

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

ТРОЩИНСЬКИЙ БОГДАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.314:621.391

**КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ПАЛЬ НА ОСНОВІ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ**

05.13.05 — комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Київському національному університеті будівництва і архітектури МОН України на кафедрі електротехніки та електроприводу

Науковий керівник: – кандидат технічних наук, професор
Городжа Анатолій Дмитрович,
Київський національний університет
будівництва і архітектури МОН України, Київ,
професор кафедри електротехніки та електроприводу

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Зварич Валерій Миколайович,
Інституту електродинаміки НАН України,
провідний науковий співробітник відділу теоретичної
електротехніки та діагностики електротехнічного
обладнання ;

– кандидат технічних наук, старший дослідник
Запорожець Артур Олександрович,
Інституту технічної теплофізики НАН України,
старший науковий співробітник відділу моніторингу та
оптимізації теплофізичних процесів

Захист відбудеться “ 21 ” 04 2021 р. о 11 годині на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.02 в Інституті електродинаміки
НАН України за адресою: 03057, Київ, пр. Перемоги, 56, тел. 366-26-45

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН
України: 03057, Київ, пр. Перемоги, 56.

Автореферат розісланий “ 18 ” 03 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С.О. Зайцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 СФА-технологією). З початку масового використання бурових палей (60-і роки минулого століття) і досі існує проблема забезпечення надійності фундаментів, через те що процес устрою палей приховано від спостереження, і в стовбурах палей можливо утворення неприпустимих дефектів, які знижують несучу здатність палей і можуть привести споруду до аварійного стану. Технології улаштування палей постійно удосконалюються, однак уникнути появи дефектів в стовбурах палей 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 палей, 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 палей досягає межі пропорційності, надається оцінка несучої здатності дослідних палей, а техніка низької – виключно для діагностування стовбурів палей. 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-вимірвальних приладів (систем) задля реалізації неруйнівних методів контролю, які пропонують спеціалізовані фірми Франції, США, Нідерландів, Ізраїлю, Китаю, Росії. У науково-дослідній лабораторії (НДЛ) «ДАКіС» КНУБА також розроблені і використовуються дослідні зразки комп'ютерних систем діагностики бетонних палей, 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 палей внесли іноземні та вітчизняні вчені: Raquet 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 палей неруйнівними методами під час будівництва палейових 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 вибіркоче (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 вибіркоче, 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 і грантами.

Наукові дослідження по темі дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі електротехніки та електроприводу факультету автоматизації і інформаційних технологій та в НДЛ «ДАКіС» 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 Міністерством освіти і науки 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 Міністерством освіти і науки 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 № P7.13-2010 (1232-10) від 15.06.2010 р., № P7.13-2011/1235-11 від 01.03.2011 р. та № P7.13-2012/1238-12 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 буроін'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 веляят, 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-виміральної системи (ІВС) акустичної діагностики палей з урахуванням інформаційних можливостей сигналів, що утворюються під час обстеження палей методами віброударної діагностики і акустичного каротажу;
- розробити структурно-функціональну схему, побудувати та експериментально перевірити дослідний зразок ІВС акустичної діагностики залізобетонних палей з відповідним інтерфейсом для відображення результатів їхнього діагностування;
- з використанням створеного зразку ІВС діагностики провести експериментальні дослідження з діагностування технічного стану залізобетонних палей 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 палей ФГЗ на основі результатів віброакустичної діагностики.

Предметом дослідження є системи та методи діагностування залізобетонних палей ФГЗ.

Методи дослідження. 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 полягає в наступному:

- вперше розроблено інформаційне забезпечення для сумісного використання методів віброакустичної діагностики та акустичного каротажу залізобетонних палей 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 полягає у наступному:

- розроблено структурну схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок ІВС діагностики залізобетонних палей, у якому, на відміну від відомих систем, передбачено сумісне використання методів ударної віброакустичної діагностики та акустичного каротажу. Такий підхід розширив можливості створеної ІВС з визначення технічного стану палей, 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. Представлені в дисертаційній роботі результати отримано автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1] – запропоновано механічні та електричні аналоги моделей хвильових процесів для луна-дефектоскопії у відкритій і зануреній в ґрунт залізобетонної палі з використанням моделей Кельвіна-Фойгта і "сітки" Бьлей; [2] – розроблено і впроваджено комп'ютерну систему контролю технологічного процесу виготовлення за СА-технологією залізобетонних паль; [3,13] – виконано аналіз сучасного стану діагностики залізобетонних паль на будівельних об'єктах України; [5,6] – створення методології і системи для визначення технічного стану мостових конструкцій у процесі реконструкції; [7, 8] – запропоновано комп'ютерне моделювання хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів; [9, 12] – розробка методичних рекомендацій з використання методу акустичного каротажу задля створення СТАНДАРТУ ПІДПРИЄМСТВА КНУБА; [10] – запропоновано урахування результатів віброударних випробувань під час формування навчаючих сукупностей в ІВС діагностики бетонних і залізобетонних ФГЗ; [14,15] – результати сумісного діагностування залізобетонних паль методами віброударної діагностики і акустичного каротажу, отримані в процесі будівництва та обстеження фундаментів існуючих будівель і споруд.

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

1. 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).
2. Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми геотехніки-2017», 20-23 листопада 2017 р. Київ,, Україна, КНУБА (форма участі – 2 доповіді, публікація тез).
3. 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).

Публікації. Основні положення і результати роботи опубліковано у 15 друкованих працях, з них 5 статей – у наукових фахових виданнях України, а також у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 3 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, загальних висновків, списку використаних джерел зі 126 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 187 сторінки, що містить: 160 сторінок основного тексту, 88 рисунків, 9 таблиць та 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання наукових досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані щодо зв'язку роботи з науковими програмами, апробацію результатів роботи, впровадження та публікації.

У **першому 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, що мають найбільше поширення. Також розглянуто поширені системи неруйнівного контролю ФГЗ.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність створення системи для визначення технічного стану паль на основі:

- імпульсного луна-методу з ударним збудженням пружних хвиль;
- методу акустичного каротажу;

Другий розділ присвячено обґрунтуванню та дослідженню математичних моделей діагностичних сигналів детермінованої і стохастичної природи, що виникають у відкритій і зануреній в ґрунт залізобетонної палі за ударного збудження. В використаних моделях враховано геометричні параметри об'єкта контролю, умови збудження зондуючого сигналу, поглинання енергії пружної хвилі матеріалом палі з урахуванням багатопарового оточуючого ґрунту з різними акустичними властивостями.

Швидкість пружної хвилі в стрижневій системі, одним із прикладом якої є залізобетонна паля, залежить від частоти коливань або довжини хвилі й діаметра стрижня. Внаслідок дисперсії швидкості в стрижні одночасно утворюються фазова швидкість поширення фази хвилі C_ϕ і групова швидкість імпульсу C_0 , зв'язані між собою залежністю:

$$C_0 = C_\phi - \lambda \frac{dC_\phi}{d\lambda}. \quad (1)$$

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

$$0,1 < d/\lambda \leq 0,5, \quad (2)$$

де 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, що мають дзвін-подібну форму тривалістю τ (500-1500 мкс), показує, що довжину хвилі можна умовно приймати такою, що дорівнює подвоєній зоні стиску, тобто $\lambda' = 2C_0\tau$. За такої тривалості імпульсу мікронеоднорідний за структурою бетон можна вважати однорідним матеріалом, тому що геометричні розміри великої кількості неоднорідних заповнювачів, що рівномірно розподілені по тілу, значно менше довжини хвилі. У цьому випадку конструкція характеризується акустичним або хвильовим опором:

$$R_a = \frac{\rho C_0}{S}, \quad (3)$$

де S – перетин хвилеводу, $R_a = \rho C_0$ – акустична жорсткість. У цих умовах заваду будь-якої форми на шляху розповсюдження хвилі в конструкції з постійним хвильовим опором можна розглядати як плоско-паралельний шар, якщо його ширина (ділянки), на якому відбувається зміна хвильового опору, менше зони стиску. Тоді має сенс коефіцієнти відбиття V і переломлення W визначати за відомих формул Френеля у разі нормального падіння плоскої хвилі на плоску заваду:

$$V = \frac{R'_a - R_a}{R'_a + R_a}; \quad W = \frac{2R'_a}{R'_a + R_a}. \quad (4)$$

Тут R_a і R'_a – хвильові опори на бездефектному й дефектному шарі.

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 по добутку знаку напрямку хвилі на знак коефіцієнта відбиття або переломлення. Фаза сигналу на приймачі пружних хвиль, що реєструє деформацію крайнього шару, залежить від напрямку руху часток, а амплітуда – від швидкості їхнього переміщення.

Внаслідок прийнятих допущень модель палі можна представити як систему з розподіленими параметрами, 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 (Рис. 1). На цьому рисунку наведено механічні хвильові моделі (а) та електричні хвильові моделі (б) зануреної у ґрунт бетонної палі. Якщо паля перебуває у ґрунті, то у разі 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 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'_1 і R'_1 .

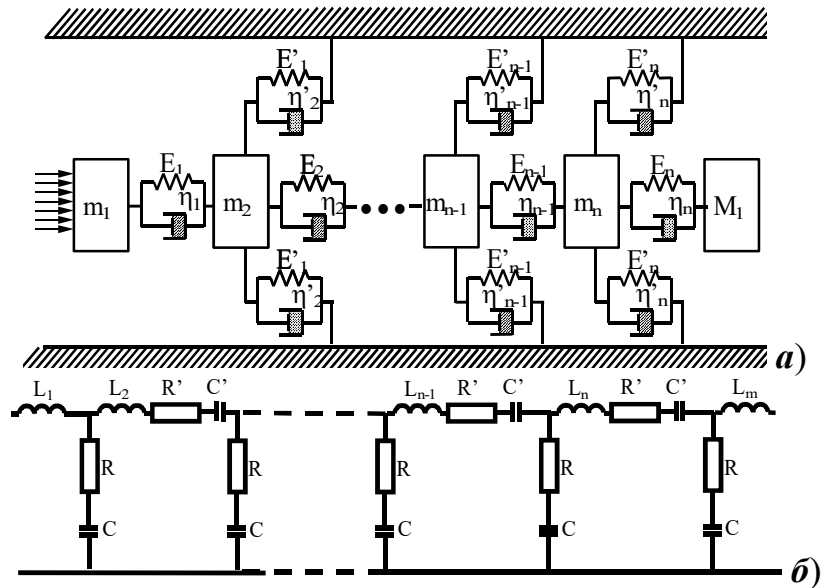


Рис. 1

Аналітично представити послідовність багаторазових відбиттів у системі з розподіленими параметрами досить складно. Тому у роботі використовується просторова-часова діаграма або "сітка Бьюлей". По осі абсцис просторово-часової діаграми (Рис. 2) відкладається довжина виробу й позначено умовно границі розділів шарів з опорами ($R_1 \dots R_n$), а по осі ординат у масштабі – час ($t_1 \dots, t_m$) 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 новоутворені хвилі, досягнувши на своєму шляху чергової границі розділу з різними значеннями хвильових опорів шарів, знову породжують по дві складові хвилі – відбиту й переломлену.

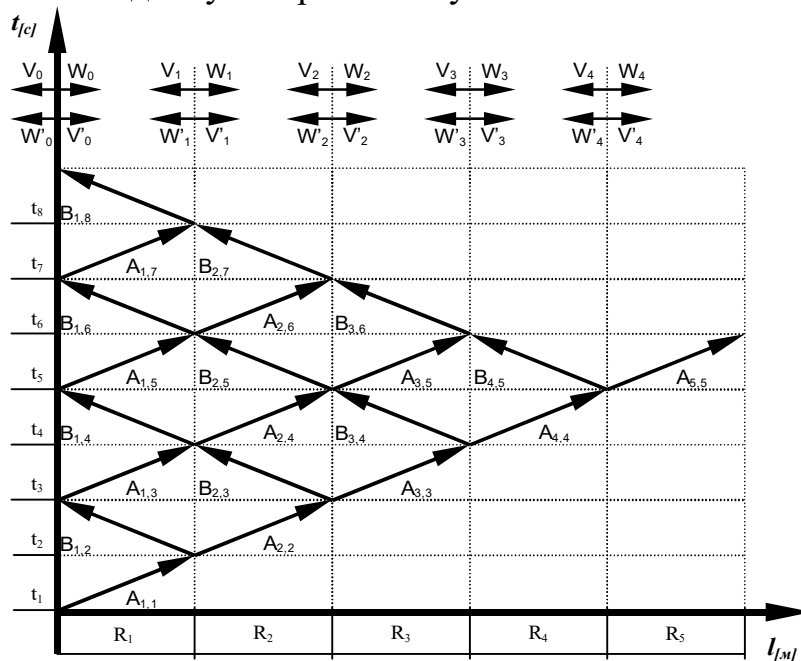


Рис. 2

Миттєве значення хвилі, що повернулася назад до нульової границі розділу R_I в n -й момент часу, визначається з рівняння:

$$A'_{1,m} = \left[A'_{2(m-1)} \cdot W' \pm A'_{1(m-1)} \cdot V' \right] \cdot \beta \quad (5)$$

Якщо за відомих параметрах An , V , W і β розв'язати систему рівнянь щодо миттєвих значень відбитих хвиль, що прийшли назад у перший шар в різні моменти часу, а потім підсумувати хвилі, 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.

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. Виходячи з цього, 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 зроблених 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. Під час ударного впливу на таку систему її відгук має багаторезонансний характер:

$$\varphi_j(\tau) = \frac{\omega_j^2}{\Psi_j} \cdot e^{-\beta_j \tau} \cdot \sin(\psi_j \tau) \cdot U(\tau), \quad j = \overline{1, n} \quad (6)$$

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

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^n a_j \xi_j(t), \quad t \in (-\infty, \infty) \quad (7)$$

де n – деяке додатне ціле число, обумовлене конструктивними, технологічними й експлуатаційні характеристиками палі; a_j – вагові коефіцієнти, що враховують згасання вібраційної хвилі по відповідному каналу.

У розглянутому випадку кожен компоненту-відгук, яка пов'язана з певним каналом поширення і входить як доданок у (7), можна представити в усталеному режимі у вигляді лінійного випадкового процесу (ЛВП).

Кореляційну функцію процесу (7) можна представити як:

$$R(s) = \sum e^{-\beta_j |s|} \left[A_{jn} \cos \psi_j s + \sin \psi_j |s| \right] \quad \text{для всіх } s \in (-\infty, \infty). \quad (8)$$

Процес (7) є стаціонарним і гільбертовим, тому для нього існує спектральна щільність, що визначається як косинус-перетворення Фур'є урахуванням (8) у вигляді:

$$S(\omega) = \sum \frac{A_{jn} \beta_j (\omega_j^2 + \omega^2) + \beta_{jn} \psi_j (\omega_j^2 + \omega^2)}{(\omega_j^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \psi_j^2} \quad (9)$$

Кореляційна функція (8) і спектральна щільність (9) процесу визначаються параметрами ψ_j і β_j , $j = 1, n$, які можна використовувати задля дослідження характеру вібрацій елемента, що діагностується.

Ефективне вирішення задачі діагностики певних видів дефектів 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. Функція (8) і спектральна щільність (9) процесу визначаються параметрами: β_j – просторові коефіцієнти загасання; ψ_j – основні частоти максимумів спектрограми сигналу, які можна використовувати задля створення банку даних певних видів дефектів у різних палях. Також використовуються часові і спектральні характеристики вібраційних сигналів.

З метою визначення *граничних значень амплітуди і тривалості ударного імпульсу, за яких в різних геологічних умовах починається пластична деформація ґрунту*, для комп'ютерної реалізації системи з розподіленими параметрами, що відображає розповсюдження імпульсних хвиль в об'ємі палі та прилежному ґрунті, у роботі використано пакет програм Matlab/Simulink та метод електромеханічної аналогії, який дає змогу застосувати апарат теорії електричних кіл для моделювання таких механічних хвилевих процесів (рис. 3).

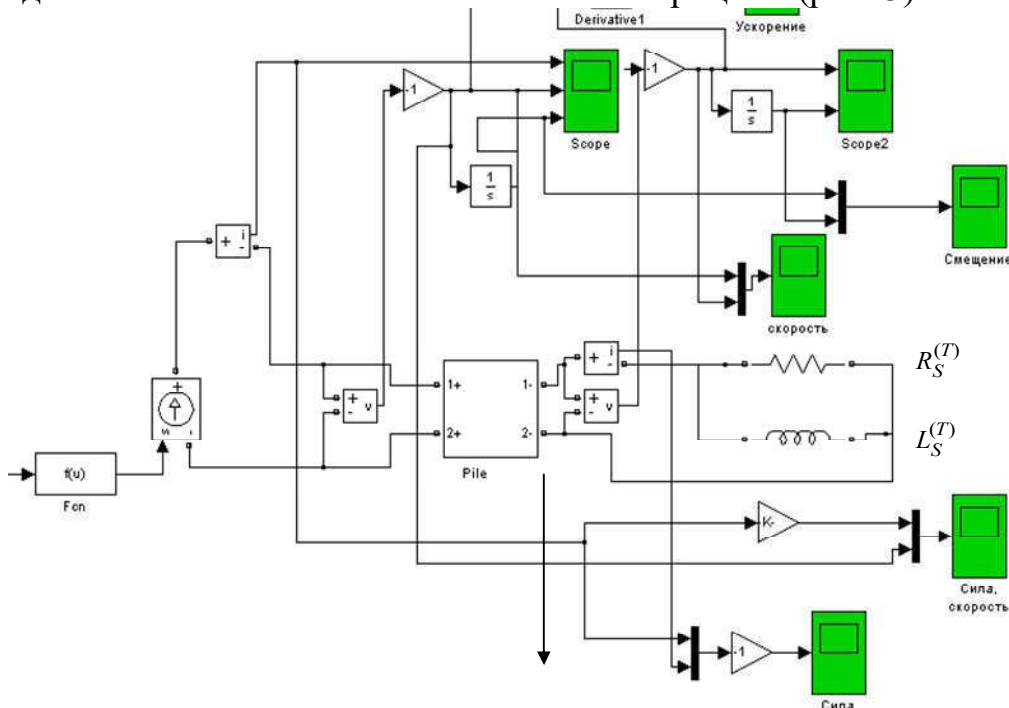


Рис. 3

За результатами комп'ютерного моделювання хвилових процесів в занурений у ґрунт палі отримано оптимальні тривалість та амплітуда ударного імпульсу. Задля подальшого розвитку луна-методу (на перспективу можливості використання методу для визначення несучої здатності паль) встановлено граничні значення амплітуди імпульсної механічної сили, за яких починається пластична деформація ґрунту.

У третьому розділі обґрунтовано загальну структуру ІВСАД ЗП, призначену для роботи у двох режимах вимірювання і обробки сигналів віброударний діагностики та сигналів акустичного каротажу, на основі якої запропоновано схему модулю збору інформації (МЗІ) (Рис. 4), зовнішній вигляд якого і основних компонентів наведено на рис. 5

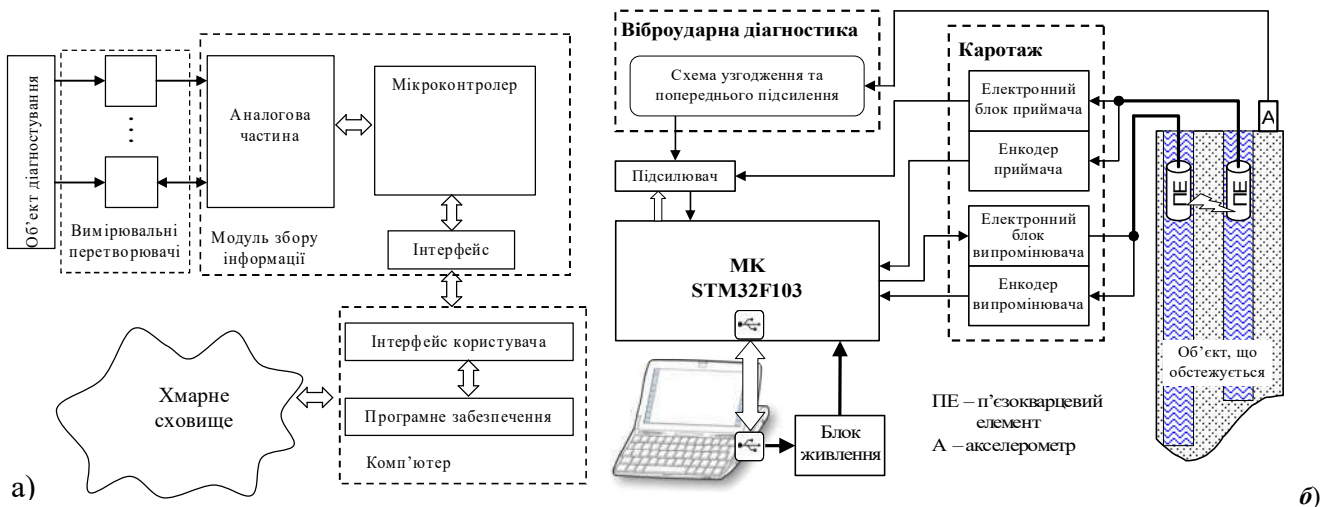


Рис. 4

Розглянуто основні особливості створення апаратного та програмного забезпечення обробки експериментальних даних для двох режимів роботи дослідного зразку та описано алгоритми їхнього функціонування.



Рис. 5

На Рис.6.а наведено розроблений інтерфейс для віброударної діагностики. Оператору відображається усереднена та поточні діаграми хвильових процесів, а також надається доступ до налаштування застосованих цифрових фільтрів та інших параметрів цифрової обробки. На рис.6.б наведено інтерфейс у режимі каротажу, де у верхній лівій частині відображається поточна реалізація хвильового процесу, а в центральній частині по глибині наводиться каскадна діаграма та визначені значення першого вступу і відносної енергії, що надає змогу оперативно контролювати процес обстеження.

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.

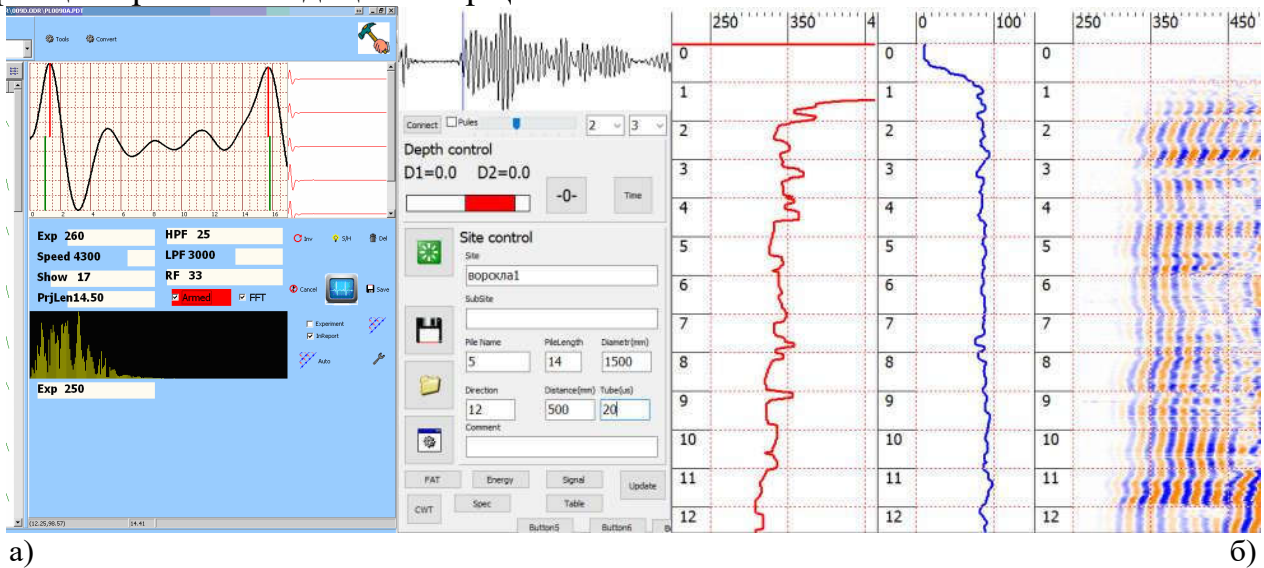


Рис. 6

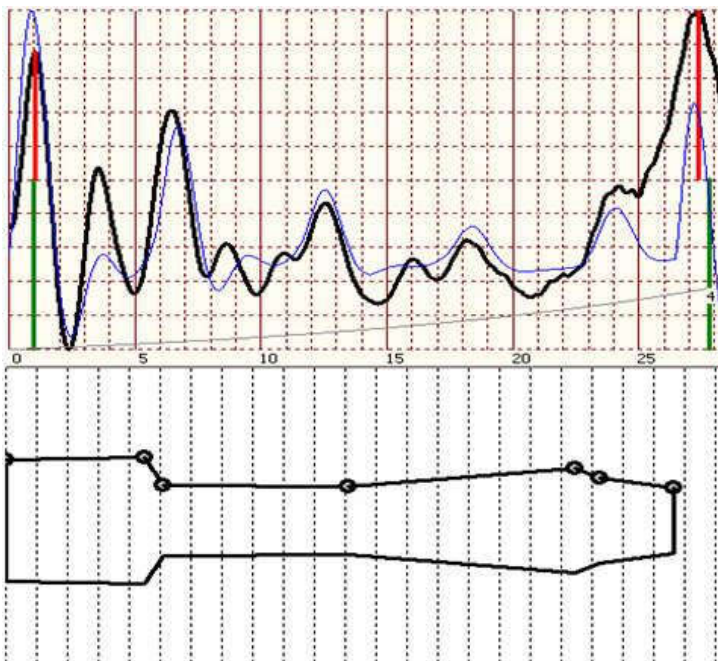


Рис. 7

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень розробленого дослідного зразку системи під час обстеження залізобетонних робочих паль, влаштованих в різних геологічних умовах, а також дослідних паль, виконаних спеціально для досліджень, в які при виготовленні було закладено дефекти, а також досвід по виявленню дефектів у палях. На рис. 7. наведено приклад палі з виявленим дефектом на глибині 4.5, яка була згодом вилучена з ґрунту.

В процесі обстежень проведено ряд вимірювальних експериментів за допомогою сумісного використання ультразвукових методів наскрізного прозвучування та луна-методу. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів. На рис. 8 показано акустичні профілі, по трьом каналам доступу, багатоканального (вгорі), одноканального (внизу) каротажу, та результати обстеження палі луна-методом.

Багатоканальний каротаж в цьому випадку виявив дефектну ділянку (від 7.0 до 8.0 м), але не надав інформацію щодо наявності поширення (від 18.5 до 20 м). Використання одноканального каротажу дало можливість уточнення характеристик дефектної ділянки навколо каналу №1 та часткову інформацію щодо наявності аномалії в нижній частині палі, але не ідентифікувало характер аномальної ділянки. Луна-метод підтвердив наявність дефектної ділянки та надав додаткову інформації щодо поширення. Таким чином, сумісне використання методів в значній мірі підвищує точність і достовірність результатів обстежень.

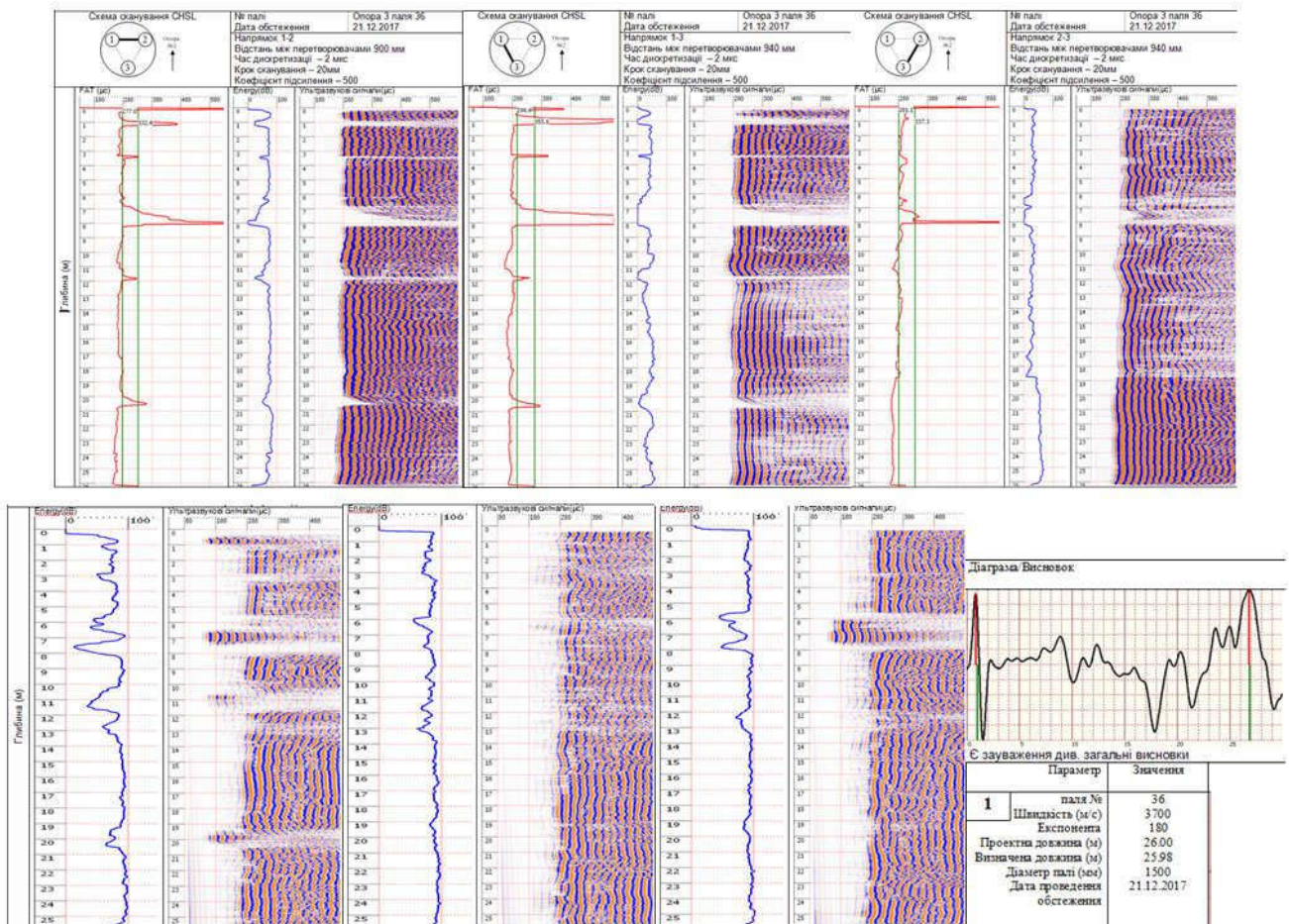


Рис. 8

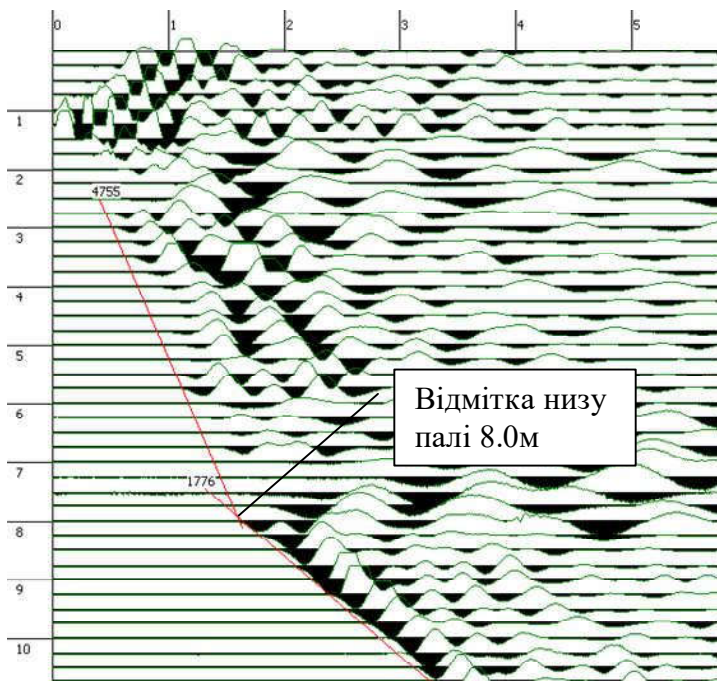


Рис. 9

даних, який містить статистичну інформацію щодо вимірювань довжини занурених в ґрунт палей, а також діагностичні ознаки для визначення фактичного технічного стану обстежених палей. Обстеження проводилися для різних видів палей у різних геологічних умовах (таблиця 1).

Також під час обстеження фундаментів існуючих споруд в складних для обстежень умовах випробувано ІВСАД з використанням комплексного методу, який довів переваги цього підходу у точності і однозначності визначення глибини конструкції у порівнянні з луна-методом, незважаючи на складність хвильових процесів, що виникають під час збудження хвиль, також відсутності обмежень на довжину елемента фундаменту. Приклад результату проведених такого обстеження наведено на рис. 9.

На основі аналізу отриманих результатів сформовано банк

Таблиця 1

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	буронабивна	20	420	88
м. Ірпінь вул. Ломоносова,	буро-ін'єкційна	13	420	210
м. Київ, Позняки – 4-й мікрорайон	буронабивна	12	620	526
м. Київ, мостовий перехід між парками «Хрещатий» та «Володимирська гірка»	буронабивна	14–36	1500	33
Капітальний ремонт автомобільної дороги М-03 Київ-Харків-Довжанський	буронабивна	10–40	1200 – 1500	>200
м. Бориспіль, вул. Привокзальна	забивна	11	450	346

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

Отримані результати свідчать, що при використанні банку даних збільшується ефективність луна-метода під час контролю палей. 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 луна-метода.

Розроблено методика та 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.

ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу з розробки моделей, методів та комп'ютеризованої системи, що їх реалізує для діагностування технічного стану залізобетонних паль. Завдяки сумісному використанню методів віброакустичної діагностики і акустичного каротажу суттєво розширено можливості з визначення технічного стану залізобетонних паль за одночасного підвищення 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. Подальшого розвитку отримали математичні моделі віброакустичних діагностичних сигналів, що утворюються за ударного збудження у тілі досліджуваної залізобетонної палі і які враховують особливості ґрунтів, де занурюється досліджуваний об'єкт. За результатами досліджень 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. Завдяки такому підходу розширено можливості створеної ІВС з визначення технічного стану досліджуваних паль, а також забезпечено підвищення точності і достовірності результатів вібродіагностики.

4. 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.

5. Вперше в результаті проведених експериментів сформовано 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 ІВС.

6. 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.

7. Перспективи застосування розробленої системи діагностики – це 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, які займаються розробкою та експлуатацією вимірювальної та діагностичної апаратури.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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.

2. Козел В.П., Новотарский Ю.И., Петухов Д.Ю., Трощинский Б.А., Козел П.Ф. Технологический контроль процесса изготовления буройнъекционных свай. *Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика*. 2004. №2. С.18-19.

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.

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.

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.

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.

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. 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.

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.

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.

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.

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 технічної діагностики» матеріали ХХІІ 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 ХХІІ міжнародної конференція, 10-14 вересня 2018 р., Одеса, Україна, ІЗ НАН України, УТ НКТД.С.23.

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», Інститут електродинаміки НАН України. Київ, 2021.

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 фундаментів глибокого закладення (ФГЗ).

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 ІВС діагностики. Подальшого розвитку отримали математичні моделі віброакустичних діагностичних сигналів, що утворюються за ударного збудження у тілі досліджуваної залізобетонної палі і які враховують особливості ґрунтів, де занурюється досліджуваний об'єкт. За результатами досліджень теоретично обґрунтовано діагностичні ознаки, що дають змогу встановлювати технічний стан досліджуваної палі.

Розроблено структурну схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок ІВС діагностики залізобетонних паль, у якій на відміну від

відомих систем передбачено сумісне використання методів віброударної діагностики та акустичного каротажу. Завдяки такому підходу значно розширено можливості методів та підвищено точність і вірогідність результатів обстеження.

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 залізобетонної палі.

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.

Перспективи застосування розробленої системи діагностики – це підвищення експлуатаційної надійності ФГЗ.

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

ABSTRACT

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

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.13.05 "Computer systems and components", Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine. Kyiv, 2021.

The dissertation solves a topical scientific and applied problem of developing models, methods and creating a prototype of a universal computerized system with the combined use of vibration impact diagnostics and acoustic logging, which implements them to diagnose the technical condition of concrete piles.

For the first time the information support for joint use of methods of vibro-impact 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 IMS-diagnostics is developed. For further development, mathematical models of vibro-acoustic diagnostic signals generated by impact excitation in the body of the investigated concrete pile and which take into

account the characteristics of the soil where the object is immersed. According to the results of the study, the diagnostic features that allow to establish the technical condition of the studied pile are theoretically substantiated.

The structural scheme is developed, the experimental sample of IMS of diagnostics of reinforced concrete piles is made and experimentally checked, in which unlike known systems the joint use of methods of vibro-impact diagnostics and acoustic logging is provided. With this approach, the possibilities of methods are significantly expanded and the accuracy and reliability of survey results are increased.

For the first time, an original interface to the constructed prototype was proposed and experimentally tested, which allows to visually determine the technical condition of the manufactured reinforced concrete pile using pre-formed training sets (data bank) and quantitative assessments.

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, based on 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. Prospects for the application of the developed diagnostic system are to increase the operational reliability of deep foundations.

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

Підписано до друку 16.03.2021 р. формат 60x84/16

Папір офсетний. умовно – друк. аркушів 0,89,

Обл.-вид.аркуш 0,73, тираж 100. замов. 9.

Відділ оперативної поліграфії ІЕД НАН України

03057, Київ-57, проспект Перемоги, 56