

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-297-311

ДОСВІД ПРОВЕДЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВИПРОБУВАНЬ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ
У РАМКАХ МОДАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

EXPERIENCE OF IMPULSE TESTING OF HIGHWAY BRIDGES WITHIN THE
FRAMEWORK OF MODAL CONTROL



Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>



Каськів Володимир Іванович, кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи, державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна, e-mail: vk@nidi.org.ua

<https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>



Редченко Василь Павлович, доктор технічних наук, директор ПСП «Мост-сервіс», м. Дніпро, Україна, e-mail: rvp50@meta.ua

<https://orcid.org/0000-0001-5938-1467>



Завгородній Сергій Сергійович, начальник Центру мостів та будівельних конструкцій, державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна, e-mail: serhiy.zavhorodnyy@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1928-4544>

Анотація: У статті представлено результати досліджень, спрямованих на оцінку технічного стану автодорожніх мостів методом імпульсних випробувань у рамках модального контролю. Розглянуто теоретичні засади та практичні аспекти застосування імпульсного навантаження, що створюється шляхом короткочасного динамічного впливу на прогону будову. Наведено приклад

натурних випробувань великої мостової споруди, під час яких збудження вільних коливань здійснювали скиданням вантажу на проїзну частину. Вимірювання коливальної реакції проводили за допомогою сейсмоприймачів, а оброблення сигналів виконували у програмному комплексі спектрального аналізу.

Отримані результати дозволили визначити власні частоти, декременти та ординати форм коливань, а також здійснити порівняння з розрахунковими моделями, побудованими методом скінченних елементів. Зафіксоване зниження власних частот порівняно з попередніми випробуваннями свідчить про зменшення інтегральної жорсткості прогонової будови. Відповідно до положень ДСТУ 9181:2022 «Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [1] технічний стан споруди попередньо був оцінений як 4 – «обмежено працездатний».

Результати підтверджують доцільність та актуальність використання імпульсних випробувань для оперативного отримання динамічних характеристик мостів, виявлення тенденцій зниження жорсткості та уточнення оцінки технічного стану конструкцій.

Ключові слова: автомобільна дорога, власні форми коливань, дефект, динамічне випробування, жорсткість, міст, модальне контролювання, параметр, прогонова будова, технічний стан.

Вступ. Мережа автомобільних доріг це одна із основних ланок критичної інфраструктури України, що забезпечує безперервність та мобільність транспортування, зокрема вантажів для оборонних і гуманітарних потреб. Мости, як невід’ємна складова автомобільних доріг, є тими елементами, аварійна ситуація на яких напряду впливає на пропускну здатність дороги або зупинку транспортного сполучення. Тому є досить актуальною і важливою задачею виявлення прихованих пошкоджень відповідальних елементів моста, зокрема прогонової будови, з метою запобігання аварій і прийняття рішень щодо ремонту, реконструкції споруди або введення певних тимчасових обмежень під час її експлуатації. Ці рішення, особливо в умовах обмеженого фінансування, повинні базуватись на ґрунтовних, інформативних і, у той же час відносно не складних і затратних, методах дослідження реальних умов роботи елементів моста.

Базовою процедурою оцінки технічного стану елементів моста є обстеження, орієнтоване на виявлення дефектів та їхній вплив на роботу споруди. Однак, у певних випадках, даних візуальних та інструментальних обстежень недостатньо для достовірного визначення технічного стану та залишкового ресурсу моста. У таких ситуаціях виправданим є залучення такого інструмента як динамічні випробування, які дозволяють провести аналіз реакції конструкції на експлуатаційне навантаження, дослідити власні частоти та форми коливань, оцінити жорсткість конструкції та виявити приховані пошкодження. Порівняно зі статичними випробуваннями, динамічні методи випробувань зазвичай потребують менших витрат часу та ресурсів при достатній інформативності результатів.

Динамічні випробування – випробування конструкції під дією сил, що спричиняють прискорений відносний рух її точок, тобто викликають коливальну реакцію елементів. У рамках динамічних випробувань використовують схожі, проте різні за змістом поняття «вібраційні випробування» та «вібраційна діагностика». Вібраційні випробування — кероване, регламентоване збудження об’єкта із подальшою реєстрацією відповіді. Вібраційна діагностика — встановлення технічного стану шляхом аналізу параметрів вібрації об’єкта діагностування. До другої групи належить модальний контроль, який базується на визначенні та аналізі модальних параметрів конструкції (власні частоти, форми коливань, демпфування) та використовується для моніторингу технічного стану,

оцінювання структурних параметрів (маса, жорсткість), виявлення та локалізації дефектів, а також для ідентифікації розрахункової моделі споруди як динамічної системи. Важливо коректно використовувати терміни «коливання» — родове поняття, що описує зміну в часі будь-якої величини та «вібрація» — лише рух фізичних тіл.

Серед підходів модального контролю перспективним є збудження вільних коливань імпульсним навантаженням. Принцип полягає у короткочасному енергетичному впливі на конструкцію з подальшою реєстрацією затухаючої відповіді, що дає змогу коректно виділяти власні частоти, декременти та за їх змінами оцінювати зміни жорсткості конструкцій. Теоретичні засади методу докладно висвітлені у наукових роботах [2–5] і лягли в основу положень національного стандарту [6], а також висвітлені у роботах авторів [7, 8]. Причому питанню використання вібраційних випробувань і вібраційної діагностики, і не тільки мостових споруд, приділено багато уваги і в зарубіжних виданнях, зокрема у [9] відмічено, що динамічне випробування існуючих мостів є досить перспективним рішенням для оцінки технічного стану споруди, оскільки воно є більш зручним, ніж статичні випробування, які вимагають організації вантажівок і перекриття руху через міст, у деяких випадках на тривалий час. Однак його ефективність залежить від техніки випробування, кількості, типу та розташування датчиків, а також від числової моделі, яка повинна дозволяти введення реальних граничних умов. Вібраційним дослідженням фундаментів мостів присвячена робота [10], а у [11] представлено результати вібраційних досліджень, проведених з метою оцінки стану конструкції 74 метрової цегляної дзвіниці. Масштабне експериментальне динамічне дослідження було виконане під час етапів будівництва моста з ізолюваною основою через річку Потенца в центральній Італії [12]. Крім динамічних були виконані також статичні випробування під час приймання моста в експлуатацію. Порівняння результатів випробувань з числовими розрахунковими значеннями допомогло оцінити узгодженість між проєктом і реальною конструкцією на різних етапах будівництва.

Проте, застосування методу динамічного випробування на реальних спорудах ще опрацьовується, оскільки необхідна інженерна регламентація, що стосується безпечного формування імпульсу, вибору місць прикладання та трас розташування датчиків, коректної математичної моделі тощо.

Виклад основного матеріалу. Імпульсний метод випробувань мостів полягає у збудженні вільних коливань прогонової будови за рахунок короткочасного енергетичного впливу. Такий вплив може бути реалізований різними способами, зокрема шляхом скидання на проїзну частину мосту вантажу відносно невеликої маси, використанням ударної установки типу копра або застосуванням маятникових і таранних пристроїв, що створюють горизонтальний імпульс. Порівняно зі статичними випробуваннями, де вплив має тривалий характер, імпульсна дія є короткочасною, але дозволяє отримати інформативну реакцію конструкції у вигляді затухаючих коливань. Саме ці коливання несуть ключову інформацію про динамічні властивості споруди.

Відповідно до ДСТУ 8748 [6] і МР В.2.3-37641918-944 [13] імпульсне навантаження вважається доцільним інструментом для модального контролю, оскільки воно забезпечує отримання власних частот, ординат форм коливань і дозволяє оцінити зміни жорсткості у часі. При цьому реальний імпульс не є миттєвим, оскільки сила, що передається конструкції, зростає до максимуму і поступово спадає до нуля. Ефект дії наближається до ідеального імпульсу лише тоді, коли тривалість передачі енергії є значно меншою за період коливань. У протилежному випадку ефективність збудження

знижується, а додаткові чинники, такі як відскок вантажу чи повторні удари, можуть зменшувати початкову амплітуду.

Для пояснення сутності методу доцільним є порівняння з відтяжкою тієї ж маси. Якщо маса m створює відтяжку під дією сили $P = mg$, то початкову амплітуду вільних коливань визначають як:

$$A_B = A_1 \cdot mg, \quad (1)$$

де A_1 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від характеристик споруди.

У випадку ж скидання цієї маси з висоти h імпульс дорівнює:

$$p = m\sqrt{2gh}, \quad (2)$$

а амплітуда коливань виражається рівнянням:

$$A_i = A_1 \cdot W \cdot m\sqrt{2gh}. \quad (3)$$

Відношення між цими амплітудами визначається співвідношенням:

$$\frac{A_i}{A_B} \approx 2,83F \cdot \sqrt{h},$$

де F – власна частота коливань конструкції (Гц), $W = 2 \pi F$;

h – висота падіння вантажу (м).

Розрахунки показують, що для споруди з першою власною частотою 5 Гц падіння маси з висоти 1 м викликає амплітуди коливань приблизно у десять разів більші, ніж від тієї ж маси у режимі відтяжки. Якщо за руху автомобіля масою 10 т динамічна добавка становить 10 %, то у прикладному вимірі це означає, що вантаж 100 кг здатен створити коливання, еквівалентні за амплітудою діям автомобіля масою близько 10 т. Таким чином, для організації ефективного випробування не обов'язково залучати важкий транспорт, що суттєво спрощує процес.

Акселерограми, отримані у практичних дослідженнях, підтверджують цю закономірність. Вільні коливання, збуджені скиданням вантажу, демонструють амплітуди, що перевищують реакцію від проїзду вантажівки подібної маси. Це вказує на високу ефективність імпульсного методу для збудження коливань прогонових будов мостів.

Імпульсні випробування є технічно нескладним у реалізації та економічно доцільним методом оцінювання динамічних характеристик мостових споруд. Вони забезпечують можливість своєчасного виявлення зниження жорсткості та локалізації дефектів, слугують засобом перевіряння розрахункових моделей і можуть застосовуватись як самостійно, так і в комплексі з іншими видами обстежень.

Для реалізації імпульсних випробувань було використане спеціальне обладнання, призначене для скидання на проїзну частину прогонової будови моста вантажу масою 100 кг. Конструкція та параметри вантажу підібрані з урахуванням вимог щодо збереження цілісності дорожнього покриття

та відсутності відскоку після падіння. Висота скидання обмежується до 1,0 м, що є достатнім для збудження вільних коливань більшості прогонових будов автодорожніх мостів без ризику пошкодження проїзної частини.

На рис. 1 наведено принципову схему установки з ручною лебідкою. Вона складається з рами, лебідки, троса, крюка з поворотною частиною та пускового тросика. Рама виконана у вигляді триноги, де одна нога подовжена і на ній змонтована лебідка. У розгорнутому положенні стійкість конструкції забезпечується трьома в'язями. Для зручності переміщення дві опори рами можуть оснащуватися колесами, як на натурному прикладі на рис. 2.

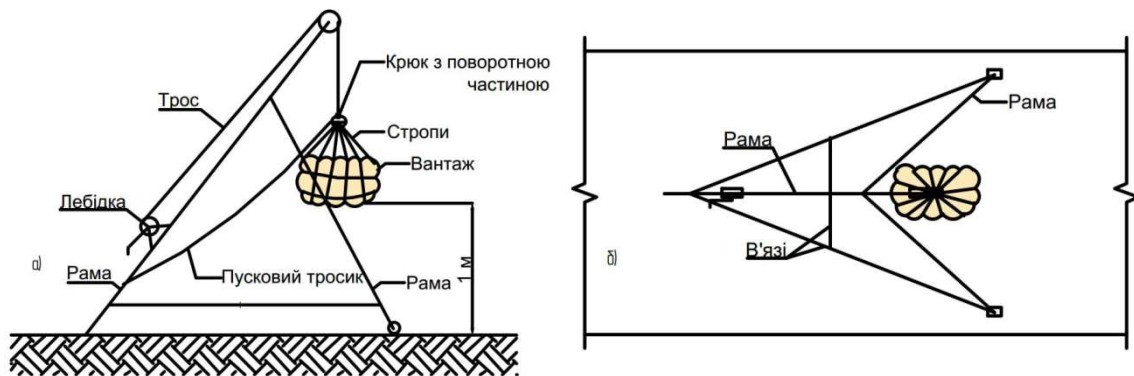


Рисунок 1 – Принципова схема устаткування для скидання вантажу: а) вид збоку, б) вид згори
Figure 1 – Principal scheme of the device for load dropping: a) side view, b) top view



Рисунок 2 – Лебідка для скидання вантажу
Figure 2 – Load-dropping device

Ручна лебідка обладнана стопорним механізмом, що дозволяє піднімати вантаж і фіксувати його на заданій висоті. Підвішування здійснюється через стропи, закріплені на поворотному крію.

При натягуванні пускового тросика крюк повертається та звільняє вантаж. Сам вантаж являє собою циліндричний мішок діаметром і висотою близько 0,6 м, виготовлений із міцної тканини. Конструкція підсилена капроновими смугами, що охоплюють корпус мішка і з'єднані сталевим кільцем для підвішування. Дно укріплене гумовою прокладкою товщиною не менше ніж 5 мм. Вантаж формується з десяти окремих мішечків з піском масою по 10 кг, які укладаються у загальний мішок і стягуються зав'язками.

Порядок виконання робіт:

- 1) вантаж встановлюють у точці прикладання навантаження;
- 2) над цією точкою монтують раму з лебідкою;
- 3) вантаж підвішують до крюка та піднімають на задану висоту;
- 4) скидання здійснюють натягом пускового тросика;
- 5) після падіння трос відпускають і процедура повторюється з пункту 3.

Наглядним прикладом успішного застосування імпульсного методу може слугувати проведено у 2023 році випробування одного з великих автодорожніх мостів у рамках планового обстеження (рис. 3). Прогонова будова цієї споруди виконана у вигляді нерозрізної коробчастої балки постійної висоти, зібраної зі збірних залізобетонних блоків, обтиснених пучками напруженої арматури. Конструктивна схема включає десять прогонів із розмірами $33 + 8 \times 42 + 33$ м.



Рисунок 3 – Фасад досліджуваної споруди
Figure 3 – Front view of the tested structure

Динамічні випробування здійснювали відповідно до ДСТУ 8748 [6]. Для збудження вільних коливань було використано імпульсне навантаження, яке створювали скиданням мішка з піском масою близько 100 кг на проїзну частину. Імпульс прикладали у центральній частині споруди за відсутності транспортного руху, що дозволяло отримати «чисту» реакцію конструкції без сторонніх впливів.

Вимірювання виконували за допомогою двох сейсмоприймачів ОСП-2МВ (рис. 4), один з яких був встановлений як реперний, а інший послідовно переміщували між різними прогонами. Аналогові сигнали підсилювали у 2 000 разів і синхронно реєстрували у пам'яті комп'ютера з частотою дискретизації 100 Гц. Контрольні точки для фіксації коливань розташовували у середині прогонів на відстані близько 1 м від краю проїзної частини. Під час роботи було проведено понад 30 окремих експериментів, що забезпечило необхідний обсяг даних для подальшого спектрального аналізу та визначення модальних параметрів.



Рисунок 4 – Сейсмоприймачі ОСП-2МВ на проїзній частині у прогонах 5-6 та 6-7
Figure 4 – Seismometers OSP-2MV placed on the roadway in spans 5–6 and 6–7

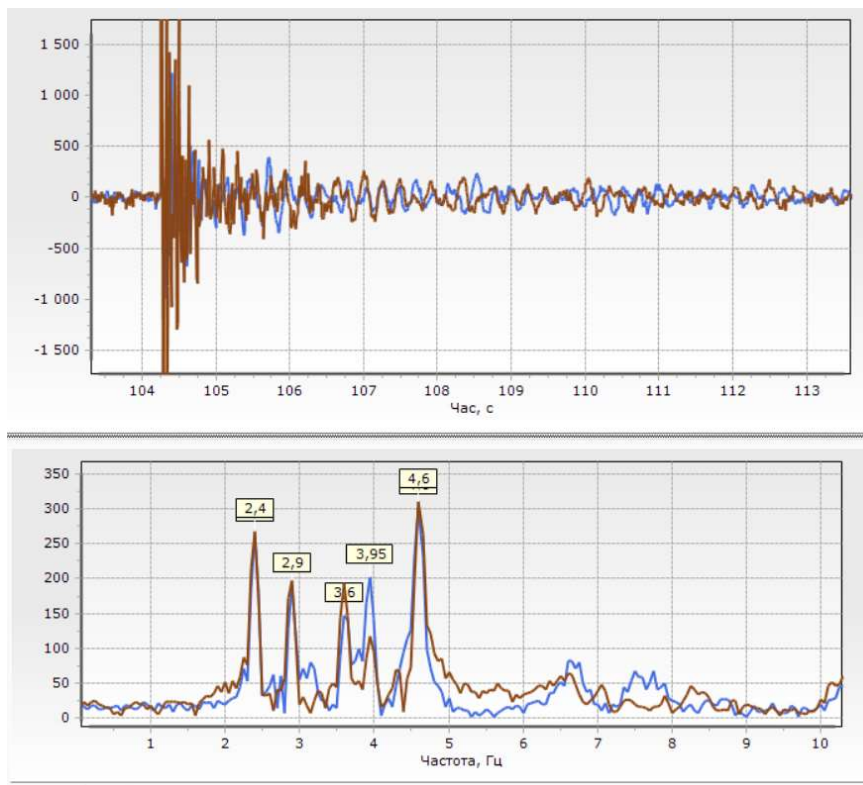


Рисунок 5 – Синхронні графіки вертикальних коливань прогонової будови у серединах прогонів 5-6 та 6-7 при імпульсному навантаженні в прогоні 4-5. Внизу графіки амплітудних спектрів
Figure 5 – Synchronous graphs of vertical vibrations of the span structure at the midpoints of spans 5–6 and 6–7 under impulse loading in span 4–5. Amplitude spectra are shown below

Зразок синхронно зареєстрованих акселерограм у двох суміжних прогонах наведено на рис. 5. У верхній частині графіків показані часові залежності прискорень, а в нижній – спектри амплітудного розкладу, що дозволили виділити найбільш виражені власні частоти конструкції.

Опрацювання даних було виконане у програмному комплексі «СпектрУМ». За результатами аналізу було визначено вісім перших власних форм коливань у вертикальній площині. Частоти знаходилися в діапазоні від 2,4 Гц до 4,6 Гц, а декременти коливань становили від 0,04 до 0,06 (табл. 1). Такі значення відповідають нормальним показникам для споруд даного типу та підтверджують чутливість методу імпульсного навантаження до визначення динамічних характеристик.

Таблиця 1 – Частоти та декременти власних форм коливань у вертикальній площині за результатами натурних випробувань

Table 1 – Frequencies and decrements of natural vibration modes in the vertical plane based on field test results

Номер власної форми	Частота, Гц	Декремент коливань
1	2,400	0,04
2	2,577	0,05
3	2,888	0,04
4	3,216	0,05
5	3,598	0,04
6	3,963	0,04
7	4,326	0,04
8	4,612	0,06

Подальший аналіз включав визначення нормалізованих ординат власних форм. Для цього використовували дані кількох експериментів у різних точках прогонової будови. Найбільш показовими виявилися 1-а, 3-я та 8-а форми, оскільки саме вони мали найбільш виражені амплітуди під час прикладання імпульсу в одному із центральних прогонів. Отримані значення узагальнені у табл. 2 і дозволяють оцінити розподіл нормалізованих ординат власних форм уздовж конструкції.

Аналіз прогонової будови як динамічної системи виконували шляхом зіставлення натурних результатів із розрахунковими даними. Із цією метою у програмному комплексі методу скінченних елементів були побудовані дві моделі, а саме стрижнева та плитна (рис. 6). Перша відтворювала конструкцію у вигляді балки з постійними параметрами маси та жорсткості по довжині й застосовувалася для визначення інтегральних характеристик. Друга — просторову роботу системи, змодельовану плитними елементами, що дозволило уточнити модальні параметри з урахуванням реальної геометрії.

Таблиця 2 – Нормалізовані ординати власних форм коливань за результатами натурних випробувань
Table 2 – Normalized ordinates of natural vibration modes based on field test results

Прогонова будова	Нормалізовані ординати		
	1-а форма	3-я форма	8-а форма
0-1	-0,2607	0,3816	-0,5303
1-2	0,7491	-1,3514	0,0732
2-3	-1,1037	0,9326	0,4845
3-4	1,2297	0,4747	0,9181
4-5	-1,1559	-1,4743	1,0596
5-6	1,0000	1,0000	1,0000
6-7	-1,1539	-1,3647	1,0171
7-8	0,5869	-1,3202	0,6453
8-9	-0,3646	1,2179	0,2029

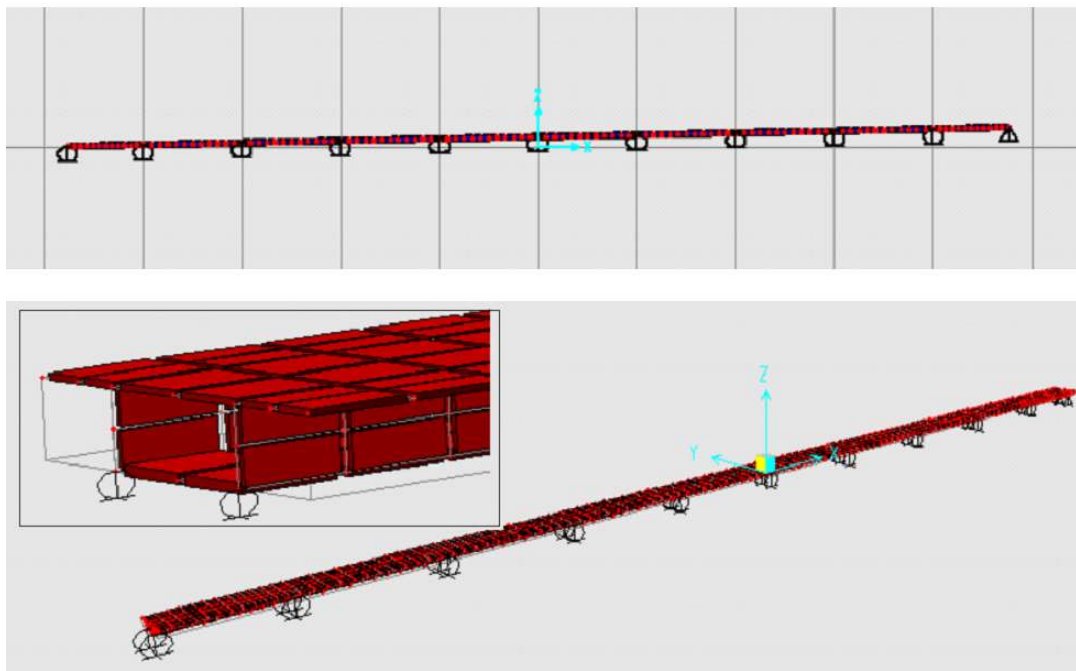


Рисунок 6 – Загальні зображення розрахункових моделей прогонової будови: із стрижневих елементів та з плитних елементів

Figure 6 – General views of the computational models of the span structure: frame-element model and plate-element model

Під час аналізування було розглянуто вісім перших власних форм у вертикальній площині, оскільки вищі форми практично не збуджувалися при прикладанні імпульсу в центральних прогонах. Порівняльні дані наведено у табл. 3. Встановлено, що частоти, отримані під час випробувань у 2003 та 2009 роках, залишалися практично незмінними, що свідчить про стабільний технічний стан у цей період. Натомість результати 2023 року зафіксували зниження власних частот у середньому на 3 %. При цьому відносне співвідношення між формами збереглися, що вказує на відсутність одиничного локального дефекту та підтверджує зміну характеристик конструкції на значній її протяжності.

Причинами такого зниження можуть бути або збільшення маси прогонової будови (наприклад, унаслідок заміни чи посилення дорожнього одягу), або зменшення жорсткості через утворення поширених дефектів. За результатами обстеження конструкція дорожнього одягу, а, отже, і маса прогонової будови не змінилася. Відповідно, найімовірнішим поясненням є поява регулярних тріщин у залізобетонних елементах під дією великовагового транспорту. Відповідно до критеріїв, визначених у ДСТУ 9181 [1], таке зниження власних частот дає підстави попередньо віднести технічний стан до категорії «обмежено працездатний». Остаточну оцінку потрібно уточнити за результатами детальних обстежень.

Таблиця 3 – Порівняння значень частот власних коливань за розрахунками та фактичних у різні роки випробувань

Table 3 – Comparison of natural vibration frequencies from calculations and field tests in different years

	№ форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Балкова модель	Частота, Гц	2,40	2,56	2,80	3,09	3,41	3,74	4,04	4,28
	Відносно 1-ї	1,00	1,07	1,17	1,29	1,42	1,56	1,68	1,78
Плитна модель	Частота, Гц	2,40	2,58	2,86	3,21	3,60	4,02	4,43	4,79
	Відносно 1-ї	1,00	1,08	1,19	1,34	1,50	1,67	1,85	1,99
Натурні 2003 рік	Частота, Гц	2,49	2,67	2,98	3,33	3,71	4,09	4,46	4,73
	Відносно 1-ї	1,00	1,07	1,20	1,34	1,49	1,64	1,79	1,90
Натурні 2009 рік	Частота, Гц	2,49	2,70		3,35	3,70	4,10		
	Відносно 1-ї	1,00	1,08		1,35	1,49	1,65		
Натурні 2023 рік	Частота, Гц	2,40	2,58	2,89	3,22	3,60	3,96	4,33	4,61
	Відносно 1-ї	1,00	1,07	1,20	1,34	1,50	1,65	1,80	1,92
Зменшення частоти, (2023 рік / 2003 рік)		0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98

Додаткову інформацію для оцінювання отримали із графіків нормалізованих ординат власних форм (рис. 7). Порівняння натурних і розрахункових даних засвідчило, що в лівобережній частині споруди інтегральна жорсткість нижча порівняно з правобережною. Різниця оцінюється у межах 10 % при рівномірному розподілі по довжині або до 20 % на окремих ділянках, де було виконане підсилення стінок коробчастих елементів.

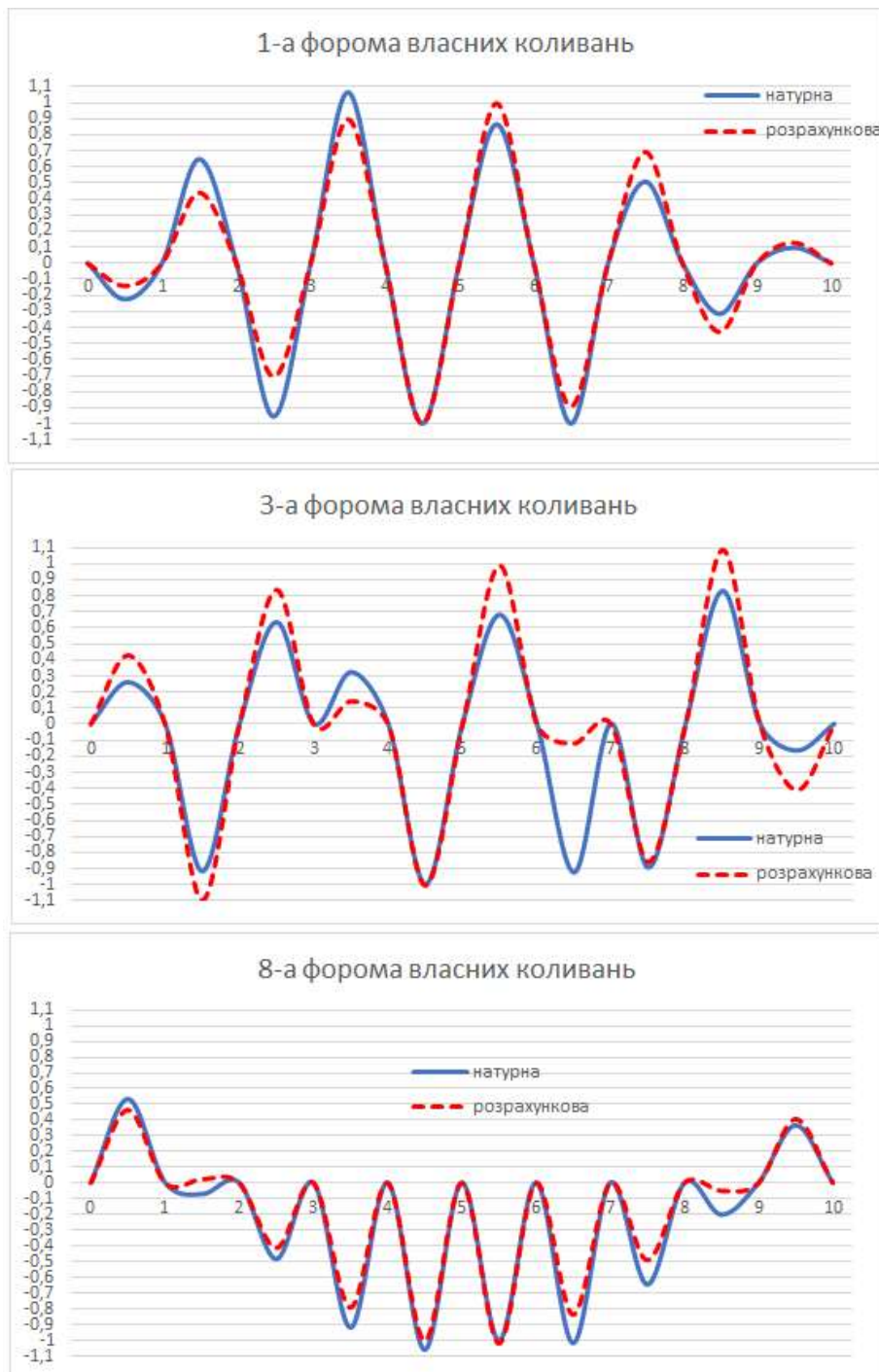


Рисунок 7 – Графічне представлення власних форм коливань прогонової будови у вертикальній площині за їх нормалізованими ординатами: натурними та розрахунковими

Figure 7 – Graphical representation of the span structure natural vibration modes in the vertical plane by their normalized ordinates: experimental and calculated

Фактичну інтегральну жорсткість перерізу прогонової будови визначали відповідно до ДСТУ 8748 [6] за визначеним випробуванням значенням власної частоти (перша форма у вертикальній площині) та фактичним значенням маси прогонової будови на час випробувань.

Розрахункове значення жорсткості перерізу прогонової будови визначали за розрахунковим значеннями моменту інерції перерізу та модулем пружності для бетону класу В35 ($3,52 \cdot 10^5$ кг/см²). Масу прогонової будови визначали за натурними обмірами та питомою вагою відповідних матеріалів: $m = 17\,050$ кг/м.

Розрахункова жорсткість повного перерізу, який включає збірний та монолітний залізобетон, має наступне значення:

$$EI_p = 3,47 \cdot 10^8 \times 3,52 \cdot 10^5 = 1,22 \cdot 10^{14} \text{ (кг}\cdot\text{см}^2\text{)}.$$

Розрахункова жорсткість перерізу, який включає лише збірний залізобетон:

$$EI_p = 2,79 \cdot 10^8 \times 3,52 \cdot 10^5 = 0,98 \cdot 10^{14} \text{ (кг}\cdot\text{см}^2\text{)}.$$

Фактичне значення інтегральної жорсткості за результатами випробування визначали згідно з ДСТУ 8748 [6] з використанням засобів Mathcad. Параметр «а», який встановлює пропорційну залежність між частотою власних коливань і відношенням інтегральних жорсткості та маси визначали розрахунком балкової моделі. Фактична інтегральна жорсткість прогонової будови мала значення $EI_f = 1,09 \cdot 10^{14}$ кг·см². Значення фактичної жорсткості прогонової будови менше від жорсткості перерізу при включенні в роботу ділянок монолітного бетону, але перевищує жорсткість її перерізу, який включає лише збірний залізобетон. Величина цього перевищення становить лише 10 %, що є менше за середні значення для прогонових будов даного типу.

Отримані результати свідчать про поступове зниження інтегральної жорсткості після 2009 року. Зменшення оцінюється приблизно у 10 % при рівномірному розподілі по довжині споруди та може досягати 20 % на окремих локальних ділянках. Згідно з критеріями ДСТУ 9181 [1], зафіксований стан класифікується як «обмежено працездатний» і вимагає уточнення шляхом проведення додаткового детального обстеження.

Подальші візуально-інструментальні дослідження під час обстеження підтвердили отримані результати, оскільки було виявлено руйнування контрольних маяків, встановлених на тріщинах у блоках прогонової будови, а також нові розкриті тріщини в інших елементах. Це свідчить про наявність розвитку дефектів, що впливають на зниження жорсткості та потребують врахування при оцінюванні залишкового ресурсу споруди.

Висновки. Проведені дослідження засвідчили, що імпульсний метод є ефективним інструментом модального контролю, який забезпечує отримання фактичних характеристик жорсткості прогонової будови моста без застосування складних випробувальних схем. Для розглянутого прикладу натурної споруди вимірювання показали стабільність частот протягом 2003 – 2009 років та їх зниження приблизно на 3 % станом на 2023 рік, що вказує на зменшення інтегральної жорсткості прогонової будови. Отримані результати дозволили визначити можливі ділянки прогонової будови з дефектами, що скоротило час на її обстеження. У сучасних умовах інтенсивної експлуатації мостів та зростання впливу великовагового транспорту застосування імпульсних випробувань є особливо актуальним, оскільки дозволяє оперативно оцінювати зміну жорсткості конструкції та виявляти її приховані дефекти.

Перелік посилань

1. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).
2. Редченко В. П. Розвиток методів динамічних випробувань мостів та алгоритмів спектрального аналізу для опрацювання їх результатів : д.т.н. : спец. 05.23.01. Дніпро, 2012.
3. Редченко В. П. Визначення розподілу зусиль між балками прогонової будови за результатами її випробування імпульсним навантаженням. *Збірник наукових праць Українського наук.-дослідн. та проектного інституту сталевих конструкції імені В. М. Шимановського*. 2009. Вип.3. С. 165–171.
4. Редченко В. П. Ідентифікація дефектів споруд методами динамічної діагностики. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2010. Вып.52. Ч.2. С. 100–104.
5. Редченко В. П. Розвиток методів динамічних випробувань автодорожніх мостів. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 664. С. 164–171.
6. ДСТУ 8748:2017. Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 22 с. (Інформація та документація).
7. Редченко В. П., Завгородній С. С. Динамічні випробування мостів. Загальний огляд методів. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 29. С. 293–306. DOI: 10.36100/dorogimosti2024.29.293
8. Редченко В. П., Завгородній С. С. Динамічні випробування мостів імпульсним навантаженням. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 28. С. 185–194. DOI: 10.36100/dorogimosti2023.28.185
9. De Angelis A., Esposito G., Maddaloni G., Cosenza E., Pecce M.-R. Ambient vibration test on an existing prestressed concrete bridge. *Eccomas Proceedia COMPDYN 2021*. 2021. P. 3720-3730. DOI: 10.7712/120121.8741.18728
10. Kien Ph. H. Application of impact vibration test method for bridge substructure. *Evaluation MATEC Web of Conferences*. 138, 02017 (2017). DOI: 10.1051/matecconf/201713802017
11. Gentile C., Saisi A. Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction and Building Materials*. 21 (2007). 1311–1321. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007
12. Fabrizio Gara F., Nicoletti V., Carbonari S., Ragni L., Dall'Asta A. Dynamic monitoring of bridges during static load tests: influence of the dynamics of trucks on the modal parameters of the bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2020. Volume 10. 197–217. DOI: 10.1007/s13349-019-00376-1
13. МР В.2.3-37641918-944:2024. Методичні рекомендації щодо модального контролювання автодорожніх мостів для визначення їхнього технічного стану. Київ, 2024. 54 с. (Інформація та документація).

**EXPERIENCE OF IMPULSE TESTING OF HIGHWAY BRIDGES WITHIN THE
FRAMEWORK OF MODAL CONTROL**

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Kaskiv Volodymyr I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Scientific Work, State Enterprise "National Institute for Infrastructure Development" (SE "NIRI"), Kyiv, Ukraine, e-mail: vk@nidi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>

Redchenko Vasyly P., Doctor of Technical Sciences, Director of PSP "Most-Service", Dnipro, Ukraine
e-mail: rvp50@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5938-1467>

Zavhorodniy Serhiy S., Head of the Center for Bridges and Building Structures, State Enterprise
"National Institute for Infrastructure Development" (SE "NIRI"), Kyiv, Ukraine, e-mail:
serhiy.zavhorodniy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1928-4544>

Summary. The article presents research results focused on evaluating the technical condition of road bridges using impulse testing as part of modal control. Theoretical principles and practical aspects of applying impulse loading are considered. Such loading is produced by a short-time dynamic impact on the span structure. An example of field testing of a large bridge is described, where free vibrations were excited by dropping a load onto the roadway. The vibration response was recorded with seismic sensors, and the signals were processed using a spectral analysis program.

The obtained results made it possible to identify natural frequencies, damping decrements, and mode shape ordinates. They were also compared with finite element models. A decrease in natural frequencies compared to previous tests was observed, which indicates a reduction of the integral stiffness of the span structure. According to DSTU 9181:2022 Guidelines for assessment and forecasting of the technical condition of road bridges, the technical state of the structure was preliminarily evaluated as level 4 – “limited serviceable.”

The findings confirm the relevance and usefulness of impulse testing for quickly obtaining dynamic characteristics of bridges, identifying stiffness reduction trends, and improving the assessment of the technical condition of structures.

Keywords: highway, natural vibration modes, defect, dynamic testing, stiffness, bridge, modal control, parameter, span structure, technical condition.

References

1. DSTU 9181:2022 Sporudy transportu. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 9181:2022) Transport buildings. Instructions for assessing and forecasting the technical condition of road bridges]. Kyiv. 2022. 121 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. Redchenko V. P. Development of methods for dynamic testing of bridges and spectral analysis algorithms for processing their results: Doctor of Technical Sciences: specialty 05.23.01. Dnipro, 2012. [in Ukrainian].
3. Redchenko V. P. Vyznachennia rozpodilu zusyl mizh balkamy prohonovoi budovy za rezultatamy yii vyprobuvannia impulsnym navantazhenniam. *Zbirnyk. naukovykh prats Ukrainskoho nauk.-doslidn. ta proektnoho instytutu stalevykh konstruksii imeni V. M. Shymanovskoho*. 2009. Vyp.3. P. 165–171. [in Ukrainian].
4. Redchenko V. P. Identyfikatsiia defektiv sporud metodamy dynamichnoi diahnostryky. *Stroytelstvo, materialovedenye, mashynostroenye*. 2010. Vyp. 52. Ch.2. P. 100–104. [in Ukrainian].
5. Redchenko V. P. Rozvytok metodiv dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. 2010. № 664. P. 164–171. [in Ukrainian].
6. 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].

7. Redchenko V., Zavhorodnii S. Dynamic testing of bridges. General overview of methods. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. 2024. Issue 29. P. 293–306. DOI: 10.36100/dorogimosti2024.29.293 [in Ukrainian].
8. Redchenko V., Zavhorodnii S. Dynamic testing of bridges with impulse loading. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. 2023. Iss. 28. P. 185–194. DOI: 10.36100/dorogimosti2023.28.185 [in Ukrainian].
9. De Angelis A., Esposito G., Maddaloni G., Cosenza E., Pecce M.-R. Ambient vibration test on an existing prestressed concrete bridge. *Eccomas Proceedia COMPDYN 2021*. 2021. P. 3720-3730. DOI: 10.7712/120121.8741.18728
10. Kien Ph. H. Application of impact vibration test method for bridge substructure. *Evaluation MATEC Web of Conferences*. 138, 02017 (2017). DOI: 10.1051/matecconf/201713802017
11. Gentile C., Saisi A. Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction and Building Materials*. 21 (2007). 1311–1321. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007
12. Fabrizio Gara F., Nicoletti V., Carbonari S., Ragni L., Dall'Asta A. Dynamic monitoring of bridges during static load tests: influence of the dynamics of trucks on the modal parameters of the bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2020. Volume 10. 197–217. DOI: 10.1007/s13349-019-00376-1
13. MP V.2.3-37641918-944:2024 Metodichni rekomendatsii shchodo modalnoho kontroliuvannia avtodorozhnikh mostiv dlia vyznachennia yikhnoho tekhnichnoho stanu [Methodical recommendations for modal control of road bridges to determine their technical condition]. Kyiv. 2024. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].