

ФІЛІПОВА МАРИНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-4910-3249>e-mail: m.filippova@kpi.ua

ДЕМЧЕНКО МАРІЯ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-0436-1092>e-mail: dmariiaa@gmail.com

БОГДАН ГАЛИНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-4910-3249>e-mail: bogdangalya@gmail.com

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ФАСОННИХ ПРОФІЛІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

В роботі розглянуто актуальність реалізації системи моніторингу технічного стану металевих конструкцій будівель, що пов'язано в першу чергу зі збільшенням використання металевих профілів в якості основних конструктивних елементів. Конфігурація будівель, яка на пряму залежить від архітектурного формування самої будівлі, ускладнюється та потребує обов'язкового моніторингу її елементів. Моніторинг проводиться на відповідність параметрів будівля заданим в межах допустимих значень напружень, які виникають під дією навантажень. Розглянуто основні методи, які використовуються для визначення напружено-деформованого стану металевих конструкцій, виходячи з конструктивних особливостей фасонних профілів, що виступають в якості основних конструктивних елементів – балок в металевих конструкціях будівель. Оцінено доцільність застосування для визначення дійсного напружено-деформованого стану фасонних профілів акустичного методу, який оснований на використанні ефекту акустопружності, а саме зв'язку пружних властивостей матеріалів зі зміною характеру поширення ультразвукових хвиль. Показано доцільність використання прозвучування за схемою дзеркально-тіньового методу, який дозволяє збільшити довжину проходження ультразвукової хвилі в полиці вздовж лінійно розподілених напружень. Показано можливість визначення дійсних значень механічних напружень в фасонних профілях металевих конструкцій шляхом вимірювання часових інтервалів проходження ультразвукової хвилі та температури в зоні вимірювання. Запропоновано функціональну схему системи моніторингу технічного стану будівель, в яку закладений акустичного методу встановлення напружено-деформованого стану металевих конструкцій. Розглянуто основні складові елементи системи моніторингу та можливості її апаратної реалізації, шляхом без дротової передачі даних, який призначений для встановлення в будівлях, які знаходяться в експлуатації та ще проектуються.

Ключові слова: напружено деформований стан; акустичний контроль; металеві конструкції; мережі LoRaWAN.

FILIPPOVA MARYNA, DEMCHENKO MARIIA, BOHDAN HALINA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SYSTEM FOR MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF SHAPED PROFILES OF METAL STRUCTURES OF BUILDINGS

The article considers the relevance of implementing a system for monitoring the technical condition of metal structures of buildings, which is primarily related to the increase in the use of metal profiles as the main structural elements. The configuration of buildings, which directly depends on the architectural form of the building itself, becomes complicated and requires mandatory monitoring of its elements. Monitoring is carried out for compliance of the building parameters with the specified limits within the permissible values of stresses that arise under the action of loads. The main methods used to determine the stress-strain state of metal structures, based on the structural features of shaped profiles, which act as the main structural elements - beams in metal structures of buildings, are considered. The applicability of the acoustic method, which is based on the use of the acoustoelastic effect, namely the connection of the elastic properties of materials with a change in the character of the propagation of ultrasonic waves, to determine the actual stress-strain state of shaped profiles has been evaluated. The expediency of using sounding according to the scheme of the mirror-shadow method, which allows to increase the length of passage of the ultrasonic wave in the shelf along the linearly distributed stresses, is shown. The possibility of determining the actual values of mechanical stresses in the shaped profiles of metal structures by measuring the time intervals of the passage of the ultrasonic wave and the temperature in the measurement area is shown. The functional scheme of the system for monitoring the technical condition of buildings is presented, which incorporates the acoustic method of establishing the stress-strain state of metal structures. The main components of the monitoring system and the possibilities of its hardware implementation, by means of wireless data transmission, which is intended for installation in buildings that are in operation and still being designed, are considered.

Keywords: stressed deformed state; acoustic control; metal structures; LoRaWAN networks.

Постановка проблеми

Сучасну архітектуру більшості країн світу, в тому числі і України, важко уявити без активного застосування металевих конструкцій. Прослідковується застосування великого різноманіття прогресивних конструктивних форм та елементів, з використанням металевих конструкцій. Це досягається за рахунок використання такої властивості сталі, як висока міцності. В останні роки різноманіття архітектурних форм виходить за рамки звичної нам лінійності. Інноваційні формотворення, що закладають в архітектурний образ будівлі, ускладнюють не тільки можливість їх реалізації, виходячи з можливих конструктивних рішень, а й

забезпечення їх надійної та безаварійної роботи впродовж всього терміну експлуатації. Рішенням в даному питанні є застосування систем контролю і спостереження за технічним станом будівель та їх окремих конструктивних елементів.

Найважливішим параметром металевих конструкцій (МК) є їх напружено-деформований стан (НДС). Виникнення в елементах механічних напружень, значення яких перевищує допустимі для конкретного матеріалу та розраховане під відповідний статичний вплив, може призвести до аварійних ситуацій. За конструктивним рішенням будівлі, виконані з МК, представляють собою колоно-балочну систему, найчастіше посилену вертикальними та горизонтальними зв'язками. Пікові значення напружень в такій конструкції виникають в балках в місцях найбільш віддалених від точок опори, тобто в балці з опорою на двох кінцях ця точка буде відповідати середині білки. Випадки, коли місця найбільшої концентрації напружень зміщені, визначаються інженером для кожної окремої конструктивної системи..

Аналіз останніх джерел

В якості методів, які застосовують для визначення НДС металу, використовують акустичні методи [1, 2], оскільки вони в порівнянні з тензометричними дозволяють визначати фактичні значення напружень в металі, як екстрено, так і впродовж певного часу [3, 4]. Для тензометричних методів характерною особливістю є необхідність проведення спостереження на певному проміжку часу за зміною напружень та деформацій в зовнішніх шарах елементів МК [3]. Особливістю елементів металевих конструкцій, які використовуються в якості балок, є їх профіль поперечного перерізу, який буває типу швелер або двутавр [5 - 7]. Вони представляють собою завжди дві горизонтальні полиці, які з'єднані вертикальною стінкою. Максимальні значення напружень в такому перерізі припадають саме на полиці, і в них розподіляються [3]. Тому особливо важливим є прозвучування полиць даних фасонних профілів (ФП). Хоча по зовнішньому шару ФП спостерігаються найбільші значення напружень, методи прозвучування поверхневих шарів металу [8] в цьому випадку показує погану збіжність результатів. Найбільш доцільним є застосування прозвучування з використанням ефекту акустопружності, тобто зміною характеристик поширення ультразвукових хвиль, що пов'язана зі зміною міжатомних відстаней та пружних модулів в металі, а саме деформації внутрішньої кристалічної структури матеріалу [9, 10].

Сам метод прозвучування матеріалу обирається відносно тензорів напруження матеріалу в залежності від задач діагностики та обмежень, які вносить об'єкт контролю. Визначення одновісних напружень в твердому тілі, що є характерними для ФП, виконують з використанням наступних видів вимірювання: різниці фаз хвиль, що утворилася в результаті подвійного променезаломлення [11]; відмінності швидкостей поширення пружних хвиль в двох спеціально обраних напрямках, або місцях з різними значеннями напружень [12]; зміна значенням швидкості поширення або загасання пружних хвиль [13]. Найбільш поширені методи вимірювання механічних напружень засновані на вимірюванні швидкості ультразвуку, так як ці залежності добре описані теоретично в рамках нелінійної механіки твердого тіла [3].

Тому в основу системи моніторингу напружено-деформованого стану покладено визначення зміни діючих одновісних напружень в матеріалі несучих елементів металевих конструкцій, з використанням неруйнівного методу контролю [4]. Точками контролю виступають місця з максимальним значенням напружень, які відомі відповідно до умов проектування металевих конструкцій та реалізованих проектних рішень. Вимірювання поточних значень напружень проводиться завдяки, реалізованому методу акустичної діагностики за допомогою відносного вимірювання швидкості ультразвукової хвилі [10].

Відповідно до діючих норм [14] в Україні необхідним є проведення науково-технічного супроводу будівель для зменшення ризиків виникнення помилок в умовах їх експлуатації, що регламентуються чинними нормами і стандартами. Також передбачається основні етапи супроводу будівель, а саме: моніторинг стану конструкцій і інженерного обладнання; відпрацювання конструктивних рішень окремих вузлів; відпрацювання окремих технологічних рішень; контроль якості матеріалів, виробів та конструкцій; нагляд за станом існуючої забудови та умовами їх експлуатації; коригування або уточнення проектів експлуатації та технологій моніторингу, що застосовуються на етапах експлуатації та зняття об'єкта з експлуатації.

З огляду на вище сказане, необхідності ведення технічного моніторингу поточного стану будівельних об'єктів, є першочерговим, і необхідним кроком при впровадженні науково-технічного супроводу, яке необхідне ще на стадії проектування [15, 16], що дозволить зменшити ризики виникнення критичних ситуацій та вести їх прогнозування [17, 18]. Тому система моніторингу має на меті забезпечити автоматизований збір даних спостережень за технічним станом конструкцій будівлі, обробку даної інформації, їх аналіз та оцінку [19, 20].

Система направлена для отримання інформації про деформацію при статичному навантаженні конструкції, формування та видачі сигналів інформації про деформацію, одержуваної з акустичних перетворювачів у вигляді часових інтервалів проходження акустичної хвилі та температурних датчиків температури металевих конструкцій у місці вимірювання [3].

Метою роботи є: розробка та обґрунтування системи моніторингу технічного стану будівель, на основі оцінки напружено-деформованого стану фасонних профілів їх металевих конструкцій, для забезпечення надійності впродовж всього терміну експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Організація системи моніторингу направлена на забезпечення автоматизованого збору даних спостережень за НДС ФП МК у процесі їх функціонування. Система моніторингу дозволяє проводити

автоматизований збір інформації про зміну напружень при статичному навантаженні конструкції, формування та видачі сигналів інформації про деформацію, що надходять з акустичних перетворювачів та температурних датчиків.

Функціональна схема системи моніторингу НДС ФП МК, що представлена на рис. 1, утворена двома основними блоками, зв'язками та комунікаціями між об'єктами системи.

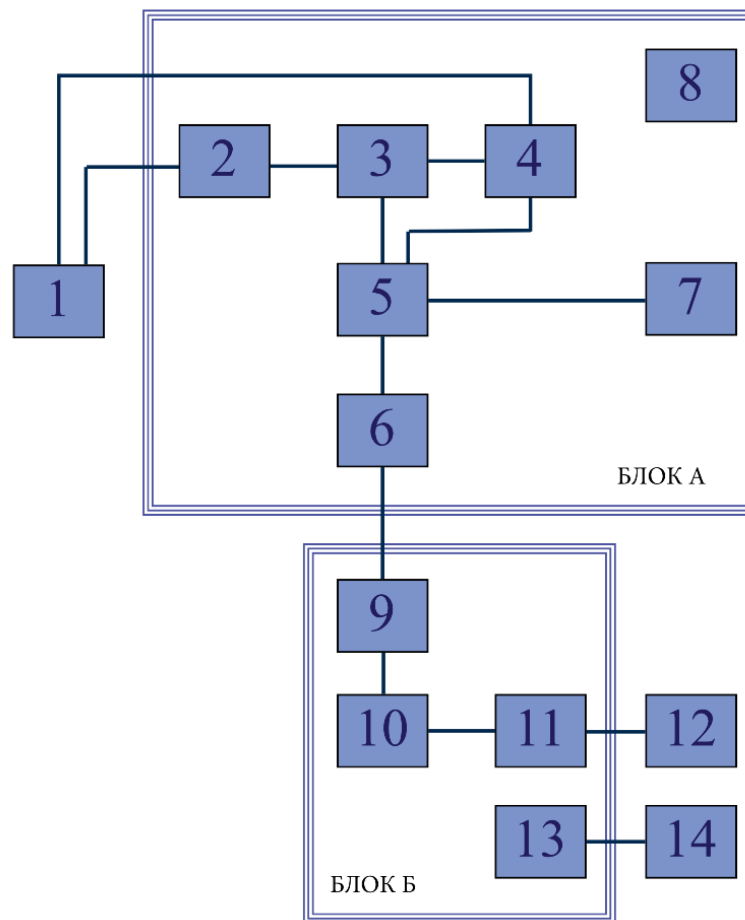


Рис. 1. Функціональна схема системи моніторингу НДС ФП МК

Виділено два основних блоки в системі моніторингу НДС ФП МК, а саме: блок А - діагностичний блок та блок Б - функціональний блок обробки. Взаємодія між блоками відбувається через засоби передачі та отримання інформації, що входять до складу як діагностичного поз. 6 так і функціонального блоку обробки поз. 9. Складовими частинами системи моніторингу є об'єкт діагностики 1, АРМ диспетчера 12 та віддалені пристрої 14. Принцип роботи системи полягає в наступному. З об'єкту дослідження 1 знімається інформація блоком акустичного впливу 2 та вимірювачем температури 4, що на пряму пов'язані з генератором імпульсів 3. Інформація отримана від акустичного впливу разом з вимірами температури обробляється програмним пристроєм 5. Отримані аналітичні дані через засоби передачі та отримання інформації 6 передається через відповідні засоби функціонального блоку обробки 9 на програмний пристрій 10, де проводиться їх обробка. Прийняті рішення оголошені логічним пристроєм 11 разом з отриманою раніш аналітикою передаються на АРМ диспетчера 13. Підключений до функціонального блоку обробки Б, пристрій оповіщення 13 передає інформацію на віддалені пристрої кваліфікованого персоналу та вповноважених осіб. Обов'язково віддаленими пристроями оповіщення мають бути сигнализація та світлові табло, що попередять людей, які знаходяться в будівлі, про необхідність термінової евакуації.

Основними задачами які дана система моніторингу має забезпечити в рамках діагностики НДС ФП МК є: реєстрація деформацій при статичному навантаженні МК в цілому; підвищення оперативності реагування на виникнення деформацій; підвищення достовірності даних про поточний технічний стан конструкції; зменшення матеріальних витрат на проведення спостережень за просторово-часовими характеристиками процесу деформації конструкції.

Система моніторингу може бути організована декількома шляхами, з урахуванням методів передачі даних, а саме з використанням дротової та бездротової. Система, що реалізована з передачею даних за допомогою дротів має як ряд недоліків та і переваги при її організації. До переваг бездротової передачі даних при реалізації даної системи можна віднести: стійкий канал до перешкод; легку організацію захисту пакетів даних; економію часу на кодування/декодування сигналу; здатність до розширення; легкість зміни конфігурації. Водночас основною перевагою провідної мережі залишається стабільність та надійність її

роботи. Серед недоліків провідної передачі даних при реалізації системи моніторингу НДС ФП МК виявляються такі як: висока вартість прокладання дротів; електромагнітні наведення; втрата пакетів даних; пошкодження самої лінії передачі; складність підключення нових пристроїв; обмежена кількість пристроїв для підключення.

В апаратній реалізації без дротової передачі даних (рис. 2) виділяється блок діагностики та блок керування. Опосередковано знаходяться віддалені комп'ютери та мобільні пристрої. В блоці діагностики умовно виділено групу об'єктів, що розташовуються безпосередньо в місці вимірювання. Так встановлюються датчик температури та блок акустичного впливу на елемент конструкції разом з вимірювальним блоком. До них підводиться живлення мережі чи живлення за рахунок сонячних модулів. Всі встановлені елементи вимірювання групами приєднуються до комунікатора. А ті в свою чергу до шафи керування. Блок керування, оснащений сервером, з'єднується на пряму з шафою керування де і проводиться обробка отриманої інформації. На автоматизоване робоче місце диспетчера отримує інформацію з сервера у повному обсязі з усією статистикою, аналітикою та прийнятими рішення. Додатково необхідне дублювання інформації в певному обсязі на віддалені комп'ютери та мобільні пристрої чи безпосередньо з сервера, чи з АРМ диспетчера.

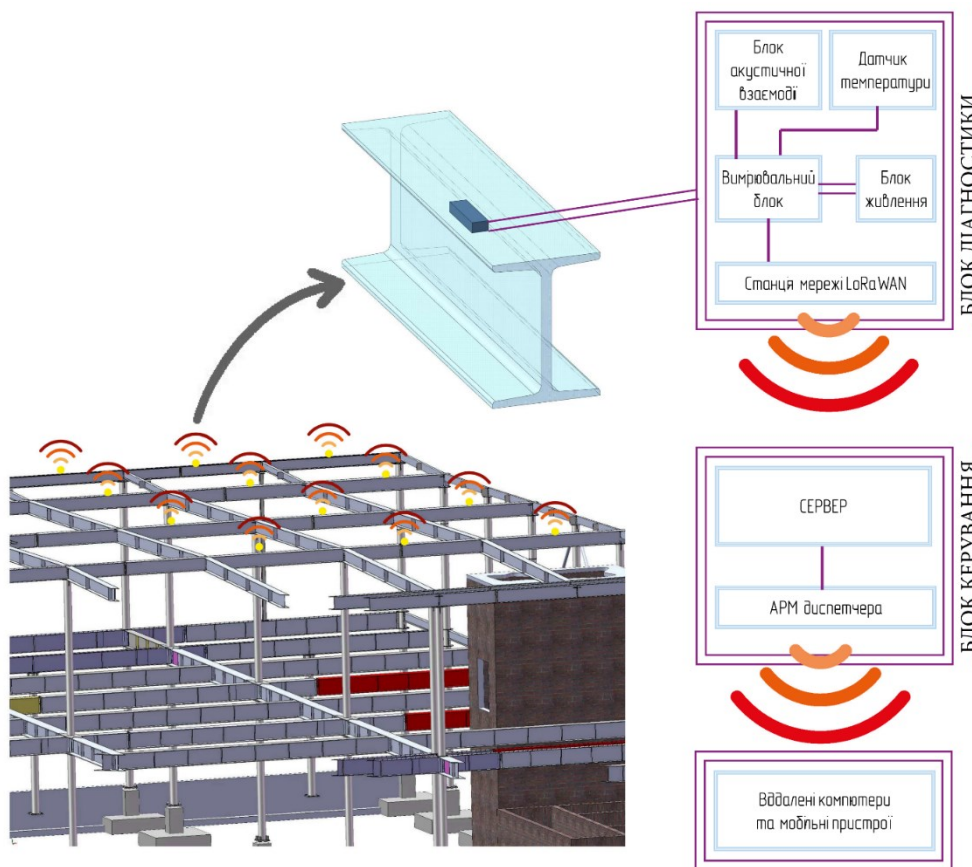


Рис. 2. Схема апаратної реалізації системи моніторингу НДС ФП МК з використанням бездротової передачі даних

З урахування вказаних недоліків системи, що реалізується з провідною передачею даних пріоритетним є організація передачі інформації без прокладання ліній зв'язку. Таким чином при передачі інформації бездротовим методом слід говорити про реалізацію технології LoRa. Це пов'язано з тим, що дана технологія бездротового зв'язку призначена для організації обміну даними недорогих автономних пристроїв на відносно великі відстані. Приймачі LoRa завдяки методам модуляції та обробки сигналу, що використовуються, мають високу чутливість. Це дозволяє забезпечити великий радіус дії на відкритій ділянці території в радіусі до 10 км та гарну проникаючу здатність всередині приміщень.

Принципово схема апаратної реалізації системи моніторингу НДС ФП МК з використанням бездротової передачі даних відрізняється від бездротової схеми, з використанням в блоці діагностики станції мережі LoRaWAN. Передача даних до серверу блоку керування відбувається на пряму від кожного блоку діагностики через модуляцію LoRa. Інформація з сервера передається на АРМ диспетчера, звідки і здійснюється керування та зв'язок з віддаленими комп'ютерами та мобільними пристроями.

Апаратну реалізацію системи бездротовим методом розглянемо на прикладі торговельного центру м. Чернігова. Фрагмент об'ємної МК якої показано на рис. 2. Будівля складається з двох поверхів та має металевий каркас виконаний з ФП. По металевим балкам організовано міжповерхове перекриття та покриття всього торговельного центру, з розміщенням на даху додаткового технічного обладнання.

На рис. 2 зображено об'ємну модель металевого каркасу існуючої будівлі торговельного центру, де

на ФП МК показані місця розташування блоків діагностики. Кожен блок діагностики оснащений станцією мережі LoRaWAN. І таким чином передача даних відбувається на пряму в диспетчерську, що зображена на фрагменті частини будівлі праворуч.

Для передачі даних з використанням модуляції LoRa характерними є наступний ряд недоліків, які обмежують спектр її застосування:

1. Відносно низька пропускна здатність, що варіюється в залежності від використовуваної технології передачі даних на фізичному рівні, становить від декількох сотень біт/с до декількох десятків кбіт/с.

2. Затримка передачі даних від датчика до кінцевої програми, пов'язана з часом передачі радіосигналу, кратна долям секунди.

3. Відсутність єдиного стандарту, який визначає фізичний шар та керування доступом до середовища для бездротових LPWAN-мереж.

4. Ризики шуму спектру неліцензованого діапазону частот.

5. Пропріетарна технологія модуляції LoRa, "закрита" патентом Semtech.

6. Обмеження потужності сигналу.

В умовах організації системи в приміщеннях площею до 1 км² дозволить навіть в рамках даних обмежень отримувати чіткий та швидкий сигнал з усіх блоків діагностики на один блок керування. Розглянуті обмеження модуляції LoRa в цілому задовольняють умовам промислового та громадського будівництва, з урахування їх площ та максимальних віддалених дистанцій сервера від блоків діагностики. Також виділимо переваги використання модуляції LoRa, а саме при організації системи моніторингу НДС ФП МК у порівнянні з дротовим методом передачі даних, а саме:

1. Низьке енергоспоживання;

2. Стійкість до перешкод;

3. Сумісність з наявними мережами/технологіями бездротової передачі даних;

4. Можливість підключення великою кількістю пристроїв;

5. Можливість передачі інформації на значні відстані до 5 км і більше;

6. Автономність роботи;

7. Можливість заміни, дорогих у прокладанні та обслуговуванні слаботочних мереж збору даних на великих об'єктах.

Однак швидкість передачі сигналу до серверу від блоку діагностики показує кращі показники, у порівнянні з дротовим підключенням «комутатор» – «шафа керування» - «сервер». Водночас, необхідно враховувати додаткові фактори, що відносяться до конфігурації будівлі, її планування, наявності внутрішніх перегородок, площі забудови (віддаленості блоків діагностики між собою) та необхідної кількості місць діагностики, які накладають певні обмеження на систему моніторингу. Для методів передачі інформації через дроти це вносить певні труднощі. Однак для бездротової передачі даних вказані перешкоди не вносять обмежень чи складнощів в реалізації системи.

Таким чином, використання системи моніторингу НДС ФП МК з використанням бездротового методу передачі даних дозволяє спростити апаратну реалізацію системи, зменшити ви-трати коштів та часу на прокладання дротів і встановлення додаткового обладнання.

Проте обов'язково необхідним при реалізації системи моніторингу є забезпечення наступних умов:

- постійна працездатність системи моніторингу та її окремих елементів;

- отримання результатів діагностики на запит оператора;

- віддалений доступ до даних діагностики;

- можливість удосконалення системи з метою доповнення її новими модулями;

- можливість додавання нових точок діагностики.

Висновки

Відповідно до діючих норм в Україні необхідним є проведення науково-технічного супроводу будівель для зменшення ризиків виникнення помилок в умовах їх експлуатації, що регламентовані чинними нормами і стандартами. Тому є доцільним застосування системи моніторингу НДС ФП МК в будівлях, які вводяться в експлуатацію та вже експлуатуються.

Таким чином система моніторингу напружено-деформованого стану призначена для своєчасного виявлення суттєвих змін НДС в несучих елементах будівель, які можуть спричинити переведення об'єкта в обмежено-працездатний або аварійний стан. Застосування даної системи моніторингу дозволяє вирішити завдання забезпечення безпеки будівель, виконаних з ФП МК, підвищити їх довговічність і уникнути ризиків пов'язаних з їх руйнуванням.

Література

1. Guz A.N Ultrasonic nondestructive methods of stress analysis in materials and structural members (review) / A. N. Guz // Int Appl Mech. – 2011. №(11)46. pp. 3–11.

2. Li Z. Internal stress monitoring of in-service structural steel members with ultrasonic method / Z. Li, J. He, J. Teng, Y. Wang // Material. – 2016. №4(9). – pp. 1-17.

3. Тимчик Г.С., Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій [монографія] / Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко // Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. – 168 с. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57978>.
4. Tymchik, G. Analysis of acoustic diagnostics errors of stress state for shaped profiles of metal structures / G. Tymchik, M.Filippova, M. Demchenko // Eureka: Physics and Engineering. – 2016. №5. – С. 50-57. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00153>.
5. ДСТУ 8768:2018 Двутаври сталеві гарячекатані. Сортамент – Введ. 01.01.2019. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 5 с.
6. ДСТУ 8807:2018 Балки двотапкові та швелери сталеві спеціальні – Введ. 01.01.2019. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 5 с.
7. ДСТУ 3436-96 Швелери сталеві гарячекатані. Сортамент. – Введ. 01.01.1999. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 1998. – 10 с.
8. Bray D.E. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the Lcr ultrasonic wave / D.E. Bray, W. Tang // Nucl. Eng. Design. 2001. № 2(207). P. 231 240.
9. Vangi D. Stress evaluation by pulse-echo ultrasonic longitudinal wave / D. Vangi // Exp. Mech. 2001. №3(41). – P. 277 281.
10. Демченко М. О. Система неруйнівного контролю балочних елементів промислових споруд / М. О. Демченко, М. В. Філіппова, В. М. Безручко // Системи обробки інформації. 2015. - № 6. С. 39 42. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_6_12.
11. Xu C. Nondestructive Testing Residual Stress Using Ultrasonic Critical Refracted Longitudinal Wave / C. Xu, W. Song, Q. Pan, H. Li, S. Liu // Physics Procedia. – 2015. – Vol.70, P. 594-598. doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.030.
12. Yang Y. Broadband electrical impedance matching of sandwiched piezoelectric ultrasonic transducers for structural health monitoring of the rail in-service / Y. Yang, X. Wei, W. Yao, J. Lan // Sensors and Actuators A: Physical. – 2023. – Vol.364. doi: 10.1016/j.sna.2023.114819.
13. Deng L. Uniaxial stress identification of steel components based on one dimensional-CNN and ultrasonic method / L. Deng, S. Xu, W. Wang, C. Xiang // Measurement. – 2022. – Vol.194. doi: 10.1016/j.measurement.2022.110868.
14. ДБН В.1.2-5:2007 Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. – Введ. 01.01.2008. К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 16 с.
15. Gaidaichuk V.V. Efficiency and problems for monitoring large-building structures / V.V. Gaidaichuk, K.E. Kotenko // Опір матеріалів і теорія споруд. 2016. № 97. С. 175 – 185.
16. Hassani S. A systematic review of data fusion techniques for optimized structural health monitoring / S. Hassani, U. Dackermann, M. Mousavi, J. Li // Information Fusion. – 2023. – Vol. 103, P. 102-136. doi: /10.1016/j.inffus.2023.102136
17. Ісаєв О.П. Комплексний моніторинг інженерних споруд / О.П. Ісаєв, Ю.Ф. Гуляєв, П.О. Чуланов // Містобудування та територіальне планування. – 2020. № 74. С. 162–171.
18. Мажейка О.Й. Моніторинг технічного стану несучих конструкцій будівель і споруджень / О.Й.Мажейка // Наукові записки. – 2010. №10. С. 222-228.
19. Давиденко О. П. Безпровідна система моніторингу напружено-деформованого стану будівель та споруд / О. П. Давиденко, О. О. Безус // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. на-ук. пр. Темат. вип. : Автоматика та приладобудування. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 29 (1138). – С. 8-12. URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/16789>.
20. Sazonova S. Condition Monitoring of the Unfinished Frame Building's Load-Bearing Structures in the Railway Zone / S. Sazonova, T. Zyazina, V. Zherdev 3, V. Goryunov, S. Korablin // Transportation Research Procedia/ - 2023. – Vol.68, P. 271-280. doi: 10.1016/j.trpro.2023.02.037.

References

1. Guz A.N Ultrasonic nondestructive methods of stress analysis in materials and structural members (review) / A. N. Guz // Int Appl Mech. – 2011. №(11)46. pp. 3–11.
2. Li Z. Internal stress monitoring of in-service structural steel members with ultrasonic method / Z. Li, J. He, J. Teng, Y. Wang // Material. – 2016. №4(9). – pp. 1-17.
3. Tymchik H.S., Diahnostyka napruzhenodeformovanoho stanu metalevykh konstruktssii [monohrafiia] / H.S. Tymchik, M.V. Filippova, M.O. Demchenko // Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politekhnik», 2023. – 168 s. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57978>.
4. Tymchik, G. Analysis of acoustic diagnostics errors of stress state for shaped profiles of metal structures / G. Tymchik, M.Filippova, M. Demchenko // Eureka: Physics and Engineering. – 2016. №5. – С. 50-57. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00153>.
5. DSTU 8768:2018 Dvutavry stalevi hariachekatani. Sortament – Vved. 01.01.2019. – К.: DP «UkrNDNTs», 2019. – 5 s.
6. DSTU 8807:2018 Balky dvotavrovi ta shvelery stalevi spetsialni – Vved. 01.01.2019. – К.: DP «UkrNDNTs», 2019. – 5 s.
7. DSTU 3436-96 Shvelery stalevi hariachekatani. Sortament. – Vved. 01.01.1999. – К.: DP «UkrNDNTs», 1998. – 10 s.
8. Bray D.E. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the Lcr ultrasonic wave / D.E. Bray, W. Tang // Nucl. Eng. Design. 2001. № 2(207). P. 231 240.
9. Vangi D. Stress evaluation by pulse-echo ultrasonic longitudinal wave / D. Vangi // Exp. Mech. 2001. №3(41). – P. 277 281.
10. Демченко М. О. Система неруйнівного контролю балочних елементів промислових споруд / М. О. Демченко, М. В. Філіппова, В. М. Безручко // Системи обробки інформації. 2015. - № 6. С. 39 42. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_6_12.
11. Xu C. Nondestructive Testing Residual Stress Using Ultrasonic Critical Refracted Longitudinal Wave / C. Xu, W. Song, Q. Pan, H. Li, S. Liu // Physics Procedia. – 2015. – Vol.70, P. 594-598. doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.030.

12. Yang Y. Broadband electrical impedance matching of sandwiched piezoelectric ultrasonic transducers for structural health monitoring of the rail in-service / Y. Yang, X. Wei, W. Yao, J. Lan // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2023. – Vol.364. doi: 10.1016/j.sna.2023.114819.
13. Deng L. Uniaxial stress identification of steel components based on one dimensional-CNN and ultrasonic method / L. Deng, S. Xu, W. Wang, C. Xiang // *Measurement*. – 2022. – Vol.194. doi: 10.1016/j.measurement.2022.110868.
14. DBN V.1.2-5:2007 *Naukovo-tehnichniyi suprovid budivelnnykh ob'ektiv*. – Vved. 01.01.2008. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2007. – 16 s.
15. Gaidaichuk V.V. Efficiency and problems for monitoring large-building structures / V.V. Gaidaichuk, K.E. Kotenko // *Опип матеріалів і теорія споруд*. 2016. № 97. С. 175 – 185.
16. Hassani S. A systematic review of data fusion techniques for optimized structural health monitoring / S. Hassani, U. Dackermann, M. Mousavi, J. Li // *Information Fusion*. – 2023. – Vol. 103, P. 102-136. doi: /10.1016/j.inffus.2023.102136
17. Isaiev O.P. Kompleksnyi monitorynh inzhenernykh sporud / O.P. Isaiev, Yu.F. Hulciaiev, P.O. Chulanov // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. – 2020. № 74. S. 162–171.
18. Mazheika O.I. Monitorynh tekhnichnoho stanu nesuchykh konstruksii budivel i sporu-dzhen / O.I.Mazheika // *Naukovi zapysky*. – 2010. №10. S. 222-228.
19. Davydenko O. P. Bezprovidna systema monitorynhu napruzhenodeformovanoho stanu budivel ta sporud / O. P. Davydenko, O. O. Bezus // *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI" : zb. na-uk. pr. Temat. vyp. : Avtomatyka ta prykladobuduvannia*. – Kharkiv : NTU "KhPI". – 2015. – № 29 (1138). – S. 8-12. URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/16789>.
20. Sazonova S. Condition Monitoring of the Unfinished Frame Building's Load-Bearing Structures in the Railway Zone / S. Sazonova, T. Zyazina, V. Zherdev 3, V. Goryunov, S. Korablin // *Transportation Research Procedia* / - 2023. – Vol.68, P. 271-280. doi: 10.1016/j.trpro.2023.02.037.