https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.185

УДК 624.21

Редченко В. П.[1], *д-р. техн. наук, https://orcid.org/ 0000-0001-5938-1467*
Завгородній С. С.[2], *https://orcid.org/0000-0003-1928-4544*

[1] *ПРИВАТНЕ СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ ПІДПРИЄМСТВО МОСТ-СЕРВІС, м. Дніпро, Україна*
[2] *Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МОСТІВ ІМПУЛЬСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Анотація

Вступ. У статті розглядається практика застосування методу динамічного випробування мостів, а саме модального контролю з використанням імпульсного навантаження. Показано можливості даного методу для визначення технічного стану прогонової будови мосту шляхом визначення її натурних характеристик: фактичної жорсткості та параметрів власних форм коливань.

Проблематика. Стаття присвячена проблемі практичної реалізації новітніх теоретичних напрацювань у сфері діагностики технічного стану автодорожніх мостів шляхом проведення натурних динамічних випробувань.

Мета. Обґрунтування ефективності динамічного імпульсного випробування як методу для оцінки технічного стану мостів.

Матеріали та методи. Матеріалом для написання статті є результати натурних випробувань криволінійної естакади з монолітного залізобетону, розташованої біля Києва. Використано наступні методи дослідження: аналіз інформації, математичне моделювання, а також загальні методи теоретичних досліджень.

Результати. Натурні параметри прогонової будови естакади, які були отримані за результатами динамічних випробувань дозволили оцінити вплив наявних дефектів на її інтегральну жорсткість та визначити її технічний стан.

Висновки. На практиці підтверджено, що застосування імпульсного навантаження при проведенні модального контролювання дозволяє встановити технічний стан прогонової будови складної геометрії та статичної схеми.

***Ключові слова*:** власні форми коливань, динамічне випробування, жорсткість, міст, модальне контролювання, модальні параметри, прогонова будова, технічний стан.

Вступ

Процедура визначення технічного стану елементів мостів є важливим етапом у ході експлуатування споруди, адже від отриманої інформації буде залежати якість подальших прийнятих управлінських і проєктних рішень щодо призначення ремонтних заходів, рівень безпеки при експлуатуванні, безперебійність транспортного зв'язку та безаварійний строк експлуатації споруди. Найбільш розповсюдженою процедурою з визначення технічного стану елементів мостів є технічне обстеження, яке принципово полягає у проведенні заходів з виявлення наявних дефектів елементів споруди та визначення їх впливу на загальну роботу споруди. У певних випадках інформація отримана за результатами технічного обстеження є недостатньою для коректного призначення технічного стану споруди і в таких випадках виконавцями проводиться комплекс робіт з випробування елементів споруд.

Одним із видів випробування мостів є динамічне випробування прогонових будов в об'ємі модального контролю, яке виконується шляхом збудження та реєстрації вільних

коливань конструкції. Одним із варіантів збудження коливань є дія на конструкцію імпульсного навантаження. Теоретичні основи такого підходу обґрунтовані та викладені в ряді наукових робіт [1 – 4] і пізніше стали основою для ряду положень національного стандарту [6]. Практична сторона проведення випробувань з використанням імпульсного навантаження ще перебуває на стадії свого відпрацювання. Тут є ряд питань, які потребують перевірки практикою, а саме: як створити безпечну імпульсну дію на конструкцію, в яких точках прикладати імпульс, як далеко від точки прикладання навантаження є можливість реєструвати виражені коливання конструкції тощо. Планування та проведення ряду натурних робіт з випробування шляхом прикладання імпульсу і повинно дати відповіді на всі ці питання. У цій статті дається огляд натурних випробувань криволінійної естакади з монолітного залізобетону з використанням імпульсного навантаження.

Основна частина

Випробування моста – комплекс заходів націлених на отримання кількісних показників дійсної роботи як моста в цілому, так і окремих його частин і елементів під дією навантаження. Випробування є регламентованою науково-технічною процедурою системи експлуатації, метою якої є отримання параметрів напружено-деформованого стану споруди шляхом натурного навантаження тимчасовими пробними силами. У цілому процес проведення випробування моста можна представити, як послідовність наступних дій:

– проведення технічного обстеження споруди з метою визначення фактичних параметрів і наявних дефектів;

– формування розрахункової моделі споруди опираючись на актуальну інформацію отриману в ході технічного обстеження;

– складання програми випробувань;

– проведення випробувань із реєстрацією відгуків елементів споруди на прикладене навантаження;

– виконання порівняльного аналізу отриманих фактичних відгуків елементів споруди з очікуваними (розрахунковими) відгуками;

– формування висновків.

Чинною нормативною документацією України [5 – 7] наразі передбачається два узагальнених види випробування мостів – статичні та динамічні випробування, які принципово відрізняються у способі прикладання навантаження на споруду. У даній статті описується методологія та результати виконання випробування прогонової будови з використанням імпульсного навантаження, що згідно з ДСТУ 8748 [7] відноситься до модального контролювання і є одним із видів динамічного випробування мостів.

Модальне контролювання полягає в оцінюванні технічного стану прогонової будови шляхом її збудження прикладанням навантаження та дослідженням власних форм коливань конструкції (модальні параметри). Значення модальних параметрів та їх зміни залежать від структурних характеристик конструкції та їх змін, тому можуть використовуватися для оцінки та моніторингу технічного стану конструкцій. Збудження коливань при модальному контролюванні досягають шляхом прикладання та зняття навантаження. Це може бути рухоме навантаження (транспорт, пішоходи), імпульсне навантаження чи будь-яке інше динамічне навантаження.

Практичне застосування імпульсного динамічного випробування прогонової будови в об’ємі модального контролювання методом збудження коливань імпульсним навантаженням було виконано співробітниками ДП «ДерждорНДІ» спільно з фахівцями ПРИВАТНОГО СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПІДПРИЄМСТВА МОСТ-СЕРВІС у 2023 році на об’єкті незавершеного будівництва, а саме криволінійної естакади із монолітного залізобетону, яка розташована на одній із доріг загального користування державного значення біля міста Київ.

Будівництво даної споруди розпочалось ще у 2012 році та зупинилося на стадії спорудження монолітної плити прогонової будови. У 2020 році будівництво було поновлено. На момент проведення обстеження будівельні роботи не виконувались. Вид на споруду та її план-схема представлено на **рис. 1** та **рис. 2**.

Рисунок 1 – Фасад естакади

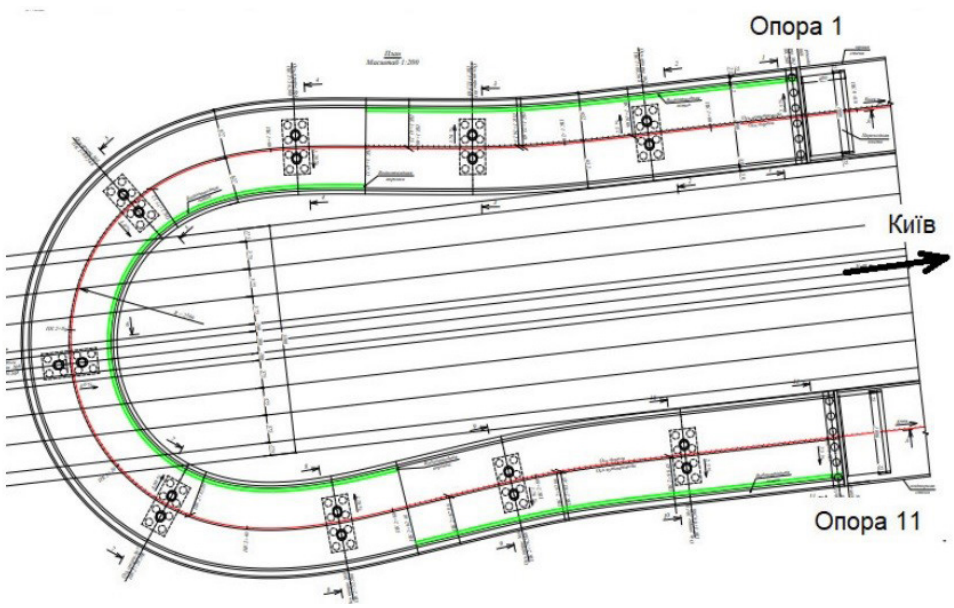

Рисунок 2 – План-схема естакади

Перед початком виконання робіт з коригування проєктної документації з продовження будівельних робіт необхідно було провести визначення поточного технічного стану елементів споруди. Дане завдання було виконано шляхом проведення технічного обстеження споруди та імпульсного випробування прогонової будови. Вибір імпульсного випробування був обумовлений ситуацією на об’єкті, яка не давала змоги провести більш розповсюджені статичні та динамічні випробування шляхом завантаження конструкції вантажівками або іншим вантажем через незавершені будівельні роботи на підходах та відсутності виїздів на споруду.

Досліджувана естакада має такі основні технічні параметри:
- довжина естакади – 235,0 м (повна довжина прогонової будови по осі споруди);
- габарит естакади – Г-10,90 + 1 × 0,75 м;
- геометрична схема естакади – 21,0 + 8 × 24,0 + 21,0 м (по осі споруди);
- прогонові будови – плита суцільного перерізу, проєкт індивідуальний;
- опора 1 та 11 – крайні масивні;
- опори 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – проміжні стовпчасті монолітні.

Прогонова будова нерозрізна плитна суцільного перерізу. Виконана вона із монолітного бетону, який після твердіння обтиснуто натягом пучків напруженого армування. Прогонова будова запроєктована під проєктне тимчасове навантаження – А-15, НК-100.

Імпульсне навантаження на практиці реалізовувалося скиданням мішка з піском вагою 100 кг з висоти 1,0 м на проїзну частину з використанням ручної лебідки (**рис. 3**). За попередніми розрахунками енергії падіння такої маси повинно бути достатньо для збудження вільних коливань потрібної початкової амплітуди. Використання мішка з піском визначалося необхідністю збереження цілісності ділянки конструкції, на яку падає вантаж. Також це забезпечує непружний удар і відсутність відскоку та повторного удару. Залишалися сумніви щодо того, яка частина енергії падіння маси буде передаватися конструкції. Попередніми експериментами було встановлено, що найкращим варіантом є набивка загального мішка окремими меншими торбинками з піском (10 шт.), які міцно стягуються лямками загального мішка. Як показала практика даного випробування, після 40 скидань вантажу в одній точці пошкоджень конструкції (навіть поверхневих) не зафіксовано. Енергії, яка передавалася конструкції було цілком достатньо для збудження вільних коливань, які реєструвалися по всій довжині естакади протягом 20 с, що цілком достатньо для їх коректного аналізування.

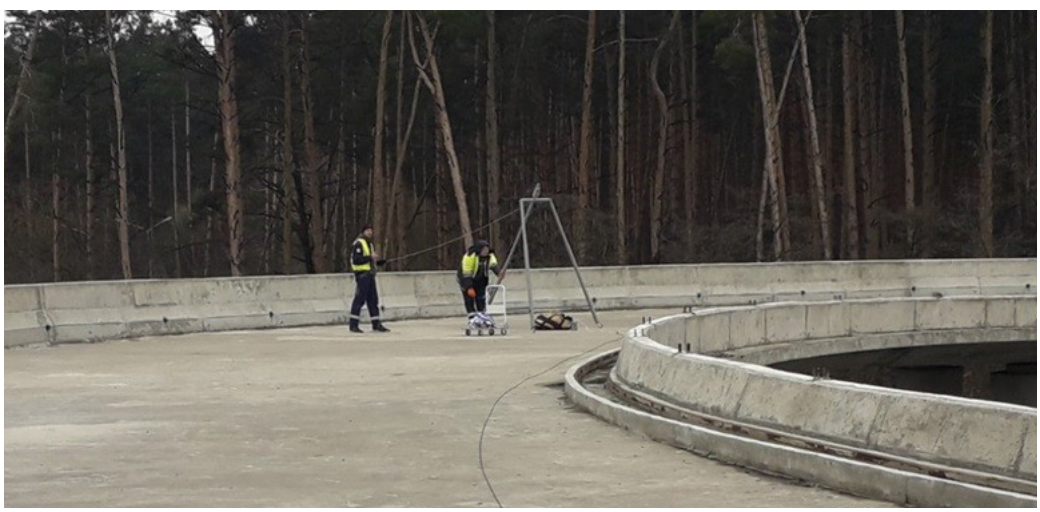

Рисунок 3 – Прикладання імпульсного навантаження шляхом скидання на проїзну частину мішка з піском в прогоні 5-6

Імпульсне навантаження прикладалося в прогоні 5-6. Реєстрація коливань прогонової будови (прискорення) виконувалася з використанням двох сейсмоприймачів ОСП-2МВ. Один з датчиків був реперним, а інший (робочий) переставляли в різні прогони (**рис. 4)**. Навантаження та реєстрацію коливань виконували по осі прогонової будови у середині прогонів. Загалом було реалізовано більше 30 експериментів.

Рисунок 4 – Сейсмоприймач ОСП-2МВ на проїзній частині у прогоні 6-7

Для виділення крутильних форм коливань навантаження прикладали в прогоні 5-6 біля зовнішнього бордюру, а робочий датчик встановлювали у середині прогону 5-6 біля внутрішнього бордюру.

Аналіз конструкції прогонової будови як динамічної системи виконували шляхом дослідження її розрахункової моделі та порівняння розрахункових і натурних даних. Розрахункова модель була побудована в програмному комплексі, який реалізує метод скінчених елементів. Розглядалося два варіанти розрахункової моделі: як криволінійної балки змодельованої стрижневими елементами та як плитної конструкції змодельованої плитними елементами. Стрижневу модель використовували для розрахунку зусиль від постійних і тимчасових навантажень у перерізах прогонової будови, плитну модель – для уточнення модальних характеристик прогонової будови як просторової системи. Загальний вид просторових моделей наведено на **рис. 5**.

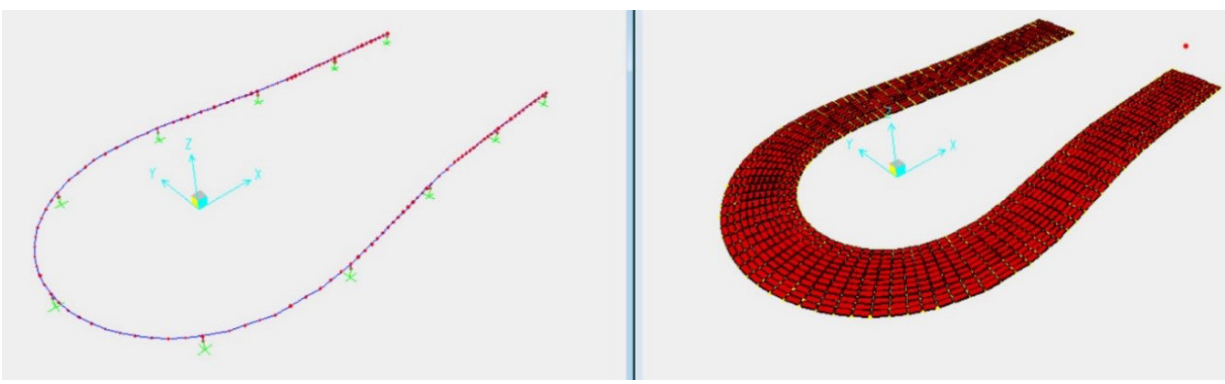

Рисунок 5 – Розрахункові моделі прогонової будови: із стрижневих елементів та з плитних елементів

Аналітичні дослідження були обмежені аналізом 3 перших власних форм у вертикальній площині та крутильних коливань. Вказані форми коливань представлені на **рис. 6**. Коливання у горизонтальній площині при випробуваннях не зареєстровані і тому не досліджувалися. Особливості геометрії та значень частот власних форм коливань визначаються конструктивними особливостями прогонової будови, як-то: криволінійність в плані, суцільний жорсткий плитний переріз, обпирання на пружні всебічно рухомі опорні частини на всіх опорах.

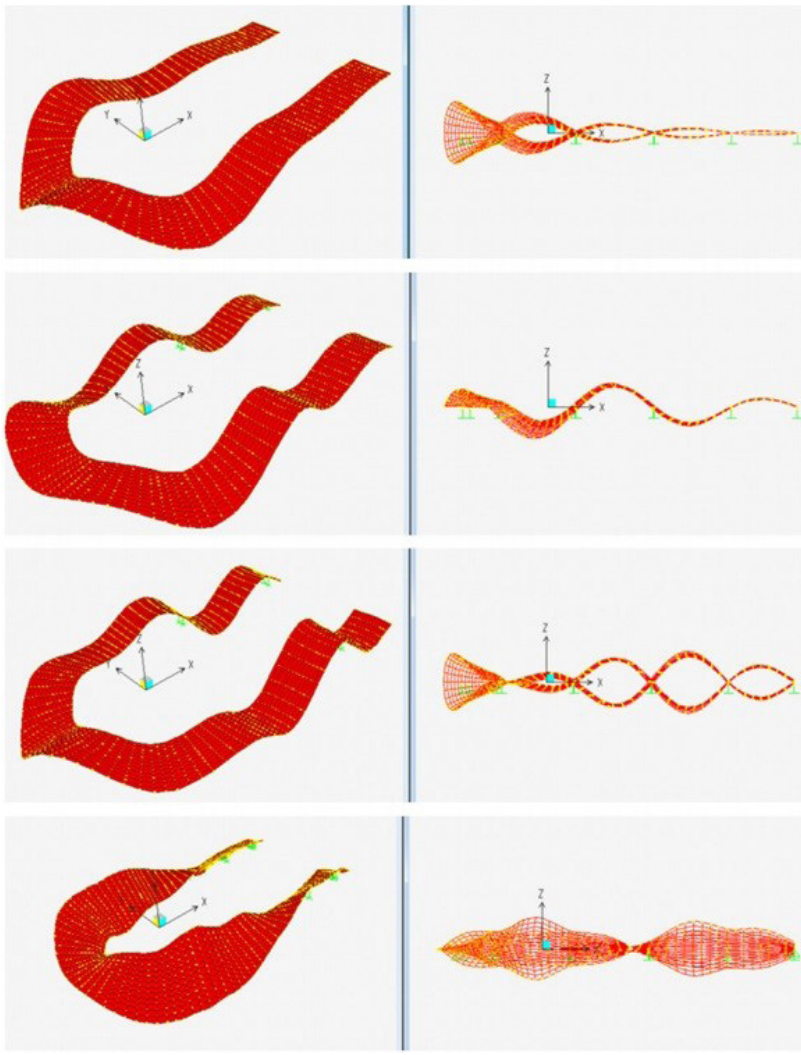

Рисунок 6 – Власні форми коливань, зверху вниз: 3 перші у вертикальній площині, перша крутильна

Нижчими власними формами коливань прогонової будови є коливання у горизонтальній площині. При збудженні вертикальним імпульсним навантаженням ці форми не виявлені. При визначенні напружень від постійних навантажень у стійці С1 опори 2 виявлені фонові поперечні коливання з частотою близько 1,6 Гц, які, очевидно, викликані коливанням прогонової будови у горизонтальній площині.

Коливання у вертикальній площині та крутильні коливання при збудженні вертикальним імпульсним навантаженням чітко виражені. Опрацювання зареєстрованих акселерограм виконували з використанням програмного комплексу «СпектрУМ» [4]. Для точного визначення значень частот власних форм коливань застосовані алгоритми складання спектрів та методу зміщення робочого вікна. Значення нормалізованих ординат власних форм коливань визначали за декількома експериментами для кожної точки прогонової будови.

Порівняння нормалізованих ординат власних форм коливань прогонової будови для розрахункової моделі та фактичних за результатами випробувань наведені у графічному вигляді на **рис. 7**. Наведені графіки натурних і розрахункових власних форм коливань досить подібні.

Найменші розбіжності має перша форма, при якій згинальні моменти над опорами мінімальні (сусідні прогони коливаються в протифазі). Для наступних форм коливань збільшується кількість надопорних ділянок прогонової будови, в яких діють згинальні моменти і розбіжності в графіках також збільшуються. Обстеженням були виявлені тріщини волосного розкриття по нижнім граням на приопорних ділянках. Саме ці тріщини є причиною нерівномірної жорсткості натурної прогонової будови – за її довжиною – над опорами вона дещо менша ніж у прогонах. За оцінками відхилення фактичних форм коливань від розрахункових для конструкції з рівномірною жорсткістю, зменшення жорсткості надопорних ділянок (зона тріщин) порівняно з ділянками в серединах прогонів є на рівні (15 – 20) %.

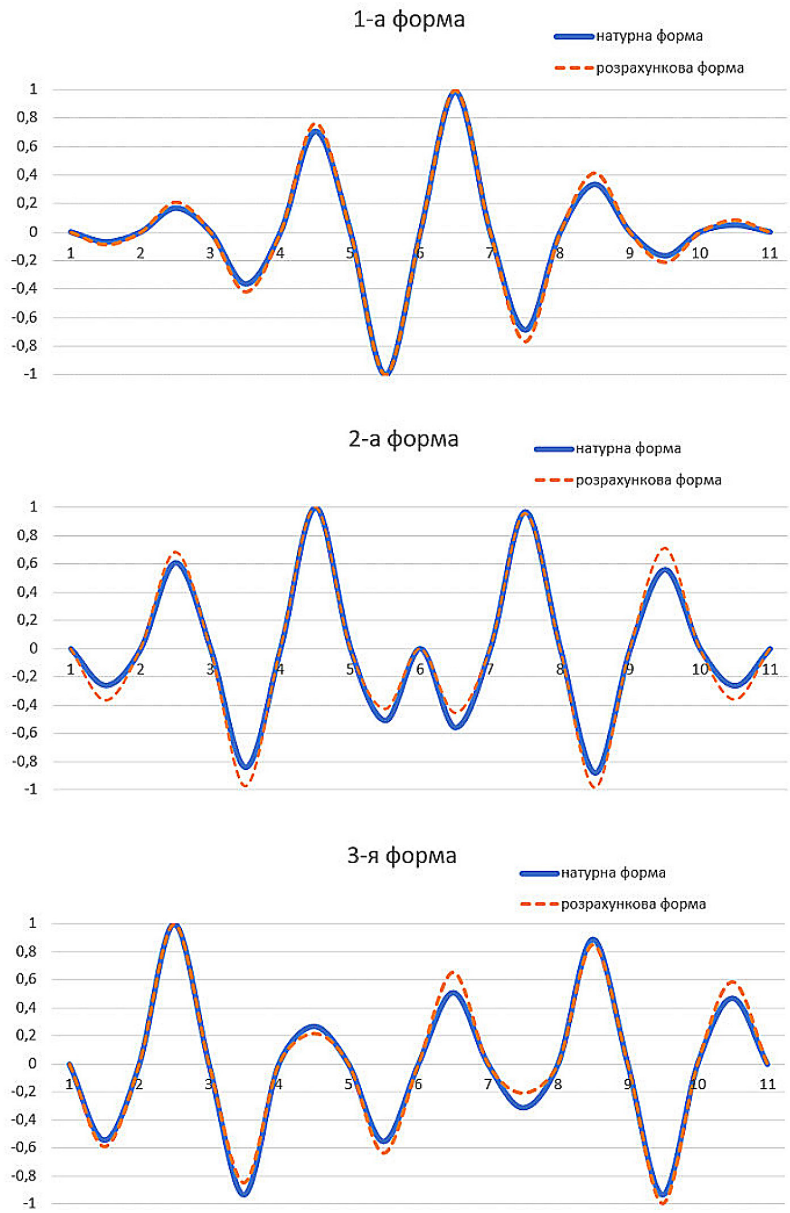

Рисунок 7 – Графічне представлення перших трьох власних форм коливань прогонової будови у вертикальній площині за їх нормалізованими ординатами: натурними та розрахунковими

Оцінку технічного стану прогонової будови виконували за двома критеріями: порівнянням фактичних і розрахункових модальних параметрів та порівнянням розрахункової і фактичної жорсткості перерізу прогонової будови.

Розрахункове значення жорсткості перерізу прогонової будови визначали за проєктними значеннями моменту інерції перерізу та фактичним модулем пружності бетону. За даними обстеження фактичний клас бетону В35, розрахункова жорсткість має значення:

– без врахування включення парапетної огорожі EIр = $1{,}60 \cdot 10^{13}$ кг·см^2;
– при включенні в роботу парапетної огорожі EIр = $1{,}98 \cdot 10^{13}$ кг·см^2.

Фактичне значення інтегральної жорсткості за результатами випробування визначали згідно з ДСТУ 8748 з використанням засобів Mathcad. Залежність між частотою власних коливань і відношенням інтегральних жорсткості та маси, визначали розрахунком балкової моделі прогонової будови. За виконаними розрахунками фактична інтегральна жорсткість прогонової будови має значення EIф = $1{,}935 \cdot 10^{13}$ кг·см^2. Якщо розрахунки виконати для моделі, у якої жорсткість надопорних перерізів балки менша на 20 % від жорсткості її перерізів у прогоні (як це є за порівнянням нормалізованих власних форм коливань), то фактична жорсткість перерізів у прогонах має значення EIф = $2{,}03 \cdot 10^{13}$ кг·см^2. Це значення перевищує розрахункове значення жорсткості перерізу з урахуванням включення в роботу парапетної огорожі, як це і повинно бути.

Таким чином, за результатами виконаного випробування визначено, що наявні тріщини впливають на жорсткість перерізу прогонової будови – зменшують її на рівні до 20 % порівняно з ділянками без тріщин. Жорсткість перерізу прогонової будови без тріщин перевищує розрахункову на 5 %. З урахуванням отриманих даних та інших результатів обстеження, технічний стан прогонової будови естакади оцінено як працездатний (3-й стан).

Висновки

Проведення динамічних випробувань естакади з використанням імпульсного навантаження показали наявні можливості та перспективи даного способу прикладання навантаження при виконанні модального контролювання. Отримані за результатами випробувань дані дозволили оцінити вплив наявних дефектів на жорсткість прогонової будови естакади та аргументовано визначити її технічний стан. Під час робіт було відпрацьовано технологію прикладання імпульсного навантаження та перевірено принципові підходи щодо реєстрації вільних коливань прогонової будови складної геометрії та нерозрізної статичної схеми.

Список літератури

1. Редченко В. П. Оцінка просторової роботи прогонової будови мосту шляхом аналізу її реакції на імпульсне навантаження. *Міжнар. наук.-практ. конф. «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»: тези доп*. Дніпропетровськ: 2007. С. 59–60.

2. Редченко В. П. Визначення розподілу зусиль між балками прогонової будови за результатами її випробування імпульсним навантаженням. *Зб. наук. пр. Українського наук.-дослідн. та проектного інституту сталевих конструкції імені В. М. Шимановського*. Київ. 2009. Вип. 3. С. 165–171.

3. Редченко В. П. Ідентифікація дефектів споруд методами динамічної діагностики. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Дн-ск: ПГАСА, 2010. Вып. 52. Ч. 2. С. 100–104.

4. Редченко В. П. Розвиток методів динамічних випробувань автодорожніх. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2010. № 664. С. 164–171.

5. ДБН В.2.3-6-2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження та випробування. Київ, 2009. 73 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ 9123:2021 Настанова з обстеження та випробування мостів і труб. Київ, 2022. 43 с. (Інформація та документація).

7. ДСТУ 8748:2017 Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 22 с. (Інформація та документація).

8. Посібник до ДСТУ 8748:2017 Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 227 с. (Інформація та документація).

References

1. Redchenko V. P. Otsinka prostorovoi roboty prohonovoi budovy mostu shliakhom analizu yii reaktsii na impulsne navantazhennia [Evaluation of the spatial operation of the span structure of the bridge by analyzing and reacting to the impulse load]. *Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka»: tezy dop.* Dnipropetrovsk, 2007. P. 59–60 [in Ukrainian].

2. Redchenko V. P. Vyznachennia rozpodilu zusyl mizh balkamy prohonovoi budovy za rezultatamy yii vyprobuvannia impulsnym navantazhenniam (Determination of the distribution of forces between the beams of the span structure based on the results of impulse load tests). *Zb. nauk. pr. Ukrainskoho nauk.-doslidn. ta proektnoho instytutu stalevykh konstruktsii imeni V. M. Shymanovskoho*. K.: Stal, 2009. Iss. 3. P. 165–171 [in Ukrainian].

3. Redchenko V. P. Identyfikatsiia defektiv sporud metodamy dynamichnoi diahnostyky [Identification of building defects by methods of dynamic diagnostics]. *Stroytelstvo, materyalovedenye, mashynostroenye. Dn-sk*, 2010. Iss. 52. Part 2. P. 100–104 [in Ukrainian].

4. Redchenko V. P. Rozvytok metodiv dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh [Development of dynamic road test methods]. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika».* Lviv, 2010. № 664. P. 164–171. [in Ukrainian].

5. DBN V.2.3-6:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia [State Building Norms (DBN V.2.3-6:2009) Transport facilities. Bridges and pipes. Inspection and testing]. Kyiv, 2009. 73 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. DSTU 9123:2021 Nastanova z obstezhennia ta vyprobuvannia mostiv i trub [State Standard of Ukraine (DSTU 9123:2021) Guidelines for the inspection and testing of bridges and pipes]. Kyiv, 2022. 43 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. DSTU 8748:2017 Nastanova shchodo provedennia dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 8748:2017) Guidelines for dynamic testing of road bridges]. Kyiv, 2018. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. Posibnyk do DSTU 8748:2017 Nastanova shchodo provedennia dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv. [State Standard of Ukraine (Manual to DSTU 8748:2017) Manual to DSTU 8748:2017 Guidelines for dynamic testing of road bridges]. Kyiv, 2018. 227 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Vasyl Redchenko[1], *D.Sc., https://orcid.org/ 0000-0001-5938-1467*
Serhii Zavhorodnii[2], *https://orcid.org/0000-0003-1928-4544*

[1] *MOST-SERVICE PRIVATE SPECIALIZED ENTERPRISE, Dnipro, Ukraine*
[2] *M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

DYNAMIC TESTING OF BRIDGES WITH IMPULSE LOADING

Abstract

Introduction. This article deals with the practice of applying the method of dynamic testing of bridges, namely, modal control using impulse loading. The possibilities of this method for determining the technical condition of a bridge span structure by determining its natural characteristics: actual stiffness and parameters of natural vibration forms are shown.

Problem Statement. The article is devoted to the problem of practical implementation of the latest theoretical developments in the field of diagnostics of the technical condition of road bridges by conducting full-scale dynamic tests.

Purpose. The main purpose of the article is to demonstrate the effectiveness of dynamic impulse testing as a method for assessing the technical condition of bridges. The method involves the excitation of vibrations of bridge structures by means of pulse loads, recording the response of the structure and analyzing the data obtained.

Materials and methods. The material for this article is the results of field tests of a curved overpass made of monolithic reinforced concrete located near Kyiv. The following research methods were used: information analysis, mathematical modeling, and general methods of theoretical research.

Results. The full-scale parameters of the overpass span structure obtained from the results of dynamic tests allowed us to assess the impact of existing defects on its integral stiffness and determine its technical condition.

Conclusions. In practice, it has been confirmed that the use of pulse loading allows obtaining good results in the modal control of a span structure of complex geometry and static scheme.

***Keywords*:** natural vibration forms, dynamic testing, stiffness, bridge, modal control, modal parameters, span structure, technical condition.