

ВИПРОБУВАННЯ МОСТІВ, ЩО ОТРИМАЛИ ПОШКОДЖЕННЯ В НАСЛІДОК
БОЙОВИХ ДІЙ

TESTING OF BRIDGES DAMAGED AS A RESULT OF COMBAT ACTIONS



Оксень Євген Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного проектування об'єктів транспортної інфраструктури, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: eioksen@gmail.com, тел.: +380506744778,

<https://orcid.org/0000-0003-1075-6840>.

Анотація: В роботі розглянуто застосування методів статичних і динамічних випробувань мостів, що отримали пошкодження в наслідок бойових дій. Пробиття снарядами і пошкодження вибухами конструктивних елементів окрім явних пошкоджень утворюють, ще серію скритих дефектів, визначення яких за нормами та нормативними документами регламентується здійснювати шляхом випробувань розрахунковими навантаженнями. Для випробувань мостів відповідно до вимог будівельних норм і нормативних документів використовувалося розроблене автором статті обладнання цифрової реєстрації і обробки сигналів акустичної емісії та механічних коливань. Наведені результати статичних випробувань трьох прогонового шляхопроводу зі збірною залізобетону довжиною 63,20 м по вул. Квітнева в м. Чернігів та чотирьох прогонового пішохідного мосту довжиною 263,1 м через р. Десна в парковій зоні м. Чернігів. Розглянуті особливості застосування методу акустичної емісії для визначення стану прогонових будов мосту під час статичних випробувань зі ступеневим навантаженням. Під час аналізу результатів динамічних випробувань пішохідного мосту приведені результати застосування вейвлет-аналізу для розкриття особливостей коливань нерозрізної сталевий трьох прогонової будови, що отримала імпульси динамічного навантаження та визначення власної частоти коливань прогонових будов. Результати роботи рекомендуються для застосування під час обстеження та випробування мостів, прогонової будови яких мають скриті дефекти і пошкодження, а також для проведення постійного моніторингу за спорудами.

Ключові слова: міст, скритий дефект, статичні випробування, динамічні випробування, обладнання, цифрове вимірювання, сигнал, коливання, акустична емісія, критерії руйнування, амплітудно-частотний аналіз, вейвлет-аналіз.

Вступ. Агресивна війна, яку розв'язала рф проти народу України призвела до нескінченних жертв серед громадян та значних руйнувань житлових будинків, промислових підприємств та об'єктів транспортної інфраструктури. Одними з головних цілей атак ворога стали залізничні, автодорожні та пішохідні мости. Відновлення пошкоджених мостів є життєвою необхідністю для країни як для забезпечення життєдіяльності населення, так і подальшого спротиву ворогу та нанесенні йому поразки. Вибухи та пробиття снарядами в конструктивних елементах мостів окрім явних пошкоджень утворюють, ще серію скритих дефектів, визначення яких за нормами та нормативними документами регламентується здійснювати шляхом випробувань розрахунковими навантаженнями [1÷5]. Тому тема, що присвячена випробування пошкоджених мостів, є актуальною для народного господарства України оскільки забезпечує обґрунтування рішень щодо подальшої експлуатації пошкоджених мостів, зокрема:

— підтвердження можливості подальшої безпечної експлуатації;

- обґрунтування необхідності відновлення мостів;
- планування невідкладних протиаварійних робіт,

в умовах значних пошкоджень конструкцій та наявності скритих руйнувань.

Матеріали та методи. Методологічною основою для визначення стану пошкоджених мостів є метод акустичної емісії при ступеневому статичному навантаженні [5] та метод динамічних випробувань автодорожніх мостів [3].

Метою роботи є — підвищення надійності оцінювання технічного стану мостів на підставі отримання кількісних показників деформування його конструктивних елементів під дією нормованих навантажень в умовах наявності в елементах конструкцій дефектів та пошкоджень, в тому числі і прихованих, що знижують несучу здатність і вплив яких на вантажопідйомність неможливо визначити розрахунками.

Виклад основного матеріалу. 1. Обладнання для випробувань мостів. Для випробувань мостів відповідно до вимог [3, 5] використовувалося розроблене автором статті обладнання цифрової реєстрації і обробки сигналів акустичної емісії (АЕ) та механічних коливань. В залежності від розрядності сигналів, що вимірюються, застосовуються 32 бітні з чотирма каналами індивідуального підсилення сигналів комплекти (рис. 1) на базі аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) ADA-1406 (виробник Холіт Дейта Системс, Україна) та 64 бітні восьми канальні комплекти (рис. 2) на базі АЦП USB-5817 (виробник Advantech, Китай) з високоточними зовнішніми перетворювачами сигналу ІЕРЕ виробництва Advantech ADAM-3017.



Рисунок 1 – Обладнання на базі АЦП ADA-1406

Figure 1 – Equipment based on the ADA-1406 ADC



Рисунок 2 – Обладнання на базі АЦП USB-5817

Figure 2 – Equipment based on USB-5817 ADC

a)



b)



c)



a) RH113; b) CT11000L; c) MPU6050

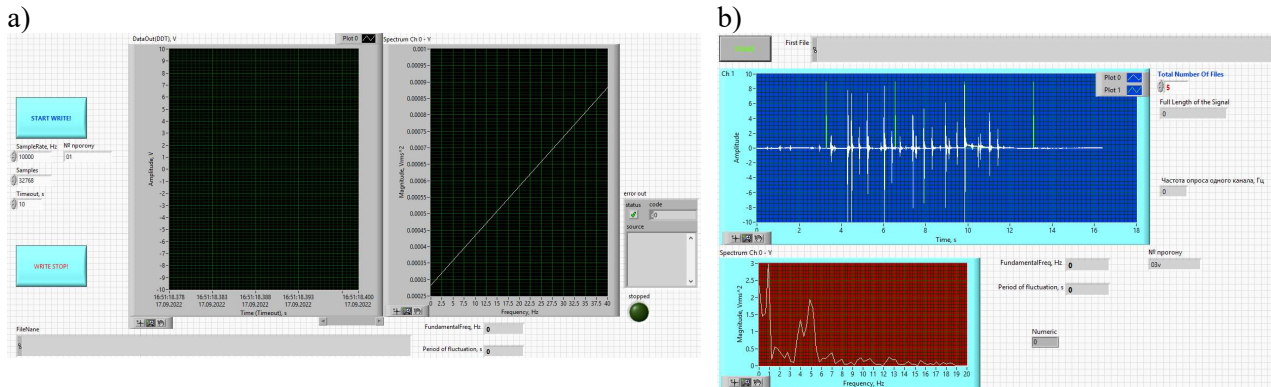
Рисунок 2 – Перетворювачі механічних коливань та сигналів акустичної емісії

a) RH113; b) CT11000L; c) MPU6050

Figure 2 – Sensors of mechanical vibrations and acoustic emission signals

Для вимірювання механічних коливань та сигналів акустичної емісії застосовані:

- широкосмуговий високочутливий п'єзоелектричний перетворювач IEPE RH113 виробництва Ronds (Китай) з діапазоном вимірювання 0.1 Гц ÷ 10 кГц;
- низькочастотний п'єзоелектричний перетворювач IEPE CT11000L виробництва Sensing Tech (Китай) з діапазоном вимірювання 0.2 ÷ 500 Гц;
- низькочастотний мікроелектронний механічний перетворювач MEMS 10DOF-MPU6050-MODULE виробництва ATNSINC (Китай) з діапазоном вимірювання 0.0 ÷ 250 Гц.



a) програма запису сигналів; б) програма експрес-аналізу результатів вимірювання
Рисунок 3 – Робочі вікна програм випробування

a) signal recording program; b) a program for express analysis of measurement results
Figure 3 – Working windows of test programs

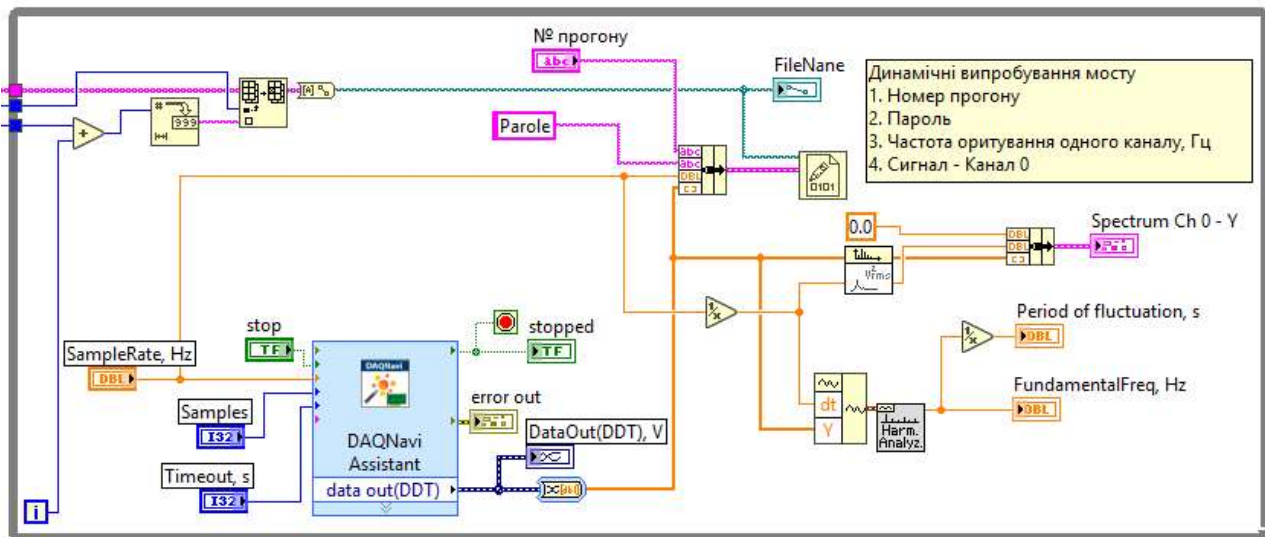


Рисунок 4 – Модуль опитування АЦП та запису у файл сигналу одного каналу

Figure 4 – A module for interrogating the ADC and recording the signal of one channel to a file

Програмне забезпечення для випробування розроблено в програмному середовищі LabVIEW (виробник США) і є уніфікованим для 32 та 64 бітних версій. Функціонально програмне забезпечення призначено для:

- тестування каналів вимірювання після встановлення і під'єднання перетворювачів;
- запису сигналів механічних коливань та сигналів акустичної емісії;
- моніторингу за станом конструктивних елементів мостів під час ступеневого навантаження;
- експрес-аналізу результатів вимірювання;
- аналізу стану конструктивних елементів мостів за результатами випробувань;
- віддаленого моніторингу за станом конструктивних елементів мостів з передачею протоколів спостереження користувачам через мережу Internet за протоколом MQTT.

Приклади робочих вікон програм запису сигналів та експрес-аналізу результатів вимірювання наведені на рис. 3. Для підвищення надійності збереження інформації запис результатів вимірювання здійснюється в послідовність коротких файлів в бінарному форматі. Розмір файлу запису встановлюється програмно відповідно до потреб. Так, при збереженні $2^{15} = 32768$ вимірювань в одному каналі з частотою записів 10 кГц в файлі фіксується приблизно 3,25 с коливального процесу, а його довжина при цьому складає 262 КБайт. Пакети файлів з результатами вимірювань для кожного з випробувань надалі заносяться в базу даних і зберігаються на окремих архівних накопичувачах. Оскільки ділянки сигналів, що містять самі імпульси вібраційних коливань, займають в загальному об'ємі записів лише деяку частину пошук, тому виділення та аналіз безпосередньо таких фрагментів сигналів здійснюються в спеціалізованій програмі обробки результатів вимірювань.

Фрагмент блок-діаграми програми запису сигналів в програмному середовищі LabVIEW, а саме модулю опитування АЦП та запису у файл сигналу одного каналу, наведено на рис. 4.

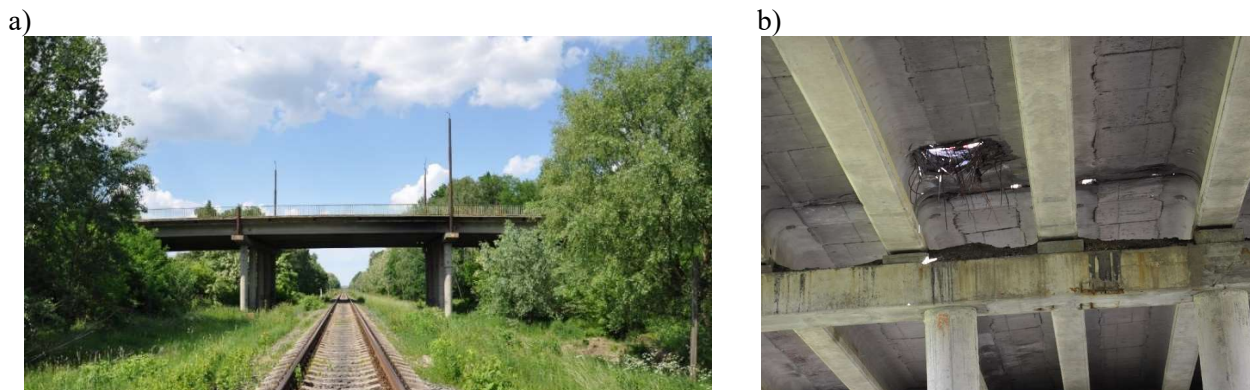
Застосовані при розробці програмного забезпечення модульні принципи є доволі гнучкими і дозволяють оперативно реагувати на зміни виробниками номенклатури комплектуючих, що сприяє подальшому удосконаленню обладнання.

2. Статичні випробування автодорожніх мостів. Статичні випробування проводять для визначення максимального допустимого навантаження на міст шляхом поступового ступеневого нарощування випробувального навантаження. Випробуванням передують розрахунки та моделювання схем статичних навантажень від транспортних засобів зі ступеневим нарощуванням силових впливів (згинальних моментів та поперечних сил) на елементи конструкцій з визначенням їх розрахункових деформацій, таких як прогини балок або ферм в центрі прогонів. Відповідність зареєстрованих прогинів основних несучих елементів прогонових будов розрахунковим, наприклад, в центрі прогонів, є першим критерієм працездатності мосту.

Одночасно з реалізацією ступеневого навантаження здійснюють акустико-емісійний контроль [5÷8] за інтенсивністю випромінювання акустичних сигналів від деформування та руйнування конструктивних елементів, які супроводжують розвиток тріщин в контрольованих бетонних, залізобетонних та металевих елементах конструкцій автодорожніх мостових споруд.

Під час ведення бойових дій в 2022 р. трьох прогоновий шляхопровід збірного залізобетону довжиною 63,20 м, побудований за схемою $3 \times 21,0$ м, з габаритом по ширині Г-17 по вул. Квітнева в м. Чернігів (рис. 5) отримав пошкодження, з яких визначальним для експлуатаційного стану став наскрізний пробій прогонової будови в прогоні П1–2 в місті розташування шва омоноличування балок Б6 та Б7 з руйнуванням полиць балок прогонової будови з площею пошкодження орієнтовно 8 м^2 (рис. 5).

Для вимірювання акустично-емісійної активності руйнівних процесів під час випробувальних навантажень на балки прогонів були встановлені перетворювачі акустичної емісії (рис. 6). Випробувальне навантаження нарощувалось в три етапи шляхом послідовного розташування в прогоні трьох завантажених автомобілів МАЗ 5516 загальною вагою 40 тс кожний (рис. 7).



а) загальний вид прогону П1-2; б) наскрізний пробій прогонової будови в прогоні П1-2
Рисунок 5 – Шляхопровід по вул. Квітнева в м. Чернігів

a) general view of P1-2 run; b) through failure of the span structure in span P1-2
Figure 5 – Highway along the street Kvitneva in Chernihiv

При проведенні випробувань шляхопроводу на кожному вимірювались як загальні прогини балок в центрі прогонів, так і сигнали акустичної емісії в балках прогонів. Вимірювання контрольованих параметрів при статичному завантаженні шляхопроводу виконувались після витримки випробувального навантаження в установлених схемах завантаження з безперервною фіксацією сигналів акустичної емісії. Час витримки складав від 20 до 25 хвилин. Нарощування випробувального навантаження здійснювалось по крокам, поступовим його збільшенням, шляхом викочування чергового завантаженого автомобіля.

Прогини прогонових будов вимірювались тахеометричною зйомкою тахеометром за прогинами поверхні мостового полотна в місцях розташування геодезичних марок. Геодезичні марки були нанесені повздовж центральних осей симетрії прогонових будов згідно з розміткою місць накочування навантаження, в місцях розташування проміжок між автомобілями-самоскидами МАЗ 5516 для забезпечення доступу до них при встановленні призми-відблискувача. Графічне представлення розподілу деформацій в процесу деформування прогонів під час випробувань наведено на діаграмах (рис. 8).



Рисунок 6 – Встановлення перетворювача акустичної емісії на балці за допомогою неодимового магніту

Figure 6 – Installation of the acoustic emission converter on beam using a neodymium magnet



Рисунок 7 – Розташування випробувального навантаження (три автомобілі МАЗ 5516)

Figure 7 – Test load location (three MAZ 5516 cars)

Типовий вигляд діаграм сигналів акустичної емісії, що зареєстровані під час витримки, наведено на рис. 9. Оцінювання стану прогонової будови здійснювалося за критерієм небезпеки розвитку процесу руйнування:

$$E = a \cdot P^b, \quad (1)$$

де $E_i = \sum_{k=0}^{N_i} |S_{AE_k} \cdot t_{SR}|$ — сумарне значення накопиченої енергії сигналів АЕ під час витримки під

навантаженням на ступенях навантаження;

S_{AE_k} — поточне значення сигналу АЕ в векторі даних вимірювань, м/с²;

t_{SR} — інтервал опитування, с;

N_i — довжина (потужність) вектору сигналу на i -тій ступені навантаження, включаючи

всі значення вектору сигналу АЕ від початку вимірювання.

В рівнянні (1) критеріальним параметром відповідно до методики [5] є показник ступеню b , який за умовами відсутності руйнувань в конструктивних елементах прогону (в балках) не повинен перевищувати $b < 3$.

Визначення складових a та b рівняння (1) для результатами вимірювань для відповідних схем навантаження прогонової будови на кожному i -тому кроці навантаження здійснювалось програмним комплексом численным методом шляхом ітераційного рішення системи рівнянь:

$$\begin{cases} E_{i-1} = a \cdot P_{i-1}^b \\ E_i = a \cdot P_i^b \end{cases}. \quad (2)$$

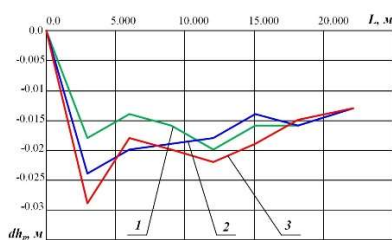


Рисунок 8 – Прогини для відповідних схем навантаження

Figure 8 – Deflections for the corresponding load patterns

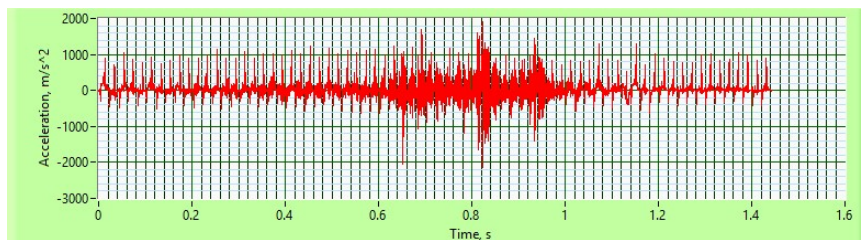


Рисунок 9 – Загальний вид групи імпульсів акустичної емісії

Figure 9 – A general view of a group of acoustic emission pulses

Чисельним аналізом експериментальних даних встановлені значення констант ступеневої залежності між приведеним згинальним моментом та значеннями накопичення енергії сигналів АЕ під час витримки на ступенях навантаження в 25-ти хвилинному часовому інтервалі витримки в балках. Максимальне абсолютне значення показника ступеню досягає для балок Б10 — 2.07 та для Б3 — 2.86. Встановлене абсолютне значення показника ступеня для схем навантаження прогону трьома вантажними автомобілями не перевищує граничне за рекомендаціями [5] значення критерію небезпеки розвитку процесу. Це дозволяє визнати, що дефекти, котрі розвиваються в структурі матеріалу, не є небезпечними. Шляхопровід по вул. Квітнева в м. Чернігів рекомендовано до проведення капітального ремонту шляхом омоноличування зруйнованої частини плити прогонової будови, а до виконання

ремонту може бути допущений до пропуску транспортних засобів на полосах руху незруйнованої частини з обмеженням швидкості.

3. Динамічні випробування автодорожніх мостів. Динамічні випробування є обов'язковою процедурою під час визначення технічного стану прогонових будов з розрахунковою довжиною прольоту 35 м і більше, а також для всіх мостів, які розташовані в районах із сейсмічністю 7 балів і більше та мають прогонові будови довжиною понад 18 м [1, 3].



Рисунок 10 – Загальний вид пішохідного мосту

Figure 10 – General view of the pedestrian bridge



Рисунок 11 – Руйнування снарядами балки мосту

Figure 11 – Destruction of a bridge beam by projectiles

Чотирьох прогоновий пішохідний міст (рис. 10) довжиною 263,1 м через р. Десна, що побудований за схемою «52.8+136.5+52.8 м нерозрізна металева + 21,0 м залізобетон», розташований в парковій зоні м. Чернігів на продовженні вулиці Нова правого берегу р. Десна з виходом на дорогу, що прокладена повздовж лівого берегу і в подальшому спрямована на перетин з автомобільною дорогою регіонального значення Р-67 «Чернігів — Ніжин — Прилуки — Пирятин». Внаслідок ведення бойових дій пішохідний міст в 2022 р. отримав пошкодження у вигляді пробиттів сталевого коробу балки снарядами та внутрішніх вибухів. Найбільші пошкодження отримала металева прогонова будова ПЗ-4 (рис. 11) біля опори ОПЗ.

За результатами обстеження пішохідного мосту були визначені перетини сталеві балки мосту (рис. 12), які отримали найбільші пошкодження та виконані розрахунки втрати вантажопідйомності. Відповідно до вимог [4] встановлено, що в прогоновій будові ПЗ-4 внаслідок пошкоджень, що отримані в наслідок бойових дій, є втрата вантажопідйомності за згинальним моментом, яка складає 27,0 %. Тому за зниженням вантажопідйомності прогонових будов пішохідному мосту через р. Десна в м. Чернігів призначено експлуатаційний Стан 4 — Обмежено працездатний.

Однак, оскільки прогонові будови металеві частини мосту мають довжину, більшу ніж 35 м, і мають схильність до виникнення резонансних явищ під час руху натовпу пішоходів та впливу вітру підвищеної швидкості, для визначення впливів руйнувань конструктивних елементів мосту на зміну жорсткості, і відповідно, частот власних коливань, були проведені динамічні випробування пішохідного мосту. Задача випробувань — експериментальне встановлення частот власних коливань металевих прогонів трьох прогонової нерозрізної частини пішохідного мосту модальним контролем (аналізом вільних коливань), яке включає визначення спектру частот власних коливань трьох прогонової статично невизначеної металеві нерозрізної одно коробчастої балки на чотирьох опорах (прогони П1-2, П2-3 та ПЗ-4) як суцільної конструкції з урахуванням внесків кожного з прогонів в загальні коливання. Визначення внеску окремих прогонів в загальні коливання прогонової будови оцінюється зіставленням спектрів коливань в кожному з вказаних прогонів при ініціюванні коливань імпульсним навантаженням.

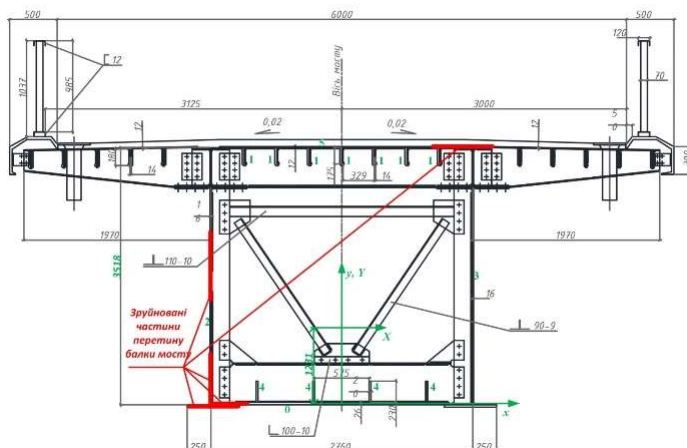
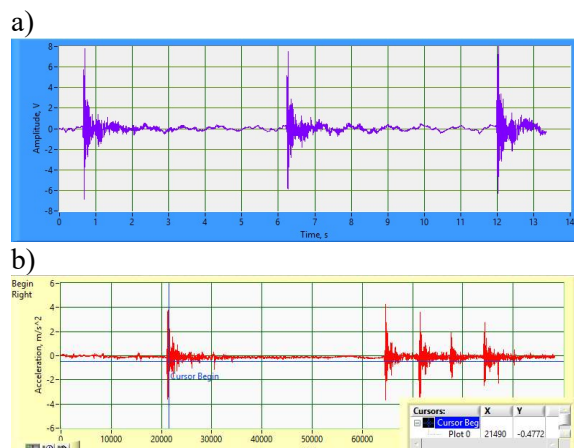


Рисунок 12 – Руйнування снарядами балки мосту

Figure 12 – Destruction of a bridge beam by projectiles



а) три послідовні імпульси навантаження;
б) визначення вікна аналізу

Рисунок 13 – Діаграма коливань прогону П2-3

а) three consecutive load pulses;
б) definition of the analysis window

Figure 13 – Diagram of oscillations of run P2-3

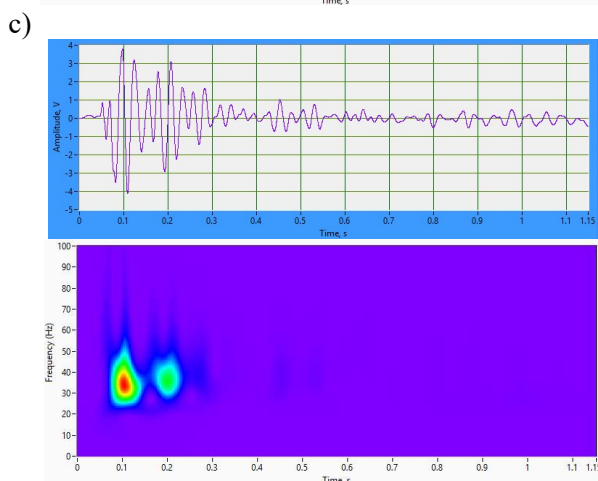
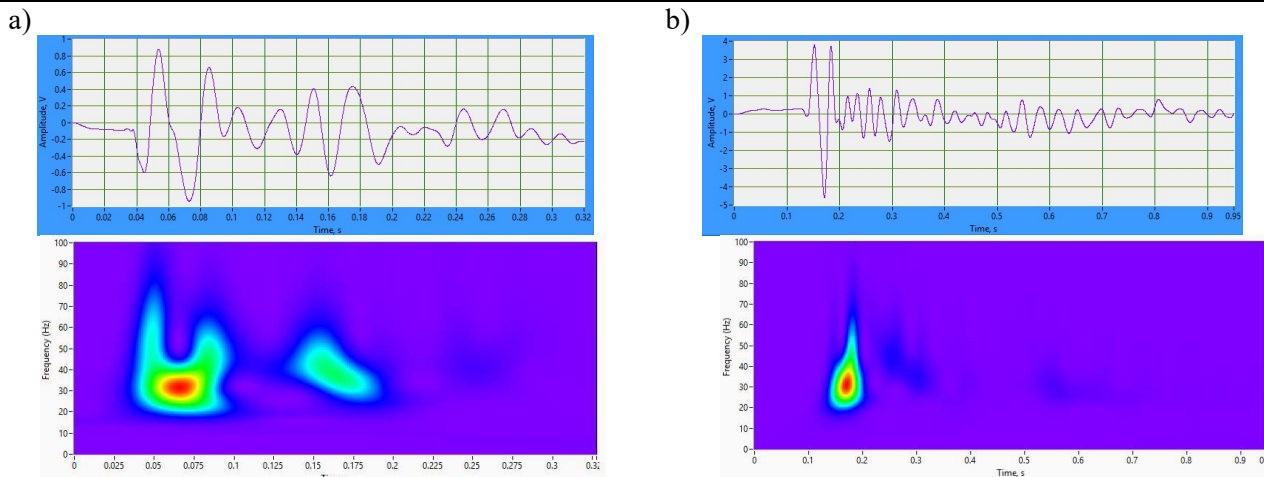
Методика динамічних випробувань пішохідного мосту через р. Десна в м. Чернігів складалася з послідовності наступних операцій вимірювання:

- визначення геодезичними вимірюваннями розташування центральних точок поверхні мостового полотна кожного з прогонів з похибкою 0,1 м;
- закріплення в центральній точці поверхні мостового полотна, що випробовується, відносно поверхні одновісного перетворювача прискорення (див. рис. 2с) з орієнтацією осі вимірювання з максимальним відхиленням від вертикальної осі 3° ;
- підготовка обладнання фіксації сигналів коливання поверхні мостового полотна прогону до запису;
- розташування відносно центральної точки поверхні мостового полотна прогону спеціальної групи з чотирьох пішоходів (фрагмент натовпу), що створює навантаження, близьке до проектних 400 кгс/м^2 ;
- вмикання обладнання фіксації сигналів коливання поверхні мостового полотна прогону для запису сигналів;
- ініціювання коливального імпульсу в прогоновій будові шляхом підстрибування з жорстким приземленням групи з чотирьох пішоходів;
- витримка часу для запису коливань в прогоновій будові до повного згасання.

Обробка результатів вимірювань з визначенням частот власних коливань прогонових будов для мосту здійснювалась в оригінальному програмному комплексі, який забезпечує експертне призначення положення і розміри вікна аналізу в просторі сигналу (рис. 13).

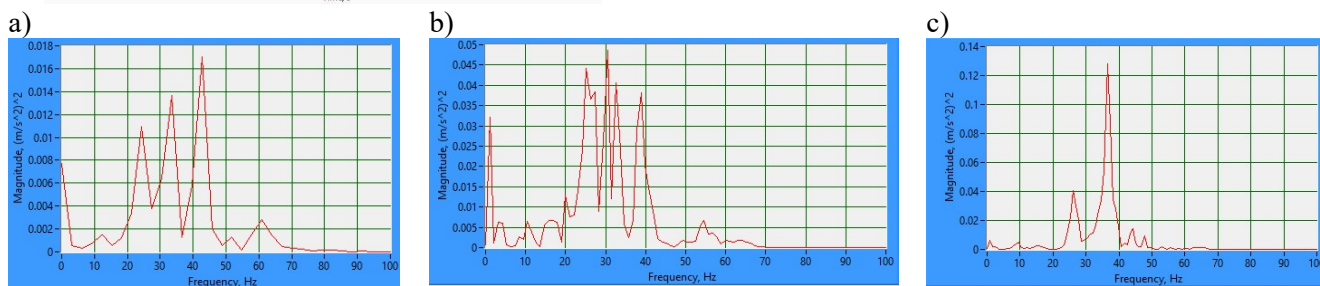
Таблиця 1 – Значення частот власних коливань прогонів пішохідного мосту
Table 1 – The value of frequencies of natural oscillations of spans of a pedestrian bridge

№ прогону	Частота власних коливань, Гц	Середньо квадратичне відхилення, Гц	Коефіцієнт варіації, %
1	2	3	4
1-2	42,21	0,868	2,056
2-3	30,07	0,370	1,389
3-4	36,66	0,267	0,643



a) коливання прогонової будови П1-2;
 b) коливання прогонової будови П2-3;
 c) коливання прогонової будови П3-4
Рисунок 14 – Вейвлет-аналіз фрагментів сигналів коливань мосту під дією імпульсів динамічних навантажень

a) oscillations of the span structure P1-2;
 b) oscillations of the span structure P2-3;
 c) oscillations of the span structure P3-4
Figure 14 – Wavelet analysis of bridge vibration signal fragments under the influence of dynamic load pulses



a) прогонова будова П1-2; b) прогонової будови П2-3; c) прогонової будови П3-4
Рисунок 15 – Амплітудно-частотна характеристика фрагменту сигналу власних коливань
 a) span structure P1-2; b) span structure P2-3; c) span structure P3-4
Figure 15 – Amplitude-frequency characteristics of a fragment of the natural oscillation signal

Оскільки ініціювання коливального процесу в прогонах здійснювалося ударним імпульсом, для визначення межі фаз «ініціація коливань — власні коливання» застосовувалось аналітичне безперервне вейвлет-перетворення (AWT) на основі складних вейвлетів Морле, яке надає інформацію про величину та фазу сигналів у шкалі часу. Ця перевага AWT дозволяє в просторі вікна сигналу побудувати його часову амплітудно-частотну характеристику і визначити початок фази «власних коливань». На рис. 14 наведені віконні фрагменти сигналів коливань прогонових будов мосту під дією ударного імпульсу і відповідні скейлограми сигналів (часові амплітудно-частотні характеристики). Одночасно для визначених ділянок сигналів з власними коливаннями прогонів швидким Фур'є перетворенням були побудовані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) (рис. 15) та визначені частоти власних коливань як максимальні значення діаграм АЧХ (табл. 1).

Порівняння частот коливання за виконаними випробуваннями, що встановленні при збудженні прогонової будови вертикальними поштовхами, з частотами вертикальних коливань, які отримані при проведенні випробувань в 1990 році, показало співпадіння їх значень з середнім відхиленням 4,1%. Найбільша розбіжність має місце для третьої моди коливань і складає 28,6%. Найменше значення частоти власних коливань, яке має прогонова будова, притаманне найбільш протяжному прогону П2-3 і складає $30,07 \pm 0,37$ Гц, що значно вище межі утворення резонансних явищ для пішохідних мостів. Пошкодження, які отримали конструктивні елементи мосту внаслідок військових дій, привели до суттєвих змін динамічних характеристик металеві прогонової будови. Так, для прогону з найбільшими руйнуваннями П3-4 в порівнянні з однотипним прогоном П1-2 зі значно меншими руйнування перша мода власних коливань має зниження на 15,1 %.

За результатами обстеження та динамічних випробувань встановлено, що по мосту дозволяється рух з пішоходів за умов огороження зруйнованих частин мостового полотна і перильної огорожі при обмеженні одночасного знаходження на мосту не більш 50 осіб та поодиноких технологічних транспортних засобів за вагою не більш 5 тс з обмеження в швидкості руху не більш 5 км/г. Для пішохідного мосту рекомендується виконати капітальний ремонт мосту з відновленням до проектних показників зруйнованих елементів конструкцій прогонових будов.

Висновки. 1. Для проведення статичних та динамічних випробувань мостів розроблено обладнання цифрової реєстрації і обробки сигналів акустичної емісії та механічних коливань з застосуванням 32 бітних та 64 бітних USB-модулів аналогово-цифрових перетворювачів. Обладнання пройшло апробацію про виконанні статичних випробувань трьох прогонового залізобетонного шляхопроводу вул. Квітнева в м. Чернігів та динамічних випробувань сталеві частини чотирьох прогонового пішохідного мосту через р. Десна в м. Чернігів, які отримали пошкодження в наслідок бойових дій і мали скриті дефекти.

2. Чисельним аналізом сигналів акустичної емісії, отриманими під час ступеневого навантаження прогонових будов випробувальним автомобільним транспортом встановлено, що дефекти, котрі розвиваються в структурі матеріалу, не є небезпечними для мосту. Шляхопровід по вул. Квітнева в м. Чернігів рекомендовано до проведення капітального ремонту шляхом омонолічування зруйнованої частини плити прогонової будови, а до виконання ремонту може бути допущений до пропуску транспортних засобів на полосах руху незруйнованої частини з обмеженням швидкості.

Аналітичним безперервним вейвлет-перетворення на основі складних вейвлетів Морле отримана інформацію про величину та фазу сигналів від випробувальних динамічних навантажень у шкалі часу. Для визначених ділянок сигналів з власними коливаннями прогонів швидким Фур'є перетворенням були побудовані амплітудно-частотні характеристики та визначені частоти власних коливань. За результатами динамічних випробувань дозволено рух з пішоходів за умов огороження зруйнованих частин мостового полотна і перильної огорожі при обмеженні одночасного знаходження на мосту не більш 50 осіб та поодиноких технологічних транспортних засобів за вагою не більш 5 тс.

3. Розроблене обладнання, програмне забезпечення та методологія проведення статичних і динамічних випробувань рекомендується для застосування при визначенні стану мостів, що отримали пошкодження в наслідок бойових дій або мають скриті дефекти.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження і випробування.
2. ДСТУ 9123:2021 Настанова з обстеження та випробування мостів і труб.
3. ДСТУ 8748:2017 Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів.
4. ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів.
5. МВВ 218-03450778-240-2004 Метод акустико-емісійного діагностування технічного стану мостів при статичних випробуваннях.
5. ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів.
6. Ramesh Singh Acoustic Emission Testing (AET) // «Applied Welding Engineering. Processes, Codes, and Standards», 2012, p. 307-319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391916-8.00028-5>
7. Zhanjun Wu, Kaustabh Kumar Ghosh, Xinlin Qing, Vistasp Karbhari Structural health monitoring of composite repair patches in bridge rehabilitation // Mechanical and Aerospace Systems At: San Diego. Volume: 6174, p. 178-201. <https://doi.org/10.1117/12.667177>
8. Markovic M., Krauberger N., Saje M., Planinc I., Bratina S. Non-linear analysis of pre-tensioned concrete planar beams // Engineering Structures, Volume 46, January 2013, Pages 279-293. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.004>

TESTING OF BRIDGES DAMAGED AS A RESULT OF COMBAT ACTIONS

Oksen Yevhen I., Doctor of Technical Sciences., Professor, Professor of the department of system design of transport infrastructure objects and geodesy, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: eioksen@gmail.com, tel. +380506744778, <https://orcid.org/0000-0003-1075-6840>.

Summary. The work examines the application of methods of static and dynamic testing of bridges damaged as a result of hostilities. Penetration by projectiles and damage by explosions of structural elements, in addition to obvious damage, also form a series of hidden defects, the determination of which according to norms and regulatory documents is regulated to be carried out by means of tests with calculated loads. For testing bridges in accordance with the requirements of construction standards and regulatory documents, the equipment developed by the author of the article was used for digital registration and processing of signals of acoustic emission and mechanical vibrations. The results of static tests of three span overpasses made of precast concrete with a length of 63.20 m along the street are presented. Kvitneva in the city of Chernihiv and a four-span pedestrian bridge with a length of 263.1 m across the Desna River in the park zone of the city of Chernihiv. The peculiarities of the application of the acoustic emission method for determining the state of the span structures of the bridge during static tests with step loading are considered. During the analysis of the results of the dynamic tests of the pedestrian bridge, the results of the application of wavelet analysis were translated to reveal the characteristics of the oscillations of a non-separable steel three-span structure that received dynamic load impulses and determine the natural frequency of oscillations of the span structures. The results of the work are recommended for use during the examination and testing of bridges, the girder structures of which have hidden defects and damage, as well as for constant monitoring of the structures.

Keywords: bridge, hidden defect, static tests, dynamic tests, equipment, digital measurement, signal, oscillation, acoustic emission, failure criteria, amplitude-frequency analysis, wavelet analysis.

References

1. DBN V.2.3-6:2009 Bridges and pipes. Examination and testing.
2. DSTU 9123:2021 Guidelines for examination and testing of bridges and pipes.
3. DSTU 8748:2017 Guidelines for conducting dynamic tests of road bridges.
4. DSTU 9181:2022 Guidelines for assessing and predicting the technical condition of highway bridges.
5. MVV 218-03450778-240-2004 Method of acoustic-emission diagnosis of the technical condition of bridges during static tests.
6. Ramesh Singh Acoustic Emission Testing (AET) // «Applied Welding Engineering. Processes, Codes, and Standards», 2012, p. 307-319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391916-8.00028-5>
7. Zhanjun Wu, Kaustabh Kumar Ghosh, Xinlin Qing, Vistasp Karbhari Structural health monitoring of composite repair patches in bridge rehabilitation // Mechanical and Aerospace Systems At: San Diego. Volume: 6174, p. 178-201. <https://doi.org/10.1117/12.667177>
8. Markovic M., Krauberger N., Saje M., Planinc I., Bratina S. Non-linear analysis of pre-tensioned concrete planar beams // Engineering Structures, Volume 46, January 2013, Pages 279-293. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.004>