

СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ МОСТОВИХ ТА БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ АКУСТИЧНОГО КАРОТАЖУ ТА ВІБРОУДАРНОЇ ДІАГНОСТИКИ

М. В. МИСЛОВИЧ¹, Л. Б. ОСТАПЧУК¹, Р. М. СИСАК¹, А. Д. ГОРОДЖА²,
Ю. О. НОВОТАРСЬКИЙ², Б. О. ТРОЩИНСЬКИЙ²

¹Ін-т електродинаміки НАН України. 03680, Київ-57, просп. Перемоги, 56. E-mail:sysak_r@jahoo.com

²Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури. 03680, Київ-36, Повітрофлотський просп., 37. E-mail: bohgant@gmail.com

Розроблена універсальна комп'ютерна система, призначена для дефектоскопії мостових та будівельних конструкцій з використанням методів акустичного каротажу та віброударної діагностики. Основною метою дослідження проекту було підвищення надійності та подовження ресурсу при будівництві та реконструкції мостових та будівельних конструкцій шляхом розроблення та впровадження відповідних технічних засобів. Застосування розробленої системи дозволить визначати ступінь надійності несучих залізобетонних конструкцій, у тому числі при відновленні об'єктів, частково зруйнованих внаслідок стихійних лих, техногенних та інших катастроф. Бібліогр. 3, рис. 7.

Ключові слова: будівельні та мостові конструкції, віброударна діагностика, метод акустичного каротажу

У сучасному будівництві до 75 % будівель і споруд зводяться на паливових фундаментах (буронабивні палі і стовпи, буроін'єкційні по СФА-технології тощо). З початку використання бетонних палей досі існує проблема забезпечення надійності фундаментів, оскільки процес улаштування палей приховано від спостереження і в палях можливе утворення дефектів, які можуть привести споруду до аварійного стану. Технології улаштування палей постійно удосконалюються, однак повністю уникнути утворення дефектів у стовбурах палей досі не вдається.

Науково-дослідною лабораторією діагностики агрегатів, конструкцій і споруд (НДЛ ДАКіС) науково-дослідного комплексу Київського національного університету будівництва та архітектури (КНУБА) були проведені масштабні дослідження з метою систематизації характерних дефектів у палях різного виконання та встановлення причин їх утворення [1]. При цьому фірмою «Фундамент» (м. Київ) сумісно з НДЛ ДАКіС на різних об'єктах м. Києва було витягнуто понад 2 тис. забивних палей (довжиною 6, 8 і 10 м), котрі були занурені 10...15 років тому. Приблизно 80 % з них мали один чи декілька дефектів. В результаті досліджень було встановлено, що основними причинами утворення дефектів у палях є порушення технології виконання робіт, а також вплив ґрунтових умов. Однак, дефекти в стовбурах палей можуть утворюватись також і при повному дотриманні технології їх улаштування. Отримані

результати свідчать про необхідність проведення дефектоскопії виготовлених палей з використанням спеціальних технічних засобів.

В ході досліджень була розроблена система віброударної діагностики будівельних та мостових конструкцій, в основу роботи якої покладені математичні ймовірнісні моделі вібрацій та статистичні методи їхньої обробки [2]. Завдяки цьому було досягнуто підвищення достовірності результатів дефектоскопії занурених у ґрунт залізобетонних палей малої та середньої довжини. Однак технічні обмеження, притаманні віброударному методу, не дозволяють застосовувати цю систему для дефектоскопії довгих палей.

Для забезпечення високої ефективності та достовірності дефектоскопії особливо відповідальних несучих конструкцій було розроблено універсальну комп'ютерну систему, в якій одночасно реалізовані два методи неруйнівного контролю залізобетонних конструкцій: віброударний та метод акустичного каротажу.

Методи дефектоскопії залізобетонних конструкцій. На даний час відомо декілька методів для неруйнівного обстеження та діагностики (дефектоскопії) занурених у ґрунт конструкцій з обмеженим доступом. Серед них найбільшого поширення набули два методи – луно-метод та метод акустичного каротажу. Незважаючи на суттєві відмінності в принципах, що покладені в основу цих двох методів, у ході виконання проекту було знайдено технічні рішення, які дозволили

реалізувати обидва ці методи у єдиній універсальній системі, призначеній для визначення фактичного технічного стану палових фундаментів, а також створити дослідний зразок такої системи.

Луно-метод був запропонований у 1960-х роках Жаном Паке (Франція) [3]. Основний принцип методу полягає в тому, що з вільного торця палі за допомогою ударного пристрою (спеціального молотка) збуджується пружна поздовжня хвиля стиснення – так званий зондувальний імпульс (рис. 1). При поширенні ця хвиля відбивається від тих ділянок, де змінюється хвильовий опір матеріалу (відбувається зміна геометричних параметрів конструкції або зміна фізико-механічних властивостей матеріалу), у тому числі й від кінця палі. Приймач пружних хвиль (датчик), що встановлений поруч з точкою збудження, сприймає зондувальний імпульс, а також імпульси, відбиті від неоднорідностей та кінця стовбура палі. Миттєві значення його сигналу пропорційні швидкості або прискоренню переміщення торця палі (в залежності від типу встановленого датчика). Вони фіксуються у вигляді функції часу за допомогою пристрою, що перетворює їх у числовий код та передає у комп'ютер для подальшої обробки. Отримана таким чином реалізація хвильового процесу в конструкції містить інформацію про внутрішній стан стовбура палі – міцність матеріалу, наявність дефектів, їх параметри і координати по довжині палі. Частотна область хвильових процесів при цьому виді генерації пружних хвиль становить 0,5...10 кГц. В якості приймача використовується сейсмотатчик (вимірює віброшвидкість) або акселерометр (віброприскорення).

Основна перевага луно-методу полягає в тому, що його застосування не вимагає спеціальної підготовки палі для проведення обстежень, тому цей метод може бути використаний для масового контролю палі. Із недоліків методу слід зазначити його низьку ефективність при перевірці довгих палі (коли довжина палі перевищує 20...30 її діаметрів)

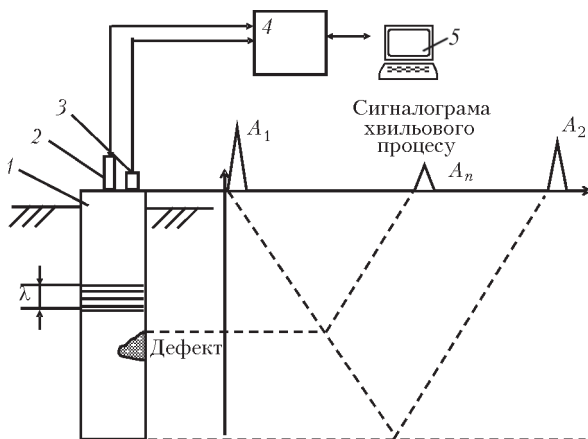


Рис. 1. Спрощена схема луно-методу для дефектоскопії палі: 1 – палія; 2 і 3 – збуджувач та приймач пружних хвиль; 4 – контролер; 5 – комп'ютер; A_1 і A_2 – зондувальний та відбитий сигнали; A_n – відбиття від дефекту; λ – довжина пружної хвилі

внаслідок значного згасання сигналу, а також порівняно низьку роздільну здатність та складність інтерпретування результатів перевірки конструкцій зі складною геометричною формою чи при наявності декількох дефектів. Тому на відповідальних об'єктах виникає необхідність додатково використовувати метод акустичного каротажу.

Метод акустичного каротажу використовується для оцінки стану бетону монолітних палі (кесонів або бурових стовпів) і залізобетонних стін у ґрунті. Один п'єзоелектричний перетворювач використовується для генерації сигналу, який поширюється у вигляді звукової хвилі (хвилі стиснення) всередині бетону, а інший датчик використовується для виявлення сигналу. Кожен перетворювач поміщають у вертикально розташовану трубу з ПВХ або сталі, яка була прикріплена до арматурного каркаса й наповнена водою до початку укладання бетону. Вода діє в якості контактної середовища між датчиком і трубою. Типова схема розташування труб і принципи тестування зображені на рис. 2, а.

Передавач і приймач опускаються на дно відповідних трубок і розміщуються в одній горизон-

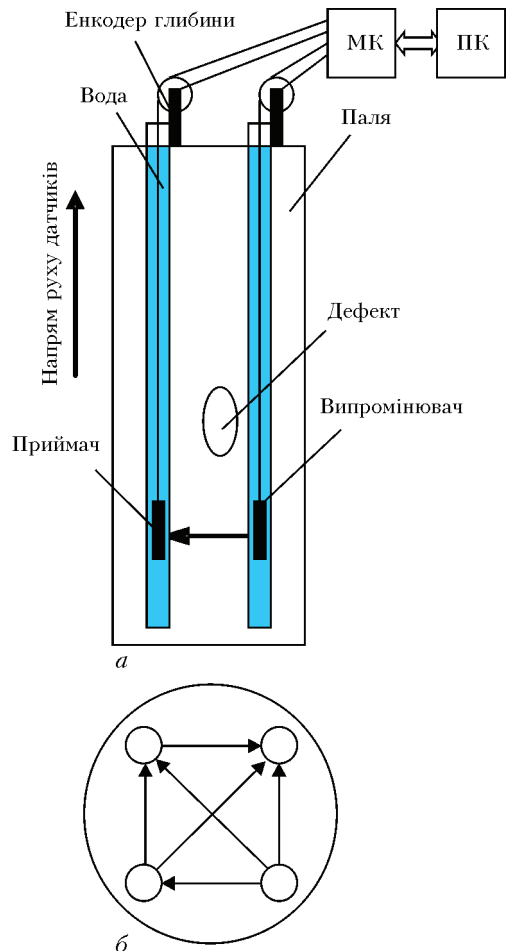


Рис. 2. Спрощена схема акустичного каротажу: а – схема проведення каротажу (МК – мікроконтролер); б – комбінації прозвучування по схемі з чотирма трубами

тальній площині. Під час проведення обстеження перетворювач–випромінювач генерує звукові імпульси (з частотою ≈ 10 імп/с), які детектуються за допомогою приймача в сусідній трубці. Обидва перетворювачі одночасно витягують зі сталюю швидкістю $\approx 0,5$ м/с до верху стовбура. Цей процес повторюють для всіх можливих комбінацій пар трубок (по периметру і діагоналях). Наприклад, на рис. 2, б показано шість комбінацій пар труб, які можуть використовуватися при конфігурації з чотирма трубками в буровому стовпі. Збільшення діаметра стовбура вимагає використання більшої кількості труб, що збільшує і число комбінацій, покращуючи тим самим роздільну здатність в зоні тестування. За результатами обстеження при кількості труб більше трьох можливо отримати тривимірну модель палі (томографію).

Розглянемо особливості побудови дослідного зразка універсальної системи акустичного каротажу та віброударної діагностики паливних фундаментів.

Структура дослідного зразка системи. Незважаючи на те, що для забезпечення вимірювань хвильових процесів при застосуванні розглянутих вище методів висуваються різні вимоги до АЦП (для луно-методу необхідні велика розрядність при відносно невисокій частоті дискретизації, а для акустичного каротажу навпаки – вища частота дискретизації при відносно невеликій розрядності) при виготовленні дослідного зразка універсальної системи в ході виконання проекту було використано один МК для реалізації обох методів.

Узагальнена структурна схема удосконаленого модуля збору інформації універсальної системи

акустичного каротажу та віброударної діагностики зображена на рис. 3.

Робота системи здійснюється під впливом сигналів управління, які надсилаються через універсальний порт комп'ютера USB спеціальним програмним забезпеченням. Вхідні дані заносяться в блок реєстра керування режимами роботи для визначення необхідного режиму роботи апаратури.

Вхідна інформація містить: коефіцієнти підсилення для чотирьох каналів датчиків; вибір частоти перетворення аналогових сигналів у цифрову форму; ознаку способу запуску апаратури під час проведення вимірювання.

Керування всіма елементами апаратури збору інформації здійснюється за допомогою МК типу STM32F103. Мікроконтролери STM32 виконані на основі технології Cortex-M3, яка спеціально розроблена для застосувань, де необхідні розвинені системні ресурси і мале енергоспоживання. При цьому вони мають настільки низьку вартість, що можуть конкурувати з традиційними 8- і 16-бітними МК.

Блок підсилювача виконаний на основі диференційних підсилювачів з програмованим коефіцієнтом підсилення типу AD8231. Підсилений сигнал надходить на вбудований в МК АЦП, а режим його роботи задається в залежності від виду вимірювань. Необхідно зазначити, що використаний мікроконтролер містить два окремих АЦП, кожен з яких може працювати з частотою дискретизації до 1 МГц. Це надає можливість при виконанні каротажу піднімати частоту дискретизації до 2 МГц, а в режимі луно-методу виконувати усереднення даних, тим самим збільшуючи чутливість перетворювача. Дискретні входи і виходи МК використовуються

для під'єднання енкодера глибини та інших цифрових датчиків, а також для керування випромінювачем УЗ коливань.

Отримані в ході обстеження дані накопичуються в статичному запам'ятовуючому пристрої МК і після виконання вимірювань передаються через шину USB у комп'ютер. Використання такого режиму роботи зменшує кількість цифрових завад. Також можливий режим попередньої обробки отриманих даних в МК, що зменшує обсяг обміну даними по шині USB.

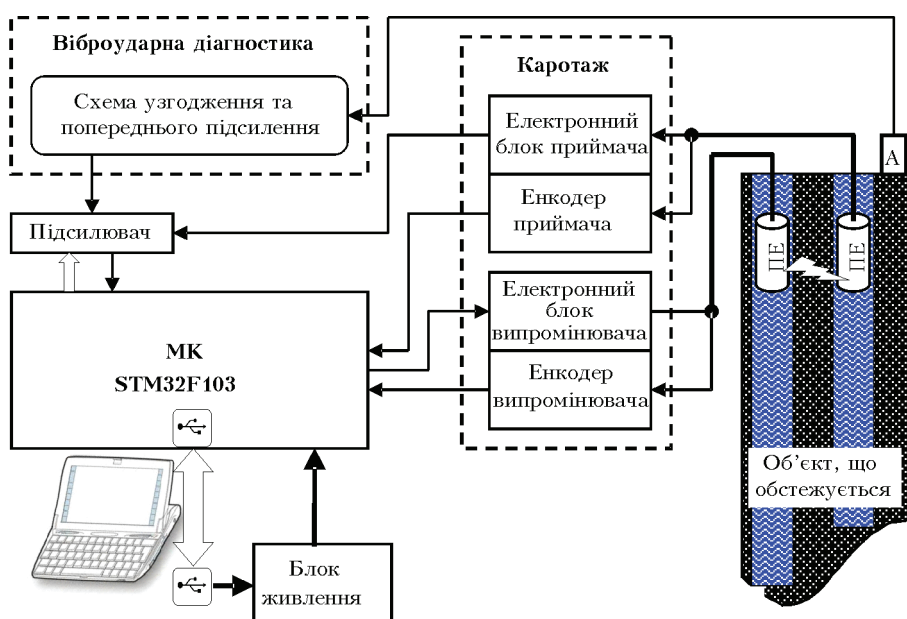


Рис. 3. Структурна схема модуля збору інформації системи віброударної діагностики та акустичного каротажу (А – акселерометр; ПЕ – п'єзокарварцовий елемент)

Слід зазначити, що для оптимізації процесу передачі даних та зменшення їх обсягу при проведенні обстежень методом каротажу задається спеціальний режим упаковки даних. Суть його полягає у наступному. Пружні хвилі, викликані вібраційними коливаннями п'єзокварцових елементів, надходять до приймача коливань з певною затримкою. Оскільки відомі база прозвучування і максимальна швидкість поширення хвиль, то тривалість цієї затримки можна розрахувати. Таким чином, можна знехтувати деякою визначеного розміру вибіркою даних, і тим самим зменшити обсяг буфера даних, що передаються в комп'ютер. В результаті можна передавати однаковий за розміром буфер, незважаючи на різну базу прозвучування. Це значно спрощує структуру як програмної, так і апаратної частини, оскільки статичний розмір буфера дозволяє уникнути зайвого використання динамічної пам'яті та спростити структури даних для зберігання результатів вимірювання. В режимі луно-методу також записується буфер фіксованої довжини, надмірність інформації при обстеженні коротких паль може використовуватись для проведення аналізу не тільки у часовій, а і у частотній області.

При проведенні випробувань використовується автоматичне регулювання рівня підсилення, що зменшує навантаження на оператора. Фактичне значення коефіцієнта підсилення, як і значення лічильників енкодерів глибини, передаються у пакеті разом із основними даними вимірювань.

Елементи підсистеми реалізації луно-методу. Апаратура для підсистеми реалізації луно-методу не потребує розробки окремих електронних блоків. Для збудження пружних коливань використовується ударний молоток (рис. 4, а) з вбудованим датчиком прискорення та змінними насадками. Сигнал датчика прискорення використовується для запуску системи. Перевищення певного рівня прискорення (в момент удару) сигналізує системі, що необхідно розпочинати запис даних. Крім того, сигнал з датчика прискорення може бути використаний для уточнення параметрів матеріалу, по якому було здійснено удар. Сигнал з акселерометра надалі інтегрується та може використовуватись для проведення модального аналізу.

Для реєстрації сигналів хвильових процесів у палі використовуються датчики швидкості, аксе-

лерометри або інші датчики прискорення відповідного частотного діапазону (рис. 4, б), у конструкцію яких додається кріплення для фіксації датчика на поверхні оголовку палі. Для забезпечення акустичного контакту використовуються спеціальні акустичні мастики, що наносяться на очищену поверхню бетону.

Елементи підсистеми реалізації акустичного каротажу. Для реалізації методу акустичного каротажу в якості датчика сигналів доцільно застосовувати п'єзокварцові елементи циліндричної форми невеликого розміру, що пов'язано з розміром внутрішнього діаметра труб, призначених для каротажу в тілі мостових та будівельних конструкцій, які підлягають технічному діагностуванню. Датчики встановлюються однотипними завдяки тому, що всередині корпусу датчиків знаходяться тільки однотипні п'єзокварцові елементи, а їх електронні блоки винесені в центральний модуль управління. Це дає змогу використовувати датчики як взаємозамінні, тобто кожен датчик може виступати як у якості випромінювача сигналів, так і в якості приймача сигналів. Крім того, розміщення тільки п'єзокварцових елементів без електронних блоків у датчиках призводить до значного спрощення конструкції корпусів датчиків, що має велике значення для вирішення питання їх герметичності у водному середовищі труб, в які занурюються датчики при проведенні вимірювання, оскільки в таких умовах датчики перебувають під дією значного тиску.

Передача сигналів відбувається по кабелях значної довжини (до 100 м). Знаходження електронного блоку випромінювача в безпосередній близькості до МК дає можливість формування необхідних сигналів у самому МК для роботи датчика-випромінювача. МК виробляє два види сигналів управління електронним блоком випромінювача: серію сигналів «накачки» високої напруги на високовольтному трансформаторі та сигнал миттєвого розряду цієї напруги, в результаті чого в п'єзокварцовому елементі генеруються УЗ коливання, які поширюються в тілі досліджуваної конструкції. Структурна схема електронного блоку випромінювача зображена на рис. 5.

Оскільки електронний блок випромінювача генерує короткий (5 мс) високовольтний сигнал амплітудою приблизно 1000 В, який проходить по кабелю довжиною до 100 м до датчика, то виникає необхідність виконати гальванічну розв'язку цього блоку від інших електричних кіл універсальної системи акустичного каротажу та віброударної діагностики (ПК, інші електронні блоки). Для цього до складу електронного блоку введено наступні елементи: перетворювач напруги +5 В, яка надходить від USB порта ПК, в +12 В



Рис. 4. Молоток для проведення випробувань луно-методом (а) та адаптований для луно-методу датчик швидкості (б)

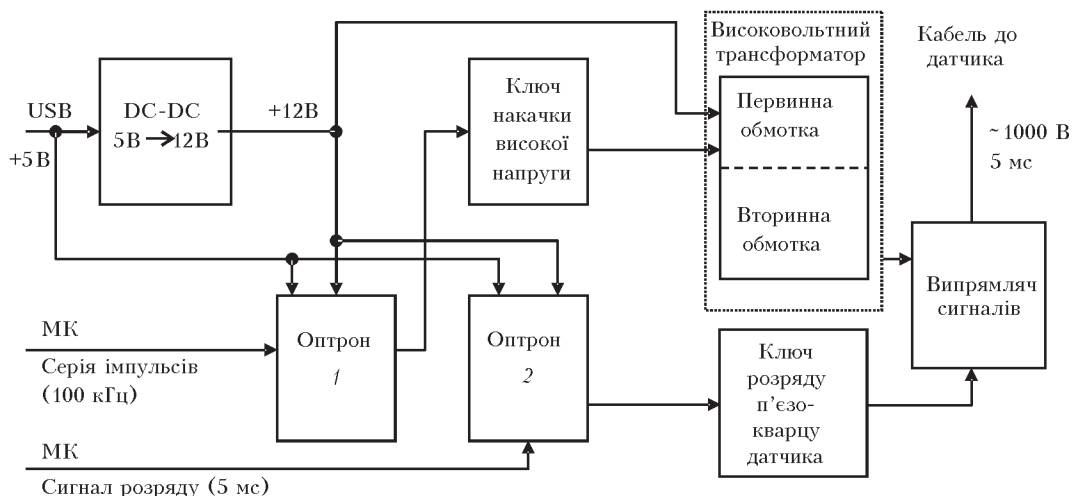


Рис. 5. Структурна схема електронного блоку випромінювача

з гальванічною розв'язкою цієї напруги; дві мікросхеми оптронів, що застосовані для гальванічної розв'язки сигналів МК від електронного блоку випромінювача. В такому разі такі елементи, як ключ насадки високої напруги, ключ розряду п'єзокварцового елемента датчика, високовольтний трансформатор, випрямляч сигналів, кабель з датчиком не мають електричного зв'язку з іншими колами вимірювальної системи.

Серія сигналів з частотою 100 кГц, які надходять з виходу оптрона 1 на вхід ключа насадки, запускає в роботу первинну обмотку високовольтного трансформатора з коефіцієнтом трансформації 100. При цьому амплітуда сигналів на його вторинній обмотці в кінці серії імпульсів тривалістю 5 мс досягає величини ≈ 1000 В. Після випрямлення напруги на вторинній обмотці трансформатора п'єзокварцовий елемент випромінювача буде заряджений до потенціалу такої ж величини. В кінці серії імпульсів насадки на МК виробляється імпульс тривалістю 20 мс, який через оптрон 2 надходить на ключ розряду для миттєвого розряду потенціалу на п'єзокварцовому елементі випромінювача. Часова діаграма роботи електронного блоку випромінювача зображена на рис. 6.

Розряд потенціалу на п'єзокварцовому елементі викликає появу УЗ коливань, які згасають протягом 20 мс. Поширюючись у тілі досліджу-

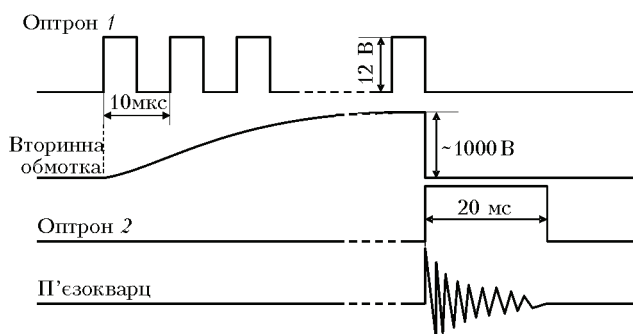


Рис. 6. Часова діаграма роботи електронного блоку випромінювача

ваної конструкції, ці коливання досягають приймача, в якому генеруються електричні сигнали з тією ж частотою, що і у випромінювача. При цьому важливо, щоб резонансні частоти обох п'єзокварцових елементів співпадали з достатньою точністю (допустима відмінність не більше 0,5 %).

Програмне забезпечення управління системою. Для проведення випробувань було розроблено спеціальне прикладне програмне забезпечення, яке дає можливість враховувати велику кількість параметрів для проведення обстежень, що необхідно для подальшого створення звітної документації. Програма влаштована таким чином, що всі випробування групуються у базі даних за наступними критеріями:

Фірма-замовник → Об'єкт замовника → Елемент Об'єкт → Номер/назва конструкції

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

Випробування відображаються у вигляді списку, який містить основні параметри конструкції. У випадку паль це: номер, проектна довжина, діаметр палі, також включається дата проведення обстеження.

Таким чином, для проведення нового обстеження необхідно спочатку вибрати чи задати параметри розташування конструкції. При цьому тип конструкції можна вибрати з переліку, а також є можливість для кожної конструкції додавати коментар, що надає допомогу при проведенні аналізу результатів обстежень.

Робочий екран проведення випробувань в режимі каротажу наведений на рис. 7. У його верхній лівій частині виводиться графік поточної реалізації хвильового процесу. У центральній частині екрану наводиться відображення у спеціальному режимі, де по вертикальній шкалі відкладаються значення лічильників енкодерів

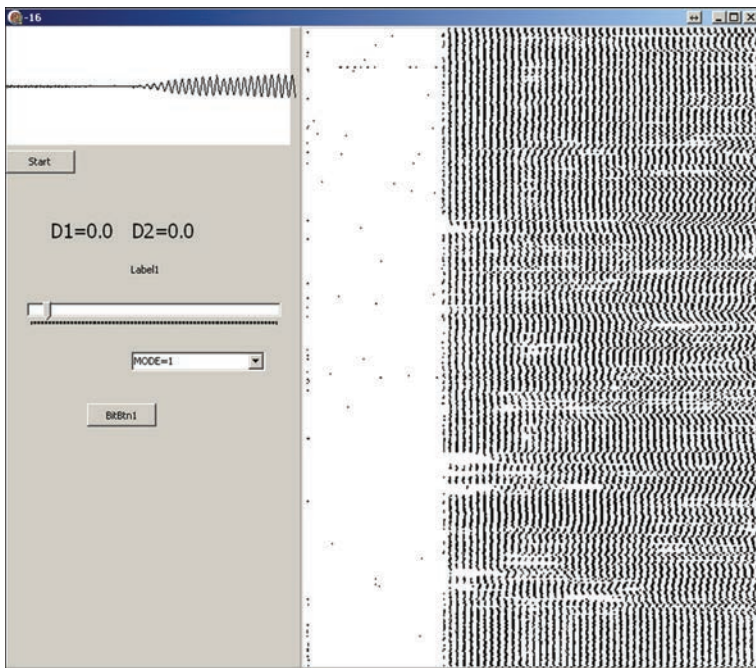


Рис. 7. Рабочий экран программы в режиме каротажа

глибини, а по горизонтальній шкалі з урахуванням бази прозвучування відтворюються значення реалізацій у режимі контрастності, що надає можливість контролювати весь процес каротажу по всій довжині палі.

Висновки

Таким чином, показано, що для достатнього повного та ефективного обстеження занурених у ґрунт бетонних паль особливо відповідальних об'єктів необхідно використовувати

у сукупності два методи дефектоскопії: віброударну діагностику на основі луно-методу та метод акустичного каротажу.

Розроблено та виготовлено експериментальний зразок системи акустичного каротажу та віброударної діагностики на основі п'єзокварцових елементів уніфікованої конструкції та удосконалених електронних блоків. Проведено його експериментальні випробування в умовах будівельних майданчиків із застосуванням спеціальної випробувальної апаратури.

Результати роботи можуть бути використані як при зведенні нових мостових та будівельних конструкцій, так і при відновленні об'єктів, частково зруйнованих внаслідок стихійних лих, техногенних та інших катастроф, у тому числі у східних регіонах України.

1. Городжа А. Д. Современный стан контролю якості залізобетонних паль і бурових стовпів / А. Д. Городжа, Б. О. Трошинський, В. П. Козел // Основи і фундаменти. – 2006. – Вип. 30. – С. 34–38.
2. Створення методів та системи ударної діагностики для визначення технічного стану та подовження ресурсу будівельних та мостових конструкцій / М. В. Мислович, А. Д. Городжа, Л. Б. Остапчук [та ін.] // Збірник наукових статей з цільової програми «Ресурс». – К.: Вид-во Ін-ту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. – С. 456–463.
3. Paquet J. Etude vibratoire des pieux en be'tonreponse harmonique et impulsionnelle. Application au controle / J. Paquet // Annales de l'Institut Technique du Batiment et des travaux Publics. – 1968. – Mai. – P. 794–803.

The paper presents the results of development of an all-purpose computer system, designed for flaw detection of bridge and building structures with application of methods of acoustic logging and vibration impact diagnostics. The main objective of project research was improvement of reliability and extension of service life at construction and reconstruction of bridge and building structures through development and introduction of respective technical means. Application of the developed system will allow determination of the degree of reliability of load-carrying concrete structures, in particular at restoration of objects partially destroyed as a result of natural disasters, technogenic and other catastrophes.

Keywords : building and bridge structures, vibration impact diagnostics, acoustic logging technique

Надійшла до редакції
06.05.2016

НОВАЯ КНИГА

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2016. – 98 с. (электронное издание <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp2015book.pdf>).

Сборник содержит доклады, представленные на Седьмой международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов», 14–18 сентября 2015 г., Одесса, Украина, в которых отражены последние достижения в области лазерной сварки, резки, наплавки и других современных технологий лазерной обработки материалов. Рассматриваются перспективы применения лазерных технологий. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из нескольких стран мира. Архив предыдущих шести конференций «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» на сайте: <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp>