20624 чинне до 12 лютого 2022р. Свідоцтво додається (Додаток Б).

Висновки до розділу 3

1. Розроблено структурну схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок інформаційно-вимірювальної діагностичної системи, у якій, на відміну від відомих систем, передбачений блок, що забезпечує вибір відповідної навчаючої сукупності для проведення діагностування залізобетонних паль різного типу

2. Запропоновано методи оцінки метрологічних параметрів ІВСАД. На відміну від існуючих, створені методи дають змогу оцінювати загальну похибку вимірювального каналу створеного зразка ІВСАД, яка зумовлена наявністю в ньому аналогової і цифрової частин. У відповідності до програми було проведено метрологічну атестацію, про що отримано свідоцтво УкрЦСМ. Сумарна відносна інструментальна похибка аналогової і цифрової частин вимірювального каналу розробленого ІВСАД, призначеного для обробки вібраційних сигналів складає $2\% \leq \delta_{\text{сум}} \leq 3\%$.

Посилання: [50, 72, 73, 92 – 124]
див. список використаних джерел стор. 174 – 180.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗРОБЛЕНОГО ЗРАЗКУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

У даному розділі наведено результати експериментальних досліджень паль різними методами неруйнівного контролю. Методом віброударної діагностики досліджувались буроінекційні робочі палі, виготовлені в різних геологічних умовах а також дослідні палі, в яких при виготовленні були штучно закладені дефекти. Дослідні палі обстежувались двічі: через 7 діб після виготовлення та після витягнення їх з ґрунту. За допомогою дослідного зразку системи, шляхом сумісного застосування методів віброударної діагностики і акустичного каротажу було проведено комплексні обстеження бетонних стовпів. На основі аналізу отриманих результатів сформовано банк даних, який містить статистичну інформацію щодо вимірювань довжини занурених в ґрунт залізобетонних паль, а також стосовно експериментально перевірених діагностичних ознак для визначення фактичного технічного стану обстежених паль.

4.1 Описання експериментів з діагностики різних типів залізобетонних паль з використанням розробленої системи

Для перевірки працездатності системи а також створених методів віброударної діагностики та акустичного каротажу було вибрано декілька будівельних майданчиків в межах України. Експерименти проводились на палях, виготовлених за буроінекційною технологією.

4.1.1 Експериментальні дослідження стану паль з використанням луна-акустичного інформаційного каналу

Для підготовки і проведення експериментів з діагностики технічного стану паль був обраний будівельний майданчик, розташований в мікрорайоні Осокорки, 11. На цьому об'єкті фірмою «Фундамент» з метою проведення

комплексного обстеження якості виготовлення буро-ін'єкційних паль (БІП), було виготовлено дві дослідні палі з глибиною закладення 7 м.

Одну палю було виконано з дотриманням технологічних вимог, а інша з порушенням – на визначених ділянках швидкість підйому шнека перевищувала швидкість наповнення бетоном. Передбачалося, що підвищення швидкості підйому шнека призведе до утворення дефектів у вигляді звужень (шийок) і навіть обриву стовбура палі.

Процес виготовлення палі (буріння свердловини й бетонування стовбура палі) контролювався комп'ютерною системою контролю (КСК), яка встановлена на верстатах фірми “Фундаменту”. Саме ця комп'ютерна система зареєструвала два порушення стовбура палі.

Через 7 діб після виготовлення, дослідні палі було випробувано луна-методом за допомогою ІВСАД. Безпосередньо після проведення випробувань луна-методом палі було витягнуто із ґрунту, піддано лінійним вимірам, а бетон паль був випробуваний на міцність за допомогою ультразвукового приладу УК-14П. Після цього палі були ще раз обстежено луна-методом.

Дані, отримані КСК якості виготовлення БІП

Комп'ютерна система контролю якості виготовлення БІП призначена для спостереження за параметрами технологічних процесів буріння свердловини й бетонування стовбура палі. Оператор завдяки системі має можливість спостерігати протікання процесів у реальному часі.

У Додатку 1 приводяться роздруківки графіків, отриманих комп'ютерною системою під час виготовлення дослідних паль. У процесі розгляду роздруківки графіків дефектної палі на графіку «форма палі» спостерігаються місця, де оператор навмисно зроблено два дефекти. На графіку “швидкість бетонування” видно, що на відмітці 6.37 м оператор почав піднімати шнек з більшою швидкістю, ніж необхідно, ця відмітка вказує на початок утворення дефекту. Нормальну швидкість бетонування було відновлено на відмітці 5,5 м. Початок утворення другого дефекту розташовано на відмітці 3.37 м, а відновлення нормальної швидкості бетонування – на відмітці 2.37 м.

Під час розгляду роздруківки бездефектної палі видно, що заповнення свердловини бетонною сумішшю зроблене рівномірно без будь-яких звужень, відносно швидкості бетонування.

Випробування луна-методом занурених у ґрунт паль за допомогою ІВСАД. Безпосередньо перед витягуванням із ґрунту палі були випробувані з використанням луна-методу. В якості вимірювальних перетворювачів при проведенні експериментів застосовувалися сейсмо-перетворювачі (сенсори швидкості) і акселерометри (сенсори прискорення).

Випробування бездефектної палі проводилися з доступного її торця (оголовку). В якості первинного перетворювача використовувався сенсор швидкості СВ-10.

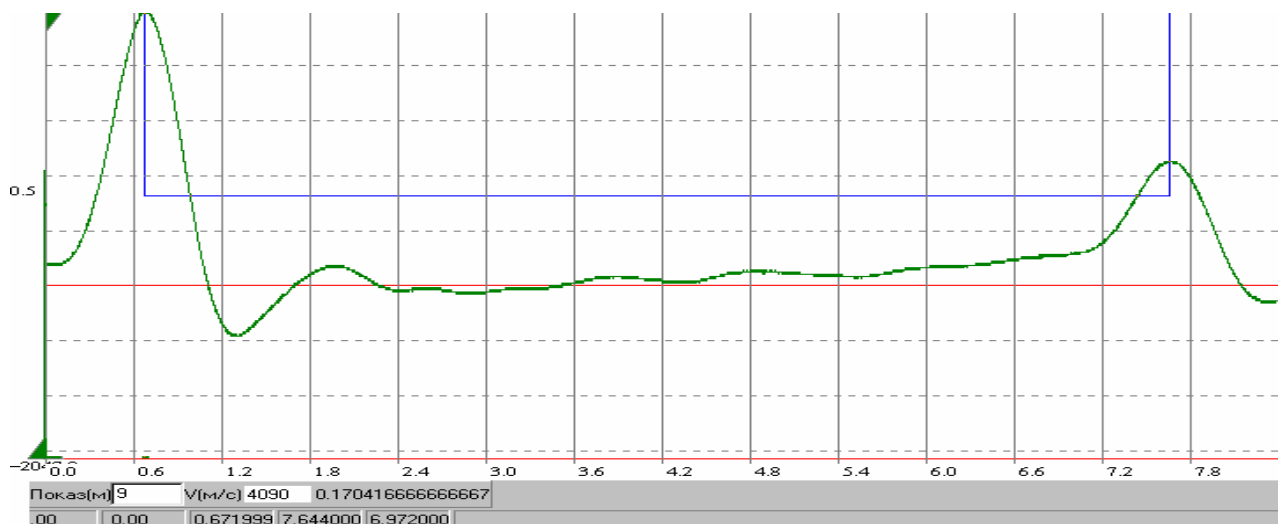


Рис. 4.1 Реалізація хвильових процесів в бездефектній палі

Відсутність значних за амплітудою відлунених імпульсів при впливі зонduючого імпульсу на торець палі свідчить про те, що у даній палі відсутні значні зміни хвильового опору, а відповідно – і в якості бетону та геометричних розмірах по довжині. Визначена швидкість пружної хвилі стиску складає 4090 м/с при довжині палі 6,97 м.

Отриману за допомогою ІВСАД реалізацію хвильових процесів в дефектній палі перед вилученням палі із ґрунту наведено на рис. 4.2.

Випробування проводилося шляхом нанесення збуджуючого удару з єдиного, доступного торця палі.

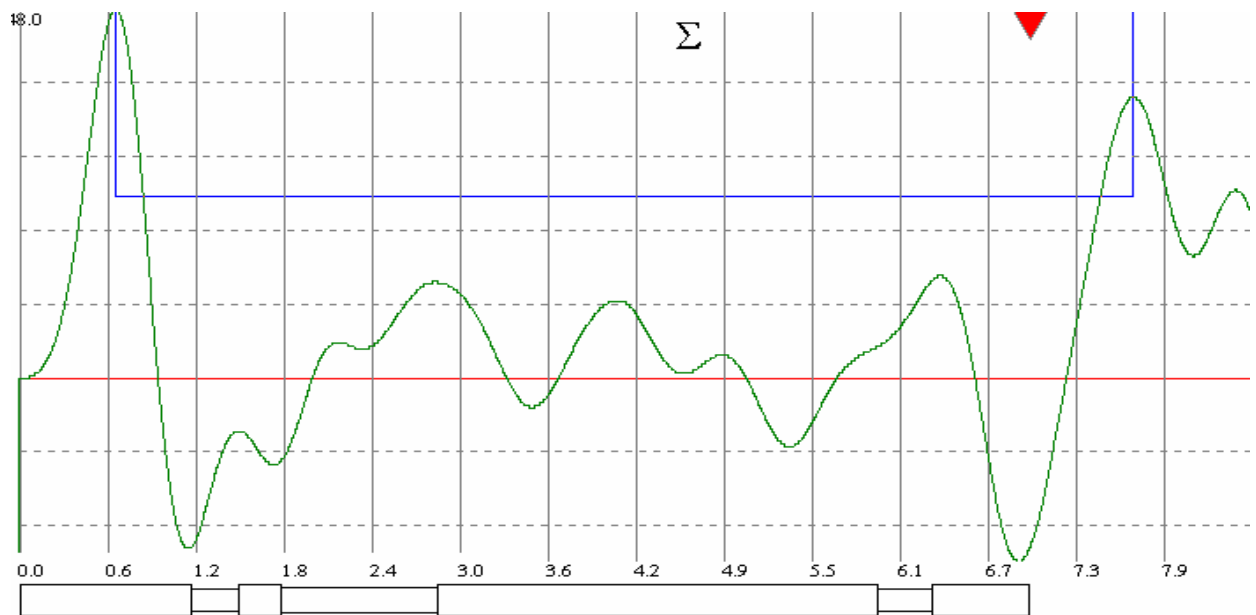


Рис. 4.2 Реалізація хвильових процесів в дефектній палі

У цьому випадку визначена швидкість пружної хвилі стиску має трохи менше значення у порівнянні з бездефектною палею, і склала 4000 м/с при довжині палі 7,01 м. Менше значення швидкості може бути обумовлено наявністю в палі дефектів. Перший дефект перебуває на ділянці 1,2 – 1,45 м, другий – на ділянці 1,9-3,0 м, останній третій дефект знаходиться на ділянці 5,3 – 6,7 м.

Лінійні розміри дослідних паль

Після вилучення палі із ґрунту було проведено вимірювання її довжини й діаметра. Палю було витягнуто без візуальних пошкоджень, тобто дефектів не було виявлено (Рис.4.4).

Під час вилучення дефектної палі із ґрунту було витягнуто тільки її частина довжиною 5.8 м, нижня частина довжиною 1.2 м залишилася у ґрунті. Обрив стовбура палі відбувся в місці навмисно утвореного дефекту. У процесі огляду верхньої частини стовбура палі виявлено на визначеному місці довжини палі другий створений штучно дефект. Під час проведення цих експериментів було також проведено вимірювання геометричних розмірів витягнутої частини палі і зафіксовані розміри виявлених дефектів (див. Рис. 4.4.б).



а)



б)



в)

Рис. 4.3 Процес вилучення дослідних паль (а). Місце обриву палі (б).

Дефектна ділянка в вилученій палі (в)

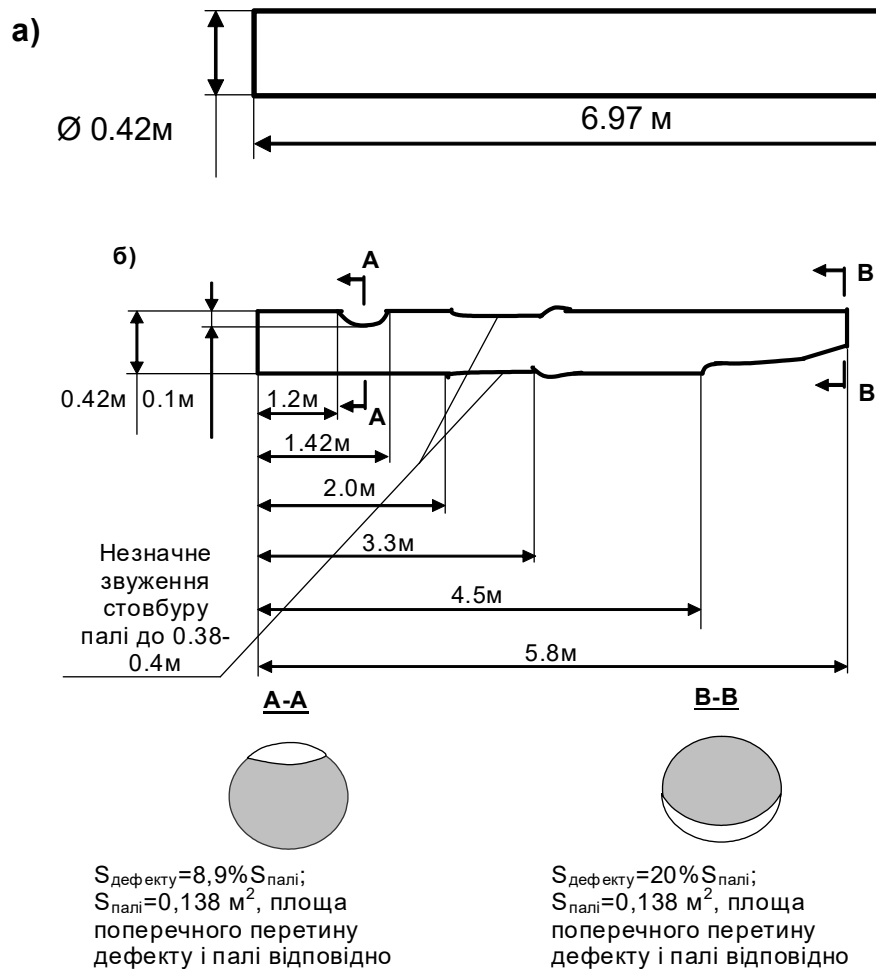


Рис. 4.4 Лінійні розміри дослідних паль (а– бездефектна, б–дефектна)

Ультразвукові випробування витягнутих з ґрунту паль

Після вилучення із ґрунту палі було очищені від оточуючого ґрунту і проведено їх ультразвукові випробування за допомогою приладу УК-14П. Ці експерименти виконувались за допомогою двох сенсорів (випромінювачем і приймачем) розміщеними діаметрально (один напроти одного), із кроком вимірювання через кожні 0.5 м по всій довжині палі.

При проведенні цих експериментів здійснено 14 вимірювань, за кожним з яких реєструвався час проходження сигналу між випромінювачем і приймачем. Крім того фіксувалася відстань між ними. За отриманими показниками часу

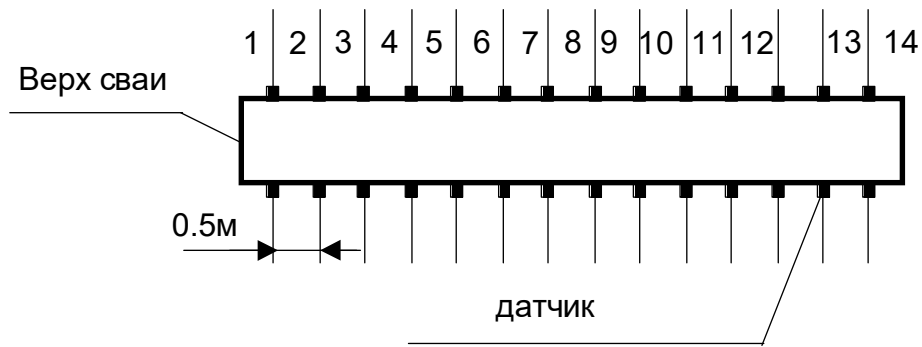


Рис. 4.5 Розміщення сенсорів при УЗ випробуванні якісно виготовленої палі проходження ультразвуку в бетоні t , і відстані між випромінювачем і приймачем l , було встановлено швидкість поширення ультразвукової хвилі в бетоні V як відношення відстані до часу:

$$V=l/t.$$

За даними швидкості ультразвукової хвилі можна зробити висновки щодо якості бетону по всій довжині палі (див. Табл. 4.1).

Таблиця №4.1

Швидкість УЗ хвиль якісно виготовленої палі

№ виміру	Час проходження сигналу, t , мкс	Відстань між випромінювачем і приймачем, м	Швидкість поширення ультразвуку, V , м/с
1	111.0	0.465	4189
2	105.7	0.45	4257
3	102.8	0.43	4183
4	101.7	0.43	4228
5	102.4	0.435	4248
6	98.8	0.42	4251
7	99.7	0.43	4313
8	96.7	0.415	4292
9	97.4	0.415	4261
10	97.2	0.415	4270
11	97.6	0.415	4252
12	96.4	0.415	4305
13	96.3	0.41	4258
14	87.1	0.37	4243
Середня швидкість $V_{ср} = 4254$ м/с			

Аналіз значень швидкості поширення ультразвуку в бетоні показує, що бетон по всій довжині палі, в основному, однорідний і відповідає проектному значенню.

В дефектній палі було виконано 11 вимірювань, дані випробувань і обчислень наведено у таблиці №4.2.

Таблиця №4.2

Швидкість УЗ хвиль дефектної палі

№ Виміру	Час проходження сигналу, t , мкс	Відстань між випромінювачем і приймачем, l , м	Швидкість поширення ультразвуку, V , м/с
1	108.3	0.44	4063
2	101.0	0.425	4208
3	94.5	0.41	4339
4	95.7	0.41	4284
5	92.0	0.415	4511
6	102.6	0.44	4288
7	111.2	0.485	4362
8	91.0	0.405	4451
9	92.0	0.405	4402
10	100.6	0.44	4374
11	98.1	0.405	4128
Середня швидкість $V_{cp} = 4310$ м/с			

Отримані значення швидкості поширення ультразвуку в бетоні свідчать про те, що міцність бетону палі практично не відрізняється від першої.

Визначення швидкості пружної хвилі стиску.

Під час випробування пружна хвиля збуджується з одного торця палі, прийомні сенсори встановлюються на фіксованій відстані один від одного по стовбуру палі. У даному випробуванні застосовувалися як прийомні сенсори акселерометри Д14.

Швидкість хвилі визначається як відношення відстані між прийомними сенсорами до часу проходження хвилі між першим і другим сенсором з боку удару.

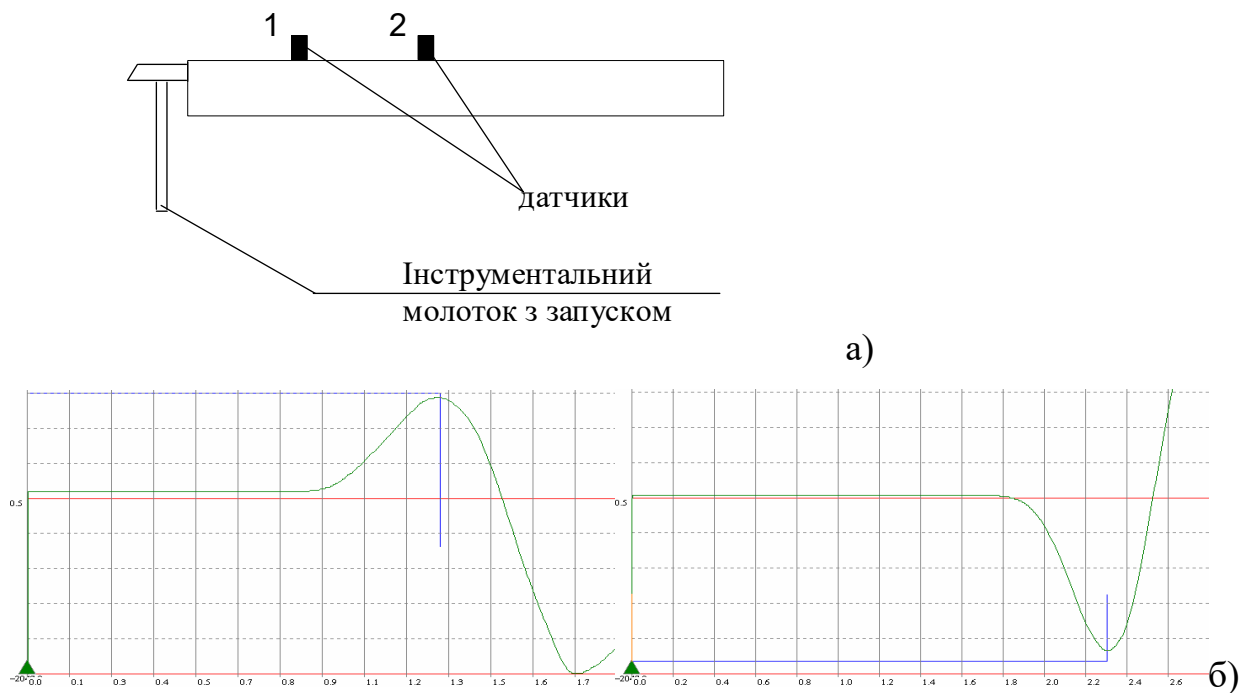


Рис. 4.6 Схема визначення швидкості поширення пружної хвилі стиску (а), та отримані сигнали (б)

За вимірюваним часом та відомих геометричних розмірах (рис. 4.6), визначено швидкість пружної хвилі, що дорівнює 4100 м/с. Приймні сенсори було встановлено на відстані 2,0 м один від одного. Піки зондувальних сигналів першого й другого датчиків знаходяться в точках 1,304м і 2,304м, їхня подвоєна різниця й становить відстань між датчиками $2,304\text{м} - 1,304\text{м} = 2,0\text{ м}$.

Випробування луна-методом.

При здійсненні цих експериментів треба враховувати, що хвиля доходить до кінця палі, відбивається від нього й вертається назад, де й сприймається прийомним сенсором як відбиття від кінця палі. Під час цього випробування визначається наявність дефектів у палі (тріщини, порожнечі, звуження).

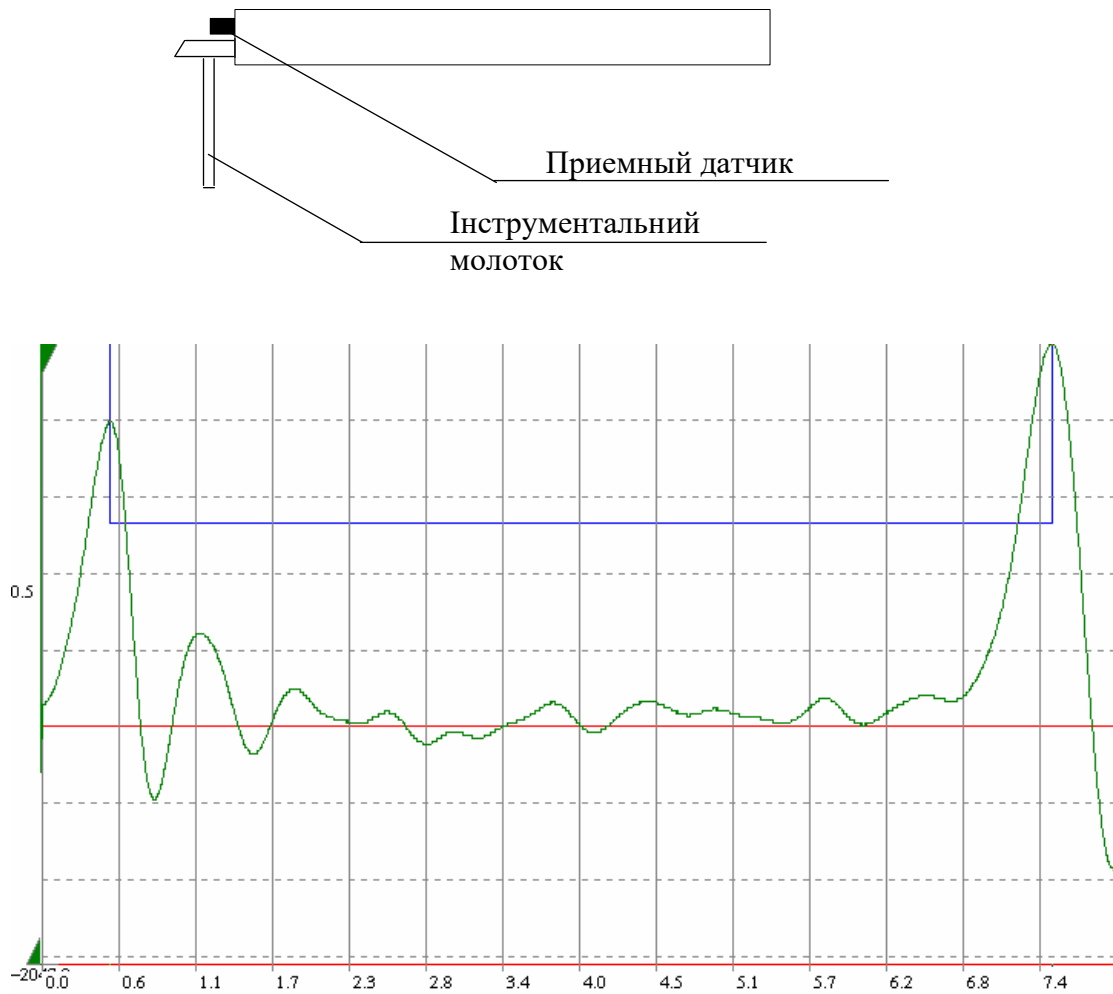


Рис.4.7 Схема визначення швидкості поширення пружної хвилі

Під час проведення даного випробування значення швидкості пружної хвилі було встановлено, отримане з попереднього випробування 4100 м/с. Визначена за зареєстрованими даними довжина палі становить 6,97 м, що відповідає її фізичній довжині.

Дефектну палю, як і попередню, було виготовлена довжиною 7,0 м. Але під час її вилучення із ґрунту вдалося витягти тільки її частину довжиною 5,8 м. Частина палі довжиною 1,2 м залишилася в ґрунті. Обрив палі відбувся в місці навмисно створеного дефекту.

За різницею в часі максимальних вступів другого і першого датчиків визначалося значення необхідної швидкості для проходження фіксовані відстані між датчиками.

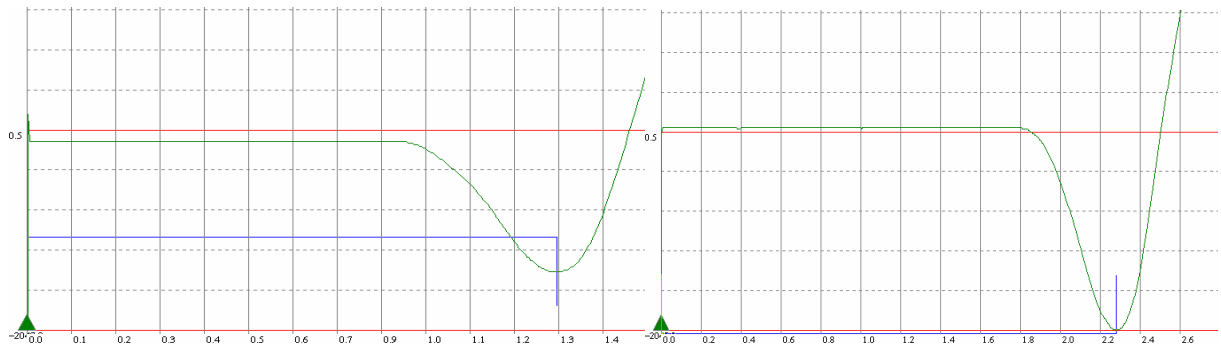


Рис. 4.8 Отримані сигнали задля визначення швидкості поширення пружної хвилі стиску

З наведених на сигналів рис. 4.8 визначено, що швидкість пружної хвилі дорівнює 4100 м/с. Приймні датчики було встановлено на відстані 2,0 м один від одного. Піки зондувальних сигналів першого й другого датчиків знаходяться в точках 1,276 м і 2,276 м, їхня подвоєна різниця й є відстанню між датчиками $2,276 - 1,276 = 2,00$ м.

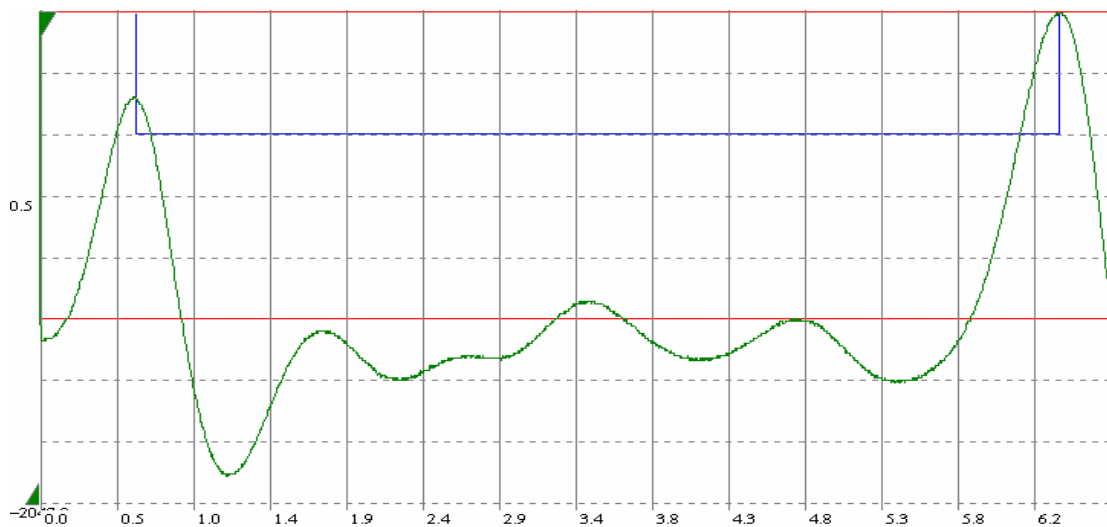


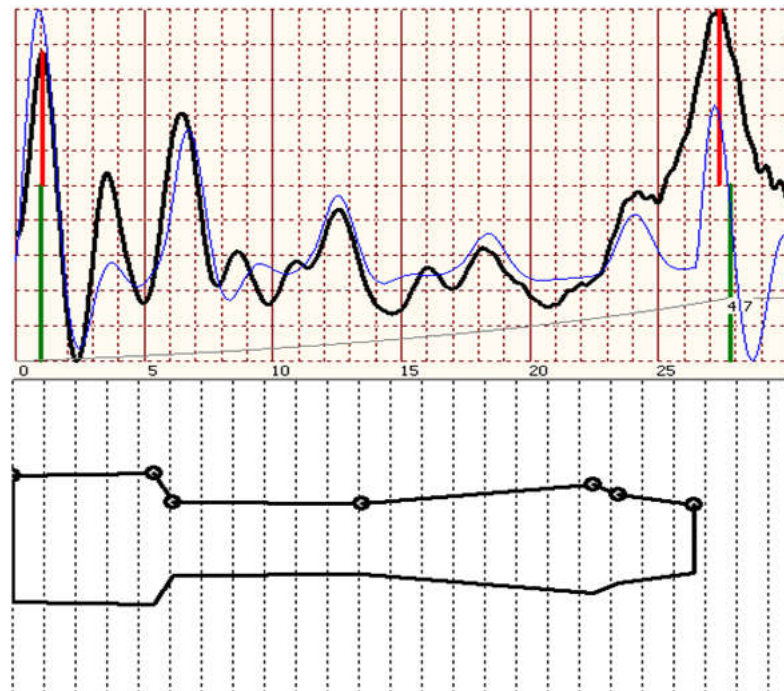
Рис.4.9 Сигналограма випробування «дефектної» палі

Під час проведення даного випробування швидкість пружної хвилі була встановлено 4100 м/с (визначено з попереднього випробування). Довжина витягнутої частини палі становить 5,78 м, що відповідає фактичним розмірам.

4.1.2 Досвід практичного застосування ІВСАД на об'єкті будівництва.

На об'єкті будівництва «Будівництво житлових будинків з об'єктами соціально-побутового обслуговування та паркінгами по вул. архітектора

Вербицького у Дарницькому районі м Києва. Житловий будинок № 2» перед проведенням статичних випробувань було обстежено палі випробувальних кущів. В одній із палей був виявлено дефект. Після проведення статичних випробувань палю було відкопано і зрублено нижче відмітки дефекту. Візуальний огляд підтвердив наявність дефекту до 15-20% від перетину палі на визначеній ділянці. Результати обстеження палі, а також зовнішній вид дефекту наведено на Рис. 4.10.



Послаблення перетину палі 15-20%
на ділянці 4.5–5.0м.

Чорна крива – отримана реалізація хвильових процесів.
Синя крива – отримана реалізація на основі побудованої моделі.

Примітка: модель зображена не в масштабі.



Рис. 4.10 Хвильові процеси, модель та зовнішній вид палі

4.1.3 Експериментальні дослідження стану паль з використанням каналу акустичного каротажу спільно з луна-методом

На об'єкті будівництва «Будівництво автомобільної дороги державного значення М-03 Київ-Харків-Довжанський, в Полтавській області» ІВСАД ЗП використовувався для проведення діагностування паль та бурових стовпів. Задля проведення обстежень методом акустичного каротажу було запроектовано і реалізовано улаштування каналів доступу. Як канали доступу використовувалися тонкостінні металеві труби. Вони закладалися та встановлювалися підрядником під час будівництва бурових стовпів (рис.4.11)



Рис. 4.11 Арматурні каркаси бурових стовпів з закріпленими каналами доступу

Труби каналів доступу мали внутрішній діаметр від 38 до 50 мм, були прямими та вільними від внутрішніх перешкод і встановлені на всю довжину (до підошви) бурових стовпів. Згідно з [51, 52, 125] задля забезпечення достатнього покриття поперечного перерізу, рекомендується закладати кількість каналів в залежності від діаметру бурових паль і стовпів. За діаметрів 1000 – 1500 мм рекомендовано використовувати три канали доступу в проекті на будівництво фундаменту.

Випробування проводилися через 3-7 діб після бетонування (рис.4.12) в залежності від класу бетону і діаметру стовбуру (стовбури більшого діаметру ближче до 7 діб). Перед початком обстежень, було зафіксовано конфігурацію і параметри каналів доступу, що будуть тестуватись, включаючи вимірювання відстаней між центрами каналів, висоту каналів доступу над бетоном (висота труб над бетоном не повинна перевищувати 0,5 м). Додатково за допомогою вимірювальної стрічки визначалась довжина кожного каналу доступу з точністю до 10 мм. Якщо канал доступу був заблокований, фіксувалася глибина блокування з верхньої позначки бетону даного каналу. Перед початком вимірів канали було повністю заповнено водою. Задля налаштування пристрою зонди повільно опустили до нижньої відмітки каналів для вибору значень оптимальних потужності передавача та коефіцієнту підсилення сигналів приймача, які забезпечують якісний ультразвуковий імпульс з хорошою амплітудою. Як свідчить практика, буровий стовп зверху та знизу більш імовірно містить забруднений бетон, ніж у проміжних місцях. Налаштування посилення сигналу здійснювалося в проміжному місці уздовж довжини елемента.

На рис.4.13 наведено акустичні профілі отримані за результатами каротажу, та сигналограму хвильового процесу, отриману під час луна-дефектоскопії палі №2 опори №3. На ділянці 10.0–12.3 м від відмітки оголовку зафіксовано значне збільшення значення FAT і падіння величини відносної енергії, вони перевищували допустимі значення, вказані в [51, 52, 125]. Луна-метод підтвердив розрив палі на відмітці 10.0 м. Подальший аналіз виявився неможливим внаслідок того, що більша частина енергії ударного імпульсу відбивалася від краю дефекту в початкову точку, решта – згасла в дефектному шарі. Встановити довжину за допомогою луна-методу в даному випадку неможливо.



Рис. 4.12 Обстеження бурових стовпів співробітниками НДЛ "ДАКіС" на новому будівництві мостового переходу в Туркменістані на річці Амудар'я та Подольсько-Воскресеньському мостовому переході у м. Києві

Таким чином, обидва метода виявили серйозну проблему з палею, проте каротаж надав більше інформації і з більшою точністю.

На рис. 4.14 наведено результати діагностування палі №36 опори №3. Під час аналізу акустичних профілів виявлено дефектну ділянку на протязі 7.0–8.0 м від поверхні палі. На профілі 2-3 послаблення знаходиться в припустимих стандартами [51, 52, 125] межах, а на 1-2 і 1-3 значно виходить за норму.

Під час діагностування луна методом було визначено, що на ділянці від 7.0 до 8.0 м має місце послаблення до 20% від перетину палі. Порушення цілісності палі відсутнє. Додатково були виявлено поширення перетину палі на ділянці 18.5–20м, яке неможливо було виявити за міжканальним акустичним каротажем.

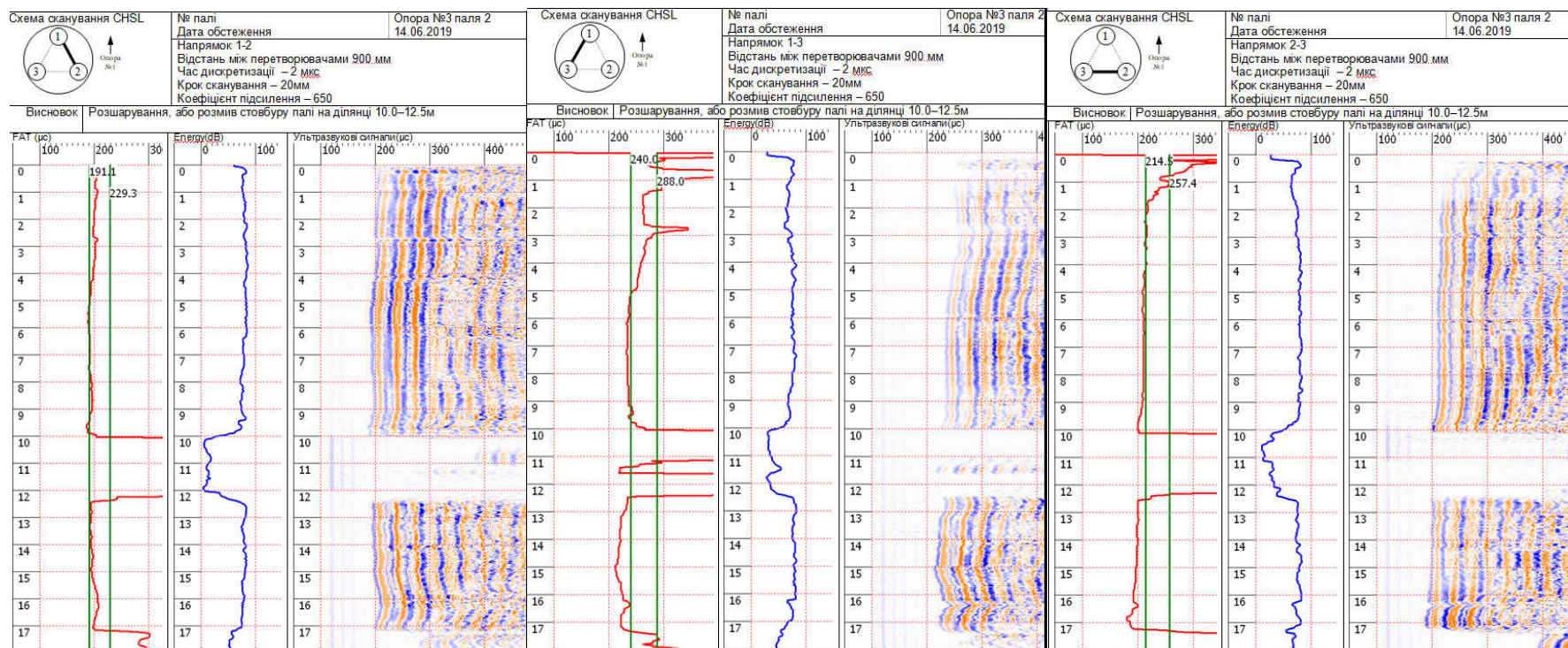


Рис. 4.13 Акустичні профілі: вгорі – багатоканальний каротаж, внизу – результати луна-методу

Для уточнення даних було проведено одно-канальний акустичний каротаж за схемою наведеною на рис. 1.17.6. Зонди було рознесено на відстань 50 см і послідовно опущено в кожен канал. Під час аналізу використовувались данні по відносній енергії, так як на значення FАТ впливають фізичні ефекти по переломленню хвиль, і зміна значення FАТ не корелює з фізичними властивостями бетону. Результати підтвердили наявність проблеми навколо каналу №1 і в меншій ступені – навколо №3. Також було виявлено аномалію навколо каналу №1 на ділянці від 19.0 до 20.5м, де луна-методом виявлено поширення стовбуру.

Слід зазначити, що всі використані методи виявили незначне послаблення на ділянці 11–12м.

Таким чином обидва метода виявили проблеми з якістю палі. Каротаж в цьому випадку виявив дефектну ділянку, але не надав інформацію щодо наявності поширення. Використання одно-канального каротажу дало можливість уточнення характеристик дефектної ділянки, надало часткову інформацію про наявність аномалії в нижній частині палі, але не ідентифікувало характер аномальної ділянки.

4.1.4 Експериментальні дослідження стану паль з використанням комплексного акустичного методу

Обстеження існуючих будівель і споруд пов'язано з додатковими складностями під час проведенні діагностування. Розглянемо це на прикладі застосування ІВСАД ЗП на об'єкті «Реконструкція виробничої будівлі в м. Київ по пров. Куренівському, 17А». На ділянці досліджень на глибині 15,0 м встановлено, що геологічний розріз складений товщею сучасних техногенних (насипних) ґрунтів, представлених різноманітними літологічними різновидами (піски, супіски), що залягають на розмитій поверхні четвертинних відкладів.

- Короткий опис геологічного розрізу (зверху до низу):
- сучасні техногенні (насипні) ґрунти (t IV). Потужність техногенних утворень коливається від 1,8 м до 2,2 м;
 - сучасні елювіальні утворення (e IV), складені заторфованими супісками та суглинками. Потужність утворень коливається від 0,3 м до 2,2 м.;
 - верхньонеоплейстоценові алювіально-лімнічні (a, 1 III-IV) відклади у середній частині розрізу представлені супісками з прошарками суглинків потужністю 3,0-4,8 м, що підстеляються пісками середньої щільності та щільними. Викрита потужність досягає 7,5 м.

Гідрогеологічні умови ділянки вишукувань на розвідану глибину до 15,0 м характеризуються наявністю безнапірного водоносного горизонту. Ґрунтові води пов'язані до алювіальних відкладів. Водовмісними породами є супіски з прошарками пісків. Статичний рівень ґрунтових вод зафіксований на глибинах 2,6-4,6 м від поверхні підлоги першого поверху, умовні позначки становлять 95,2-97,1 м.

Також було зафіксовано ґрунтові води типу «верховодка» – накопичення лінз води на суглинистих ґрунтах, що носять тимчасовий характер і невитримане поширення. Рівні ґрунтових вод типу «верховодка» зафіксовані на глибинах 1,6-2,7 м від поверхні підлоги першого поверху, умовні позначки становлять 97,3-98,4 м. Живлення підземних вод відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та витоків з водогінних комунікацій.

Така структура ускладнює фізичний доступ для діагностування палів за допомогою луна методу. Аналіз хвильових процесів під час проведення діагностування через ростверк не давав визначеного результату через неоднорідний характер ґрунтових умов і додаткових відлунь від оточуючих конструкцій.

Тому для проведення обстежень за допомогою комплексного акустичного методу було влаштовано канал доступу – пластикову трубу

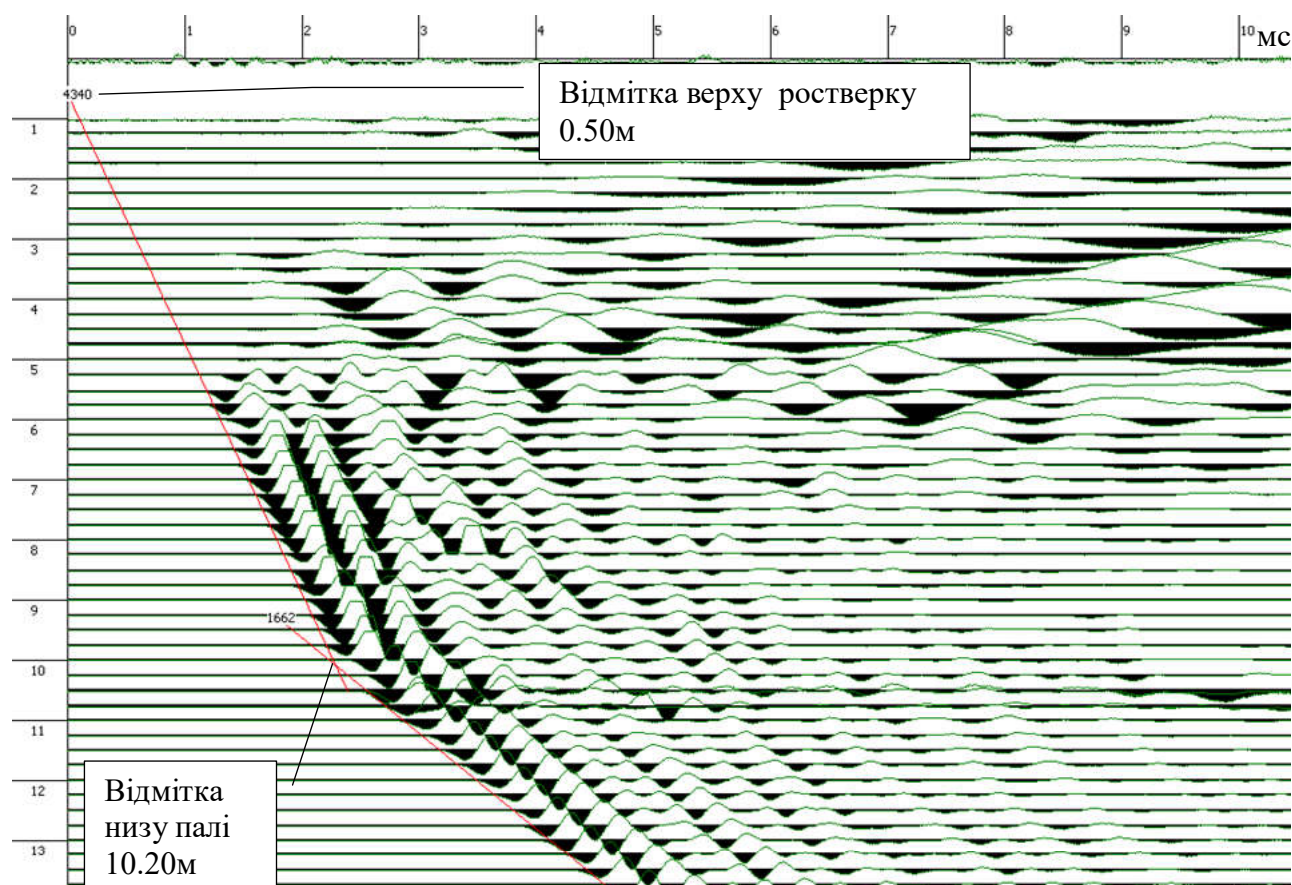
діаметром 40 мм на відстані менше 0.5 м від наявних забивних паль (рис. 4.15). За схемою наведеною на рис. 1.22 було проведено виміри через кожні 0.25 м., результати за яких наведено на рис 4.16. По просторово-часовій діаграмі визначено закони зміни швидкості FAT. Для бетону у шурфі №4 вона склала 4340 м/с а для ґрунту – 1662 м/с, для шурфу №8 – відповідно 4755 м/с та 1776 м/с. Перетин цих прямих на діаграмі відповідає нижньому торцю палі. Великі значення швидкості в бетоні пов'язані з непаралельністю існуючої палі і влаштованого каналу доступу, зі збільшенням глибини канал наближається до конструкції. Визначена довжина паль склала 10.2, та 8 м для шурфів №4 та №8 відповідно. По отриманим даним було скориговані моделі для аналізу паль і в решті шурфів, через економічну доцільність був використаний луна-метод задля визначення характеристик.

Перевага цього методу у точності і однозначності визначення глибини конструкції у порівнянні з луна-методом, незважаючи на складність хвильових процесів, що виникають під час збудження хвиль, також відсутні обмеження на довжину елемента фундаменту.



Рис. 4.15 Процес улаштування каналу доступу (а) та проведення обстежень комплексним акустичним методом(б)

Шурф №4



Шурф №8

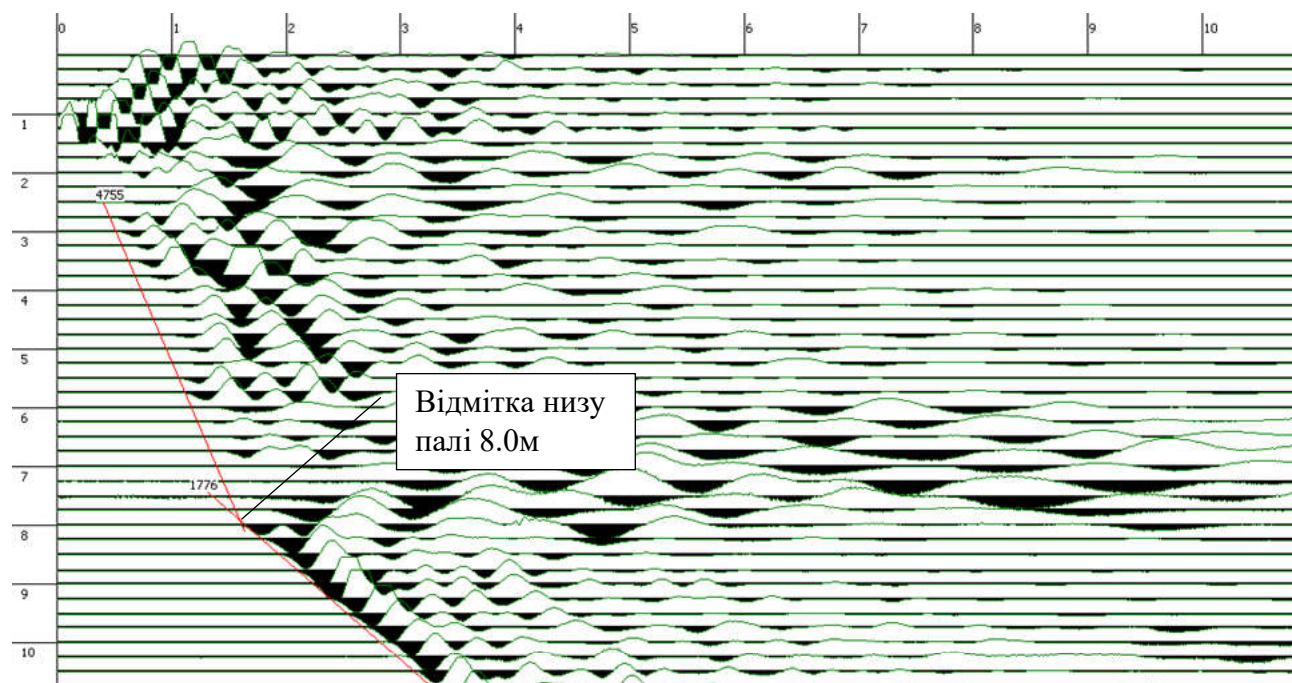


Рис. 4.16 Результати обстежень за використанням ІВСАД з комплексним методом

4.2. Створення банків навчаючих сукупностей з типових дефектів залізобетонних паль

У другому розділі було запропоновано та проаналізовано механічну (рис. 2.1, а і б) та електричну (рис. 2.2, а і б) моделі відкритої та зануреної у ґрунт залізобетонних паль. У відповідності з [62-64], під час ударного впливу на таку систему її відгук має багаторезонансний характер, оскільки залізобетонну палю, занурену у ґрунт, можна розглядати як багато резонансну систему певним чином зв'язаних RLC-контурів.

Як відомо [62, 63], ефективне вирішення задачі діагностики певних видів дефектів технічних об'єктів можливе тільки за умови попереднього формування так званих навчаючих сукупностей, або банку даних. Основою для побудови такого банку служать запропоновані за результатами аналізу моделей досліджуваних об'єктів діагностичні параметри, за якими і формуються навчальні сукупності, що відповідають певним технічним станам цих об'єктів.

У нашому випадку задля створення банку даних для певних видів дефектів у різних палях використано часові і спектральні характеристики вібраційних сигналів, основними з яких є:

β_1 – просторові коефіцієнти загасання;

ψ_1 – основні частоти максимумів спектрограми сигналу

Досить важливою практичною задачею є така: встановити, чи фактична довжина заглибленої в ґрунті палі відповідає розрахунковому значенню. Очевидно, що занадто коротка паля не може нести розрахункове навантаження. Слід зазначити, що і перевищення розрахункової довжини в багатьох випадках також є небажаним.

Використовуючи створену апаратуру, на ряді будівельних майданчиків було проведено вимірювання відгуків на ударний вплив ряду залізобетонних паль, виготовлених по різних технологіях і різної номінальної довжини та діаметра. За цими вимірюваннями було проведено оцінку фактичного стану

паль, відібрано ті з них, які не мають яскраво виражених дефектів, після чого було проведено оцінку фактичної довжини палі.

Вимірювання проводились на наступних об'єктах наведено у табл. 4.3:

Таблиця №4.3

Обстежені об'єкти з різними типами паль

Об'єктах	Технологія виготовлення	Номінальна довжина палі (м)	Перетин палі (мм)	Кількість
м. Київ, вул. Милославська	буро-ін'єкційна	20	620	70
м. Київ, вул. Освіти	бурунабивна	20	420	88
м. Ірпінь вул. Ломоносова,	буро-ін'єкційна	13	420	210
м. Київ, Позняки – 4-й «а»	бурунабивна	12	620	526
м.Бориспіль, вул. Привокзальна	забивна	11	450	346

В кожному випадку проводилася серія вимірювань довжини палі. Результати статистичної обробки вимірювань ввійшли до банку даних. Кожна серія вимірювань оброблялася за допомогою спеціально розробленої програми гістограмного аналізу по системі кривих Персона [63] для того, щоб визначити тип розподілу. Слід зазначити, що класичні способи визначення емпіричного розподілу (такі, як побудова емпіричної щільності або функції розподілу) не використовувалися внаслідок того, що об'єми отриманих вибірок не є достатньо великими, але в банку даних наводиться емпірична гістограма у випадках, коли було отримано достатньо даних для її побудови.

Програма гістограмного аналізу по системі кривих Пірсона дає можливість визначити тип розподілу з системи Пірсона (до якої входить як частинний випадок і гаусів розподіл) при наявності досить невеликої кількості вимірювань. Це дало змогу обмежити кількість вимірювальних експериментів, кожен з яких потребує досить значних затрат часу.



Рис. 4.17 Обстеження різних видів паль луна методом

Проведений аналіз показав, що всі вимірювання довжини палі з достатньою мірою точності можна описати гаусовим законом розподілу (Рис.4.18).

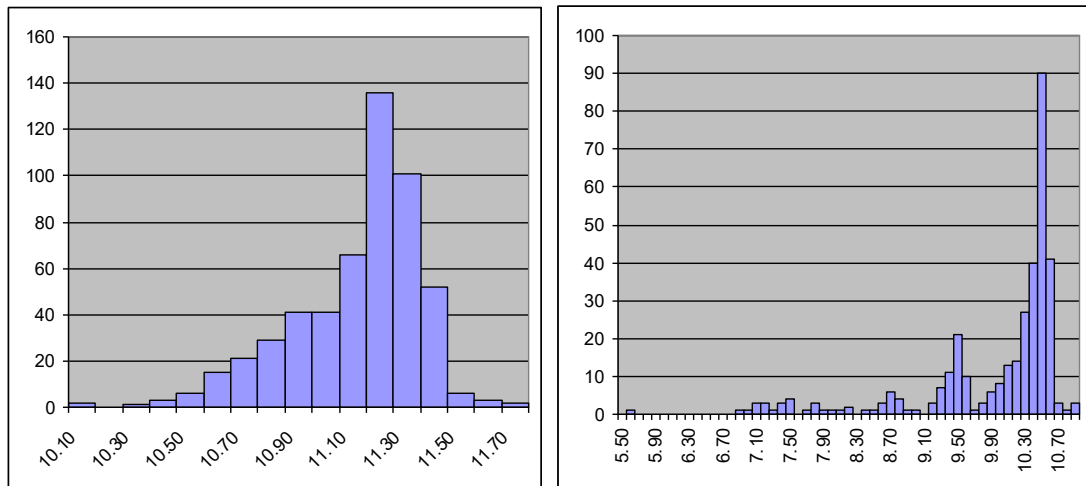


Рис. 4.18 Типові гістограми розподілу довжин (а) одна номінальна довжина
(б) декілька номінальних довжин

Результати, що увійшли до створеного банку даних, можуть в подальшому використовуватися при прийнятті рішення про відповідність фактичної довжини заглибленої палі номінальній (розрахунковій) довжині з використанням методики діагностики будівельних конструкцій.

Найпростішим очевидним рішенням такої задачі може бути встановлення деякого максимального відхилення довжини в обох напрямках, яке вважається допустимим. Але ці межі залежать від багатьох факторів, зокрема й від точності вимірювальної апаратури, що вимагає статистичного підходу.

Як було показано, при формуванні банку даних, вимірювання довжини палі як випадкова величина описується гаусовим законом розподілу. Було також оцінено її дисперсію в кожному конкретному випадку. Тому поставлена вище задача формально зводиться до перевірки статистичної гіпотези про рівність математичного сподівання цієї випадкової величини

деякому значенню, в даному випадку – розрахунковій довжині палі – при умові, що дисперсія відома.

Таким чином, припустимо, що задана вибірка

$$X = \|x_k\|, \quad k = \overline{1, n},$$

що містить n значень гаусової випадкової величини ξ з відомою дисперсією σ_ξ^2 . Є підстави вважати, що її математичне сподівання m_ξ дорівнює деякій заданій величині m_H .

Знайдемо, яким повинен бути об'єм вибірки n для того, щоб перевірити гіпотезу $m_\xi = m_H$ при заданому рівні значимості α , причому ймовірність допустити помилку другого роду при визначенні відхилення від гіпотетичної величини на d повинна бути рівна β .

Вибірковий розподіл середнього значення

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (4.1)$$

такий же, як і величини $\frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}}u + m_\xi$, де u – нормально розподілена величина з нульовим математичним сподіванням і одиничною дисперсією. Цей розподіл є точним, якщо випадкова величина ξ гаусова, і досить хорошим наближенням, якщо розподіл ξ незначно відрізняється від гаусового.

Верхня C_h і нижня C_l межі області прийняття гіпотези в даному випадку мають вигляд

$$C_h = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}}u_{\alpha/2} + m_\xi, \quad C_l = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}}u_{1-\alpha/2} + m_\xi.$$

Нехай тепер істинне значення математичного сподівання $m'_\xi = m_\xi \pm d$. Тоді, якщо вибіркове значення $\bar{x}$ лежить нижче верхньої межі або вище нижньої межі, то помилка другого роду допускається з ймовірністю β . Використовуючи вибіркові розподіли величин $m'_\xi = m_\xi + d$ і $m'_\xi = m_\xi - d$, можна знайти, що

$$C_h = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}} u_{1-\beta} + m_\xi + d, \quad C_l = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}} u_\beta + m_\xi - d.$$

Отже, справедливі рівності

$$\frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}} u_{\alpha/2} + m_\xi = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}} u_{1-\beta} + m_\xi + d, \quad \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}} u_{1-\alpha/2} + m_\xi = \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}} u_\beta + m_\xi - d.$$

Звідси отримуємо

$$u_{\alpha/2} = u_{1-\beta} + \frac{\sqrt{n}}{\sigma_\xi} d = -u_\beta + \frac{\sqrt{n}}{\sigma_\xi} d,$$

і знаходимо шуканий об'єм вибірки

$$n = \left[\frac{\sigma_\xi (u_{\alpha/2} + u_\beta)}{d} \right]^2. \quad (4.2)$$

Таким чином, для того, щоб прийняти рішення про те, чи виміряна довжина палі суттєво відхиляється від розрахункової, необхідно:

1. Задати значення ймовірності помилок першого і другого роду α і β .
2. Задати величину d .
3. Визначити необхідну кількість вимірювань за формулою (4.2).
4. Провести вимірювання і визначити середнє значення результатів за формулою (4.1).

5. Перевірити умову $C_l < \bar{x} \leq C_h$. Якщо умова виконується, то вважати, що виміряна довжина палі не відрізняється від розрахункової. В протилежному випадку визнати, що паля виготовлена неякісно.

З використанням отриманих рішень було проведено ряд дослідів. Отримані результати свідчать, що при використанні банку даних збільшується ефективність використання луна-метода при контролі паль. Збільшення обсягу банку даних та кількості параметрів, що знаходяться в ньому надасть можливість створення системи автоматичного аналізу результатів, що зменшить вплив людського фактору при проведенні обстежень паль з використанням луно-метода.

Найбільш поширені дефекти та конструкційні випадки та реалізації хвильових процесів в них із створеної бази наведено у Додатку №2.

Висновки до розділу 4

1. Проведено ряд вимірювальних експериментів, на основі яких створено банк даних, який містить статистичну інформацію щодо вимірювань довжини занурених в ґрунт залізобетонних паль.

2. Сформований банк даних містить необхідні відомості для прийняття рішення про те, чи довжина зануреної палі відповідає розрахунковому значенню, на основі вимірювань за допомогою ІВСАД ЗП.

3. Розроблено методику та технологію практичного використання банку даних для діагностики будівельних конструкцій, яка базується на статистичних методах, що дають можливість приймати рішення з наперед заданими ймовірностями помилок першого та другого роду.

Посилання: [51, 52, 62-64, 125]

див. список використаних джерел стор. 175, 176, 180

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язано актуально науково-прикладну задачу розробки моделей, методів та комп'ютеризованої системи, що їх реалізує задля діагностування технічного стану залізобетонних паль. Завдяки сумісному використанню методів віброакустичної діагностики і акустичного каротажу вдалося суттєво розширено можливості з визначення технічного стану залізобетонних паль за одночасним підвищенням точності та достовірності результатів діагностування. В процесі вирішення цієї задачі отримано наступні результати:

1. Вперше розроблено інформаційне забезпечення задля сумісного використання методів віброакустичної діагностики та акустичного каротажу залізобетонних паль на основі обґрунтованих математичних моделей діагностичних сигналів, алгоритмічно-програмного забезпечення статистичного оцінювання ознак і реалізації їх за допомогою ІВС діагностики.

2. Розвинені математичні моделі віброакустичних діагностичних сигналів, що утворюються під час ударного збудження цих сигналів у тілі досліджуваної залізобетонної палі і які враховують особливості ґрунтів, де занурюється досліджуваний об'єкт. Теоретично обґрунтовано діагностичні ознаки, що дають змогу встановлювати технічний стан досліджуваної палі.

3. Розроблено структурну схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок ІВС діагностики залізобетонних паль, у якій, на відміну від відомих систем, передбачено сумісне використання методів ударної віброакустичної діагностики та акустичного каротажу. Такий підхід дозволив розширює можливості створеної ІВС з визначення технічного стану досліджуваних паль, а також забезпечує підвищення точності і достовірності результатів вібродіагностики паль.

4. Вперше запропоновано та експериментально перевірено оригінальний інтерфейс дослідного зразку ІВС вібродіагностики і акустичного каротажу залізобетонних паль, який дає змогу наочно, з використанням попередньо сформованих навчаючих сукупностей (банком даних) і

кількісними оцінками, визначити технічний стан виготовленої залізобетонної палі.

5. Вперше, на основі проведених експериментів сформований банк, даних, що містить необхідні відомості для прийняття рішення про те, чи довжина зануреної палі відповідає розрахунковому значенню, на основі вимірювань за допомогою створеного зразку ІВС.

6. Розроблено методику та на її основі створено технологію практичного використання банку даних для діагностики будівельних конструкцій, яка базується на статистичних методах, що дають можливість приймати рішення з наперед заданими ймовірностями помилок першого та другого роду.

7. Перспективи застосування розробленої системи діагностики знаходяться в області підвищення експлуатаційної надійності та подовження ресурсу будівель і промислових споруд. Результати досліджень можуть бути використані під час розроблення систем моніторингу і діагностики промислових підприємств. Серед об'єктів потенційного впровадження – підприємства по розробці та експлуатації вимірювальної та діагностичної апаратури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Свайные фундаменты. СНиП 2.02.03–85. М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1986. 48с.
2. Земляные сооружения. Реновация и фундаменты. СНиП 3.02.01-87. М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1989. 128 с
3. Руководство по проектированию свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1980. 151 с.
4. Руководство по производству и приемке работ при устройстве оснований и фундаментов. М.: Стройиздат, 1976. 240 с.
5. Виконання спеціальних геотехнічних робіт. Витісняючі палі. Європейський стандарт DIN 12699: 2000. Часткова заміна для DIN 4026: 1975-08; заміна для DIN 4026-500: 1996-04. 2000. 51 с.
6. Виконання спеціальних геотехнічних робіт. Бурові палі. Європейський стандарт DIN EN 1536: 1999. Часткова заміна для DIN 4014: 1990–03.1997. 50 с.
7. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. К.: Мінрегіонбуд України. 2011. 161 с.
8. Заміна №1 СНиП 2.02.03-85. «Свайные фундаменты" та зміна №1 СНиП 3.02.01-87. " Земляные сооружения. Основания й фундаменти". Держбуд України. К.: Укрархбудінформ, 2001. 5 с.
9. Ветров Ю.А., Барашиков А.Я., Петренко Г.М., Сидоренко М.В. Проблемы надежности в строительстве// Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1984. – Вып.6.– С. 5-14.
10. Chen, Y-J, and Kulhawy, F.H. “Evaluation of Drained Axial Capacity for Drilled Shafts,” Geotechnical Special Publication No. 116, Deep Foundations 2002, M.W. O’Neill and F.C. Townsend, Editors, ASCE, Reston, VA, 2002. pp. 1200-1214
11. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. Piling Engineering. London: Taylor & Francis, 2009. 407 p.
12. L. C. Reese and S. J. Wright. Drilled Shaft Manual: Vol. I: Construction Procedures and Design for Axial Loading. Report IP 77- 21. FHWA, U. S. Department of Transportation, 1977
13. Reese, L.C., O’Neill, M.W. “Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods,” Publication No. FHWA-HI88-042, Federal Highway Administration, McClean, VA, 1988. 564 p.

14. Воробьёв В. А. Радиационная дефектоскопия бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1972. 150 с.
15. Джонс Р., Фэкзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов. М.: Стройиздат, 1974. С. 200–239.
16. Rausche F. and Goble G. Determination of Pile Damage by Top a Measurements. Behavior of Deep Foundations, ASTM, STP 670, American Society for Testing and Materials. 1976. Pp. 500–506.
17. Paquet J. Etude Vibratoire des Pieux en B'eton: R'eponse Harmonique (Vibration Study of Concrete Piles: Harmonic Response), Annales de l'Institut Technique du Bat'iment, Paris, France. 21st year 1968. 245, 789–803 (in French) (English translation by Yee X. in Master of English Report, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA, 1991. Pp. 33–77.).
18. Paquet J. (1969). Contr'ole des Pieux par Carrotage Sonique (Testing of Piles by Sonic Coring)', Annales de l'Institut Technique du Bat'iment. Paris, France, 22nd 1969 (in French).
19. Davis A. G., Dumm C. S., "From theory to field experience with the non-destructive vibration testing," Proceeding of Institution of Civil Engineers, Part 2, no. 57, pp. 571–593, 1974
20. Иносов В.Л., Городжа А.Д., Цилик Л.Я. Дефектоскопия железобетонных конструкций методом волны удара. Бетон и железобетон. 1978. № 2. С. 23–25.
21. Drilled Shaft Inspector's Manual. International Conference: Association of Drilled Shaft Contractors, International Association of Foundation Drilling and Deep Foundations Institute, 1989.
22. Иносов В.Л., Городжа А.Д. Оперативный контроль забивных железобетонных свай. В кн.: Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Рига: Рижский политехн.ин-т, 1980. С. 28–34.
23. Reiding F.J., Middendorp P. and Brederode P.J. A digital approach to dynamic pile testing. 2nd Int. Conf. on *the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Swedish Pile Commission, Stockholm, Sweden. 1984. Pp 85–93.
24. Rausche F., Likins G. and Hussein M. Pile integrity by low and high strain impacts. Third Int. Conf. On *the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Vancouver, Canada. 1988. Pp 48–56.

25. Davis A.G. and Hertlein B.H. Development of nondestructive small strain methods for testing deep foundations. A review: *Transportation Research Record* 1331, 1991. Pp. 15–20.

26. Douglas R.A. and Holt J.D. Determining lengths of installed timber pilings by dispersive wave propagation methods. University of North Carolina. Center for Transportation Engineering Studies, 1994. Pp. 110–115.

27. Hussein M., Likins G. and Goble G.. Determination of Pile Lengths Under Existing Structures. 17th *Annual Conference*, New Orleans, Louisiana. Deep Foundation Institute. 1992 Pp 68-75.

28. Davis A.G. and Kennedy J. Impulse Response Testing to Evaluate the Degree of Alkali–Aggregate Reaction in Concrete Drilled Shaft Foundations under Electricity Transmission Towers. Proceedings of the Conference on *Nondestructive Evaluation of Utilities and Pipelines*, San Antonio, TX, USA, 1 April, 1998. USA, Bellingham, The International Society for Optical Engineering (SPIE) 3398. Paper 21. Pp. 178–185.

29. Rausche F., Bixler M. and Hussein M. Nondestructive testing to determine unknown pile lengths under existing bridges; 1st Int. Conf. on *Scour of Foundations* (ICSF-1), Texas Transportation Institute, College Station, TX, 2012 p. 918-928

30. Rausche F. and Goble G. Determination of Pile Damage by Top Measurements. Behavior of Deep Foundations. American Society for Testing and Materials (ASTM, STP 670). 2015. Pp. 500-506.

31. Controlling Parameters and Deep Foundation Specifications (Keynote Lecture). Proceedings the 6th International Conference on the *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, 11–13 September, 2015. San Paulo, Brazil. Pp. 281–304.

32. Evaluation of Utilities and Pipelines. The International Society for Optical Engineering (SPIE), Bellingham, WA, USA. San Antonio, TX, USA, 1 April, 1998. 3p. 178–185.

33. Likins G. E., Rausche F., Webster K. and Klesney, A. Defect Analysis for CSL Testing. New Peaks in Geotechnics Geo-Denver, CO. 2017. 10p.

34. Geotechnical design. Part 1. General rules. EN 1997-1:2004 Eurocode 7. 2004. 104 p.

35. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. Piling Engineering. London: Taylor & Francis, 2009. – 408 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b22272>

36. Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии: учебное пособие. М.: АСВ, 2010. 240 с.

37. Brown D.A., Steven D.D., Thompson W.R., Carlos A.L. Geotechnical engineering circular NO.8. Design and Construction of Continuous Flight Auger (CFA) Piles. Maryland: GeoSyntec Consultants, 2007. 293 p.
38. Tyson P. Design of reinforcement in piles. Highways Agency St Christopher House Southwark Street, London SE1 OTE, 1995. 63 p.
39. Design of pile foundation. Engineer manual. Washington: US Army Corps of Engineer, 1991. 114 p.
40. Wiemann J., Lesny K., Richwien W. Evaluation of pile diameter effects on soil-pile stiffness [electronic resource] URL: <http://www.gigawind.de>
41. Pile Integrity Tector; Pile Dynamics Analyzer [Електронний ресурс] Deep Foundation Testing Products. URL: <https://www.pile.com/products/>:
(дата звернення-11.08.2020)
42. Sonic Integrity Testing (SIT) [Електронний ресурс] Profound. URL: <https://www.profound.nl> (дата звернення-11.08.2020)
43. SIMBAT dynamic pile test system [Електронний ресурс] James Fisher Testing. URL: <https://www.jftesting-services.com> (дата звернення-11.08.2020)
44. PET Pulse Echo Tester; CHUM Cross Hole Ultrasonic Monitor [Електронний ресурс] PileTest Co (дата звернення-11.08.2020)
URL: <https://www.piletest.com/>
45. Hebei Gaotiejian Testing Instrumet. [Електронний ресурс] URL: <https://chinacouplers.en.alibaba.com> (дата звернення-11.08.2020)
46. Измеритель длины свай. [Електронний ресурс] URL: <https://geodevice.ru/main/seismic/station/ids2/> (дата звернення-11.08.2020)
47. Аппаратура акустического каротажа. Классификация. Основные параметры и общие технические требования. СТ СЭВ 4286–84. 1984 21 с.
48. Ермолов И.М., Агашин М.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.
49. «Дослідження умов для створення системи віброударної діагностики пальових фундаментів з використанням комплексу неруйнівних методів контролю» за договором №7ДБ-2017 від 17 липня 2017 р. між Міністерством освіти і науки України та КНУБА (№ держреєстрації 0109U006072).
50. «Дослідження режимів роботи, розроблення вдосконалених математичних моделей електромеханічних систем технологічного обладнання та транспортних засобів будівництва», Цільова комплексна програми наукових

досліджень НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (РЕСУРС)" номер держреєстрації 0115U004934.

51. Городжа А., Городжа К., Корнієнко М., Мислович М., Новотарський Ю., Погребний О., Трощинський Б. Неруйнівні обстеження бетонних елементів фундаментів глибокого закладення методом акустичного каротажу. Стандарт підприємства (СП Б В.2.7-:2018). К.: КНУБА, 2018. 19с.

52. Standard test method for integrity testing of concrete deep foundations by ultrasonic cross hole testing. ASTM D6760-02. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. 2002. 7p.

53. Дворжак А.Д. Испытания свай динамичным методом. Протоколы 2ой Азиатской региональной конференций по механике грунтов и фундаментостроению, Япония. 1963. Т. 1.

54. Chernauskas L.R. and Paikowsky S.G. Deep Foundation Integrity Testing Techniques and Case Histories, Civil Engineering Practice. *Journal of the BSCE section/ASCE, Spring/Summer 1999*. Pp. 39-56.

55. Finno R., Prommer,P. and Gassman S. Non-Destructive Evaluation of Existing Deep Foundations. Proceedings of US/Taiwan Geotechnical Engineering Collaboration Workshop, Taipei, January, 1995. Pp. 125-135.

56.Holeyman A.E. Technology of Pile Dynamic Testing. Proceedings of the 4th International Conference on the *Application of Stress Wave Theory to Piles*, Balkema, Rotterdam, September, 1992. Pp. 195-215.

57.Кольский Г. Волны напряжений в твёрдых тела. М.: Иностранная литература, 1955. 192 с.

58.Дейвис Р.М. Волни напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1961. 103 с.

59. Гольдсмит В. Удар, теория и физические свойства соударяемых тел. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. 480 с.

60. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 320 с.

61. Барашиков А.Я., Городжа А.Д. Интегральная оценка качества железобетонных конструкций с помощью эхо-метода. Сб. научн трудов Надежность и долговечность машин и сооружений. 1988. Вип.14. С. 37–46.

62. Городжа Л.В., Трощинський Б.О. Механическая и электрическая волновые модели железобетонных свай при эхо-дефектоскопии Технічна електродинаміка. 2000. Ч. 6. С. 90–93.

63. Трощинський Б.О. Застосування електричних моделей хвильових процесів у залізобетонних палях для створення банку даних їх діагностичних ознак. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск ПСЕ-2008, Ч. 2. 4с
64. Герцик С.М., Городжа А.Д., Мислович М.В., Подольцев О.Д., Сисак Р.М., Трощинський Б.О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їх використання для діагностики електротехнічного обладнання. Технічна електродинаміка. 2018. № 2. С. 86–94. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.086>
65. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: из-во Техничко-теоретической литературы, 1957. 69 с.
66. Бьюлей Л.В. Волновые процессы в линиях передачи и трансформаторах. М.-Л.: ОНТИ, 1938. с.23-46.
67. Ленк А. Электромеханические системы. М.: Энергоатомиздат, 1982. 472 с.
68. Кениг Г., Блекуэлл В. Теория электромеханических систем. М.-Л.: Энергия, 1965. 423 с.
69. Тетельбаум И.Н., Тетельбаум Я.И. Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 384 с.
70. Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования. К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2015. 456 с.
71. Вибрация энергетических машин: Справочное пособие / Под ред. Н.В.Григорьева. Л.: Машиностроение, 1974. 464 с.
72. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. К.: Наук. думка, 1992. 195 с.
73. Марченко Б.Г., Мыслович М.В., Целина В.Н. Ударная диагностика шихтованных магнитопроводов. Препринт №745. К.: Ин-т электродинамики АН Украины. 1993. 41 с.
74. Мыслович М.В., Сысак Р.М. Методы и системы статистической диагностики электротехнического оборудования гидроэлектростанций. Гідроенергетика України. 2005. № 1. С. 12–20.
75. Тетельбаум И.Н., Тетельбаум Я.И. Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 384 с.
76. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. 2ое изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.

77. Yu C., Liao S. Theoretical basis and numerical simulation of impedance log test FPR evaluating the integrity of columns and piles. *Can. Geotech. Journal*. 2006. Vol. 43. Pp. 1238–1248.
78. Klingmuller O. Computational Tools for Dynamic Pile Testing. In Book: *Application of Stress-Wave Theory on Piles*. Stockholm: CRC Press. 1985. Pp. 342–349.
79. Ленк А. Электромеханические системы. М.: Энергоатомиздат, 1982. 472 с.
80. Кениг Г., Блекуэлл В. Теория электромеханических систем. М.-Л.: Энергия, 1965. 423 с.
81. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Институт электродинаміки НАН України, 2015. 305 с.
82. Lyster J., Richart. Dynamic response of floating to vertical loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1966. 92. Pp. 65–91.
83. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. 411 с.
84. Бабак В.П., Марченко Б.Г., Фриз М.Є. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика. К.: Техніка, 2004. 288 с.
85. Бабак В.П., Бабак С.В., Еременко В.С. и др. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник. К: София–А, 2014. 832 с.
86. Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования. К.: Институт электродинаміки НАН України, 2015. 456 с.
87. Боровикова О.Ю., Красильников А.И., Мыслович М.В. Модели пуассоновской спектральной функции Колмогорова в задачах диагностики электротехнического оборудования. *Техническая электродинамика*. 2002. № 4. С. 73–78. с.
88. Гижко Ю.І., Мислович М.В. Елементи теорії та питання практичного застосування систем вібродіагностування рухомих вузлів електричних машин. *Технічна електродинаміка*. № 2. 2015. С. 45–56.
89. Маляренко А.П. Обоснование линейной модели сигнала для акустико-эмиссионной диагностической системы. *Техн. электродинамика*. 1992. № 5. С. 11–17.
90. Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике. К: Наук. Думка, 1973. 192 с.

91. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. К.: Наук. думка, 1992. 195 с.
92. Мыслович М.В., Приймак Н.В., Щербак Л.Н. Периодически коррелированные случайные процессы в задачах обработки акустической информации. К.: Общество “Знание” УССР, 1980. 26 с.
93. Мыслович М.В., Сисак Р.М. Інформаційно-вимірювальні системи статистичної діагностики електроенергетичного обладнання на основі використання системи кривих Пірсона. Техн. електродинаміка. 2002. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 1. С. 109–112.
94. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2013. 804 с.
95. Antony J., Guillet F., Badooni M., Bonvardot M. Blind Separation of Convolved Cyclostationary Process. *Signal Processing*. 2005. Vol. 85. Pp. 51–66.
96. Antoni J., Randall R.B. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part I – evaluation of adaptive algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004. Vol. 18. Pp. 89–101.
97. Antoni J., Randall R.B. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part II – A novel frequency-domain algorithm evaluation of adaptive algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004. Vol. 18. Pp. 103–109
98. Tagnait J.K. Stochastic system identification with noisy input using cumulant statistics. *IEEE Trans. Automatic Control*. 1992. Vol. 37. Pp. 476–485.
99. STM32F103x8, STM32F103xB. Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces : Datasheet – production data [Електронний ресурс]. STMicroelectronics, August 2015. 117 p. URL: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00161566.pdf> (дата звернення: 05.11.15).
100. Zero Drift, Digitally Programmable Instrumentation Amplifier AD8231: Data Sheet [Електронний ресурс]. Analog Devices, Inc., 2014. 24 p. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8231.pdf> (дата звернення: 05.11.15).
101. LM1117-N/LM1117I 800mA Low-Dropout Linear Regulator [Електронний ресурс]. Texas Instruments, Inc., March 2013. 33 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117-n.pdf> (дата звернення: 05.11.15).

102. ARM Infocenter [Электронный ресурс]. ARM Limited, 2007–2015.
URL: <http://infocenter.arm.com> (дата звернения: 05.11.15).
103. Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования. С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2004. 576 с.
104. STM32 Virtual COM Port Driver [Электронный ресурс]. STMicroelectronics, 2015. URL: <http://www.st.com/web/en/catalog/tools/PF257938> (дата звернения: 05.11.15).
105. Евстифеев А.В. Микроконтролеры AVR семейства Tiny и Mega фирмы Atmel. 2-е изд., стер. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. 560 с.
106. Голубцов М.С., Кириченко А.В. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному. Из. 2-е, испр. и доп. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 304 с.
107. Николайчук О.И. x51-совместимые микроконтроллеры фирмы Silicon Laboratories (CYGNAL). М.: ИД СКИМЕН, 2004. 628 с.
108. Бондарев В.Н., Трестер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства: Учеб. пособие для вузов. Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1999. 398 с.
109. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
110. Рудаков П.И., Сафонов И.В. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.X/ Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 416 с.
111. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры: расчет и реализация. М.: Мир. 1992. 592 с.
112. Шрюфер Э. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов. Учебник / Под ред. проф. В.П. Бабака. К.: Либідь, 1995. 320 с.
113. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы: М.: Мир, 1982. 323с.
114. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
115. Проблемы метрологического обеспечения в области неразрушающего контроля. *Измерительная техника*. 1998. № 11. С. 71–72.
116. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работы метрологических служб. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Изд-во стандартов, 1990. Кн. 1. – 528 с., кн. 2. – 529 с.

117. Метрологическое обеспечение информационно-измерительных систем: Сборник руководящих документов. М.: Из-во стандартов, 1984. 263 с.
118. Кузнецов А.В. Анализ метрологических характеристик микропроцессорных информационно-измерительных систем. 1996.– К. ІЕД. 170с.
119. Щербинский В.Г. Основные факторы, влияющие на погрешность УЗ дефектометрии (обзор). *Дефектоскопия*. 1991. № 5. С. 3–32.
120. Муравская Н.П. Проблемы метрологического обеспечения в области неразрушающего контроля. *Измерительная техника*. 1998. № 11. С. 71–72.
121. Заико А.И. Точности аналоговых линейных измерительных каналов измерительных информационных систем. М.: Из-во стандартов, 1987. 136 с.
122. Удовиченко Е.Т. и др. Метрологическое обеспечение измерительных информационных систем: теория, методология, организация. М.: Из-во стандартов, 1991. 190 с.
123. Блинова Л.П. Акустические измерения. М.: Из-во стандартов, 1971. 108 с.
124. Солопченко Г.Н., Челпанов И.Б. Методы определения и нормирования динамических характеристик средств измерений. *Измерительная техника*. 1979. № 4. С. 13–16.
125. Городжа А.Д., Трощинський Б.О. Методичні рекомендації по використанню неруйнівного методу акустичного каротажу при обстеженні бурових паль. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 95. № 1. С. 128-137

Додаток А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ*Список публікацій здобувача:*

1. Городжа Л.В., Трощинський Б.О. Механическая і електрическая волновые модели железобетонных свай при эхо-дефектоскопии. *Технічна електродинаміка*. 2000. Ч. 6. С. 90-93 (Особистий внесок – запропоновано механічні та електричні аналоги моделей хвильових процесів для луна-дефектоскопії у відкритої і зануреної в ґрунт залізобетонної палі з використанням моделей Кельвіна-Фойгта і "сітки" Бьлей).
2. Козел В.П., Новотарський Ю.И., Петухов Д.Ю., Трощинський Б.А., Козел П.Ф. Технологический контроль процесса изготовления буроналивных свай. *Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика*. 2004. №2. С.18-19(Особистий внесок – розроблено і впроваджено комп'ютерну систему контролю технологічного процесу виготовлення за СФА-технологією залізобетонних паль).
3. Городжа А.Д., Трощинський Б.О. Сучасний стан контролю якості залізобетонних паль і бурових стовпів. *Основи і фундаменти*. 2006. Вип. 30. С.34–38(Особистий внесок – виконано аналіз сучасного стану діагностики залізобетонних паль на будівельних об'єктах України).
4. Трощинський Б.О. Застосування електричних моделей хвильових процесів у залізобетонних палях для створення банку даних їх діагностичних ознак. *Технічна електродинаміка*. 2008. Ч. 2. С. 23-26.
5. Мислович М.В., Городжа А.Д., Городжа К.Д., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М., Новотарський Ю.Й., Трощинський Б.О. Створення методів та системи ударної діагностики для визначення технічного стану та подовження ресурсу будівельних та мостових конструкцій. *Збірник наукових статей з цільової програми «Ресурс»*. Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН

Продовж. дод. А

України, 2012. С. 456-463(Особистий внесок – створення методології і системи для визначення технічного стану мостових конструкцій у процесі реконструкції).

6. Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М., Городжа А.Д., Новотарський Ю.Й., Трощинський Б.О. Створення універсальної системи підвищення надійності та подовження ресурсу при будівництві та реконструкції мостових та будівельних конструкцій з використанням акустичного каротажу та віброударної діагностики. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2016. № 3. С. 11-16(Особистий внесок – розроблено та експериментально випробувано дослідний зразок ІВС).

7. Герцик С.М., Городжа А.Д., Мислович М.В., Подольцев О.Д., Сисак Р.М., Трощинський Б.О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їх використання для діагностики електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С.86-94(Особистий внесок – запропоновано комп'ютерне моделювання хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів, визначено значення основних параметрів використаних в моделюванні). DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2018.02.086>

8. Городжа К.А., Подольцев О.Д., Трощинський Б.О. Електромагнітні процеси в імпульсному електродинамічному випромінювачу для збудження пружних коливань в бетонних конструкціях. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 23-28 (Особистий внесок – досліджено багаторезонансні моделі вібраційних діагностичних сигналів, що виникають в результаті ударного збудження). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023>

9. Городжа А.Д., Трощинський Б.О. Методичні рекомендації по використанню неруйнівного методу акустичного каротажу при обстеженні бурових паль. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 95. № 1. С. 128-137(Особистий внесок – розробка методичних рекомендацій з використання методу акустичного каротажу задля створення стандарту підприємства).

Продовж. дод. А

10. Бондарчук О.В., Мислович М.В., Соболевська Т.Г., Твердяков В.В., Трощинський Б.О. Формування навчаючих сукупностей для інформаційно-вимірювальних систем діагностики електротехнічного обладнання з урахуванням результатів його віброударних випробувань. *Праці ІЕД НАН України*. 2020. Вип. 55. С. 114-125(Особистий внесок – запропоновано урахування результатів віброударних випробувань під час формування навчаючих сукупностей в ІВС діагностики бетонних і залізобетонних ФГЗ). DOI:<https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.114>

11. Городжа А.Д., Городжа К.А., Трощинский Б.О., Погребный О.А. Расчет параметров импульсного электродинамического излучателя упругих волн. *Праці ІЕД НАН України*. 2018. Вип. 51. С. 125-131(Особистий внесок – розробка методичних рекомендацій з використання методу акустичного каротажу задля створення стандарту підприємства). DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.125>

12. Городжа А., Городжа К., Корнієнко М., Мислович М., Новотарський Ю., Погребний А., Трощинський Б. Неруйнівні обстеження бетонних елементів фундаментів глибокого закладення методом акустичного каротажу. *Стандарт Підприємства* (СП Б В.2.7-:2018), Київ; КНУБА, 2018. с (Особистий внесок – розробка методичних рекомендацій з використання методу акустичного каротажу задля створення стандарту підприємства).

13. Городжа А.Д., Городжа К.А., Новотарський Ю.І., Погребний О.В., Трощинський Б.О. Сучасний стан неруйнівних обстежень буронабівних паль та стовпів на основі досвіду НДЛ „ДАКіС”. *«Проблеми геотехніки-2017»* праці Міжнародної науково-технічної конференції, 20-23 листопада 2017 р., Київ, Україна. С. 97-99.

14. Городжа А.Д., Трощинський Б.О., Мислович М.В., Сисак Р.М. Діагностування залізобетонних паль методами віброударної діагностики і акустичного каротажу. *«Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і*

Продовж. дод. А

технічної діагностики» матеріали XXII Міжнародної конференції, 10-14 вересня 2018 р., Одеса, Україна, ІЗ НАН України, УТ НКТД. С. 24.

15. Городжа А.Д., Трощинський Б.О., Новотарський Ю. Й. Практика обстеження фундаментів існуючих будівель і споруд. *«Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики»* матеріали XXII міжнародної конференція, 10-14 вересня 2018 р., Одеса, Україна, ІЗ НАН України, УТ НКТД.С.23.

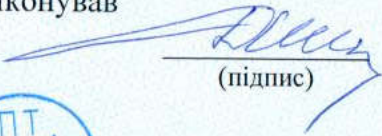
Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи було представлено на:

- Міжнародної конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики», 10-14 вересня 2018 р., Одеса, Україна, ІЗ НАН України, УТ НКТД (форма участі – дві доповіді, публікація тез).
- Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми геотехніки-2017», 20-23 листопада 2017 р. Київ,, Україна, КНУБА (форма участі – 2 доповіді, публікація тез).
- Міжнародному форумі "INNOVATION MARKET", 22-24 листопада 2016 р., Київ, Україна, (форма участі – доповідь);
- щорічних науково-технічних конференціях КНУБА за планом наукових робіт кафедри електротехніки та електроприводу (2016 – 2020 рр).

Додаток Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

	МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ, СЕРТИФІКАЦІЇ ТА ЗАХИСТУ ПРАВ СПОЖИВАЧІВ» (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»)
вул. Метрологічна, 4, м. Київ, 03143 Свідоцтво про уповноваження № П-9-2019 від 14 лютого 2019 р.	
СВІДОЦТВО про повірку законодавчо регульованого засобу вимірювальної техніки	
№ <u>22-03/22515</u>	Чинне до « <u>15</u> » <u>березня</u> 20 <u>22</u> р.
Назва та умовне позначення <u>Інформаційно-вимірювальна система</u>	
<u>неруйнівного контролю залізобетонних та кам'яних споруд</u>	
<u>КСДК-4.2</u>	Зав. № <u>1</u>
Виробник <u>НДК КНУБА</u>	
За результатами повірки встановлено, що засіб вимірювальної техніки (далі – ЗВТ) відповідає вимогам <u>експлуатаційної документації</u> (назва нормативно-правового акта, фірми-виробника.	
що містить вимоги до метрологічних характеристик і значення метрологічних	
характеристик (клас точності, похибки, діапазон вимірювання), особливості застосування ЗВТ)	
Додаток: на <u> </u> стор. у <u> </u> прим.	
Персонал, який виконував роботи з повірки	 (підпис)
Місце відбитка повірочного тавра	<u>Д.І. Суботін</u> (ініціали, прізвище)
	« <u>15</u> » <u>березня</u> 20 <u>20</u> р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова Представництва

Емре Караахметоглу

« 28 » _____ 2021 р.



АКТ ВИКОРИСТАННЯ

Даним актом підтверджується, що розробки та результати досліджень, отримані у дисертаційній роботі мл.н.с. НДЛ «ДАКіС» КНУБА Трощинського Богдана Олександровича «КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАЛЬ НА ОСНОВІ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ», представленої на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, використовуються в обстеженнях імпульсним луно-методом з ударним збудженням пружних хвиль та методом акустичного каротажу буронабивних паль і стовпів при будівництві мостових переходів на об'єктах, які зводяться Представництвом «Онур Тааххут Ташимаджилик Іншаат Тіджарет ве Санаї Анонім Ширкеті» в Полтавській та Дніпропетровській областях.

Обстеження паль виконувалося у відповідності до технічного завдання. Дослідний зразок системи діагностики власного виготовлення НДЛ «ДАКіС» КНУБА, який застосовувався в обстеженнях, має метрологічну атестацію і відповідає рівню найкращих закордонних аналогів.

Комплексне діагностування бурових паль і стовпів імпульсним луно-методом з ударним збудженням пружних хвиль та методом акустичного каротажу в значній мірі підвищує точність і впевненість результатів виконаних обстежень.

Члени комісії:

Керівник проєкту

Супхі Озгюр Оздоган

Інженер по мостах

Якуб Емірасанов

ЗАТВЕРДЖУЮ:

 Директор ТОВ «Підприємство Маст-Буд» (Директор будівельних робіт)
С.К. Розбей

«28» січня 2021 р.

АКТ ВИКОРИСТАННЯ

Даним актом підтверджується, що розробки та результати досліджень, отримані у дисертаційній роботі м.н.сп. НДІ «ДАКіС» КНУБА Трощинського Богдана Олександровича **«КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАЛЬ НА ОСНОВІ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ»**, яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, були використані нашою фірмою в обстеженнях імпульсним луно-методом з ударним збудженням пружних хвиль та методом акустичного каротажу буронабівних палів при будівництві мостового пішохідно-велосипедного переходу між парками «Хрещатий» та «Володимирська гірка» в Печерському та Шевченківському районах м. Києва».

Використання розроблених методів, алгоритмів та програмного забезпечення дозволило розширити можливості створеного НДІ «ДАКіС» КНУБА зразку інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) акустичної діагностики залізобетонних палів у порівнянні з відомими діагностичними системами та приладами, що надало можливість підвищити точність та достовірність для виявлення дефектів залізобетонних палів.

Головний інженер ТОВ «Підприємство «Маст-Буд»  Заволік М.В.

Нач. Виробнично-технічного відділу

 Горбань В.Г.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ТОВ НВО «Київбудіндустрія»

 О.Т. Меркулов

« 26 » _____ січня _____ 2021 р.

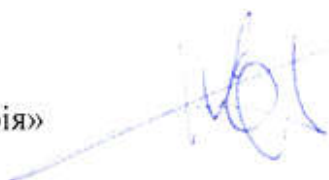
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даним актом підтверджується, що розробки та результати досліджень, отримані у дисертаційній роботі мл.н.сп. НДЛ «ДАКіС» КНУБА Трошинського Богдана Олександровича **«КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАЛЬ НА ОСНОВІ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ»**, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, впроваджується в проектах на будівництво нових і капітальний ремонт мостових переходів, які виконує ТОВ НВО «Київбудіндустрія».

Зокрема, інформаційне забезпечення, яке покладено в основу побудованого і метрологічно атестованого дослідного зразку інформаційно-виміральної системи (ІВС) акустичної діагностики залізобетонних паль.

Розроблений зразок ІВС діагностики повністю підтвердив свою працездатність та корисність для вирішення задач діагностики таких паль, а також його високу розрізняльну здатність виявляти типові види дефектів у обстежуваних палях.

Виконавчий директор
ТОВ НВО «Київбудіндустрія»



І.Є. Тюленєв