



Агентство  
Відновлення

14.05.2026

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ МОДАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ МОСТІВ

## МОЛОДЬ – ДРАЙВЕРИ ЗМІН У ВІДНОВЛЕННІ УКРАЇНИ

П'ЯТА ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ

Завгородній Сергій  
Центр мостів та будівельних конструкцій ДП «НІРІ»

# Необхідність лабораторної перевірки методу

**Лабораторні дослідження виконано як етап верифікації методу імпульсного випробування елементів прогонової будови мостів.**

## Що досліджується

У межах дослідження перевіряється можливість оцінювання технічного стану елементів прогонової будови за модальними параметрами. Основними показниками прийнято власні частоти, характер вільних затухаючих коливань і зміни цих параметрів у часі.

## Чому обрано імпульсне навантаження

Імпульсна дія короткочасно збуджує конструкцію, після чого реєструється її вільний відгук. Це створює передумови для контролю без тривалого статичного завантаження та з меншими організаційними обмеженнями.

**Ключове завдання лабораторного етапу – підтвердити, що імпульсне випробування забезпечує стабільне визначення модальних параметрів і може бути використане як основа для подальшого контролю елементів прогонових будов.**

## Навіщо потрібна лабораторна перевірка

Перед переходом до натурних мостових споруд метод необхідно перевірити в контрольованій системі. Це дає змогу відокремити вплив параметрів збудження, вимірювальних каналів і зміни стану балки від експлуатаційних завад.

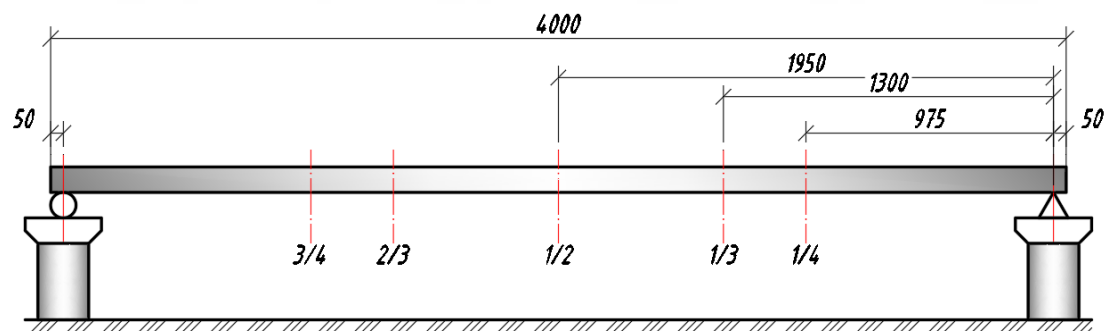
## Що має підтвердити експеримент

Стабільність визначення власної частоти, узгодженість тензOMETричних і акселерометричних даних, чутливість модальних параметрів до доданої маси та локального зниження жорсткості.



# Випробувальний стенд та вимірювальна схема

Випробувальний стенд відтворює роботу балки прогонової будови за вільно обпертою схемою, що дає змогу в контрольованих умовах зіставити статичні характеристики елемента з модальними параметрами, визначеними за результатами імпульсного збудження.



Об'єкт – сталевая балка довжиною 4,0 м, профіль 40×60×2 мм

Опирання – розрахунковий прогін 3,90 м, осі опор на 50 мм від торців

Маса – 12,048 кг, з датчиками та кабелями 12,716 кг

Контроль – перерізи 1/4, 1/2 та 3/4 прогону

Канали – тензорезистори, прогиноміри, акселерометри

Запис – дискретність 300 Гц, синхронне зчитування сигналів

**Призначення стенду** – отримати повторювані записи прогинів, деформацій і вільних затухаючих коливань за однакових умов опирання, розміщення датчиків та прикладання імпульсу.



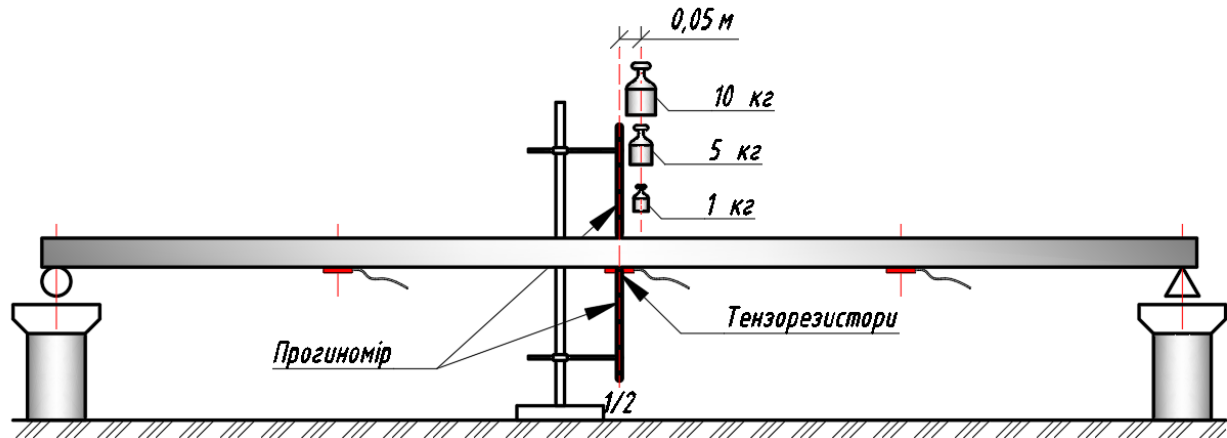
# Програма лабораторних дослідів

**Мета** – відпрацювання імпульсного збудження балки та перевірка чутливості модальних параметрів до зміни масово-жорсткісного стану.

**Умови** – дискретність 300 Гц; контрольні перерізи 1/4, 1/2 та 3/4 прогону.

| №  | Дослід                 | Що виконується                                                                           | Навіщо виконується                                                                      |
|----|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| A1 | Статичне випробування  | Вантажі 1, 5 і 10 кг; тензometri та прогиномири; повтори для кожного рівня навантаження. | Отримати базову фактичну згинальну жорсткість для зіставлення з динамічною оцінкою.     |
| A2 | Динамічне випробування | Удари в перерізах 1/4, 1/2 та 3/4 прогону; реєстрація тензометричними каналами.          | Перевірити стабільність виділення вільних коливань і першої власної частоти.            |
| A3 | Незалежна перевірка    | Однчасна робота тензометрів і трьох акселерометрів ВІБРАН у характерних перерізах.       | Підтвердити збіжність частот за двома вимірювальними системами різної фізичної природи. |
| A4 | Тип ударного тіла      | Мішечки 48 г різного виконання; однакова висота скидання в 1/3 прогону.                  | Оцінити вплив контактних властивостей ударного тіла на амплітуду відгуку.               |
| A5 | Маса і висота скидання | Варіювання маси ударного тіла та висоти скидання; імпульс у 1/3 прогону.                 | Визначити робочий діапазон імпульсного впливу та стійкість частотної оцінки.            |
| A6 | Раціональний режим     | Обраний варіант мішечка; скидання з різної висоти в 1/3 прогону.                         | Уточнити достатній рівень сигналу для подальших серій випробувань.                      |
| B1 | Додаткова маса 0,6 кг  | Поступове укладання пластиліну вздовж балки як умовного шару дорожнього одягу.           | Перевірити реакцію першої власної частоти на зміну масово-інерційного стану.            |
| B2 | Другий шар маси 0,6 кг | Повторне укладання пластиліну другим шаром із контролем модальних параметрів.            | Оцінити послідовність зміни частоти при збільшенні додаткової маси.                     |
| B3 | Локальне пошкодження   | Проріз верхнього поясу балки з подальшим контролем зміни модальних параметрів.           | Перевірити чутливість методу до локального зниження жорсткості елемента.                |

# Статичне завантаження



## Розрахункові параметри балки

$I_x = 9,49288 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$  – момент інерції поперечного перерізу відносно осі згину.

$E = 2,10 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  – модуль пружності сталі.

$EI \approx 1,9935 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$  – розрахункова згинальна жорсткість балки.

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

$P = mg$  – сила від прикладеного вантажу.

## Очікувані теоретичні прогини

$$w^{\text{розн}}(x) = \frac{P b x}{6LEI_x} (L^2 - b^2 - x^2).$$

$$m = 1 \text{ кг}, \quad P = 9,81 \text{ Н}, \quad w_{1/2}^{\text{розн}} = 0,6075 \text{ мм},$$

$$m = 5 \text{ кг}, \quad P = 49,05 \text{ Н}, \quad w_{1/2}^{\text{розн}} = 3,0377 \text{ мм},$$

$$m = 10 \text{ кг}, \quad P = 98,10 \text{ Н}, \quad w_{1/2}^{\text{розн}} = 6,0755 \text{ мм}.$$

## Очікувані теоретичні напруження

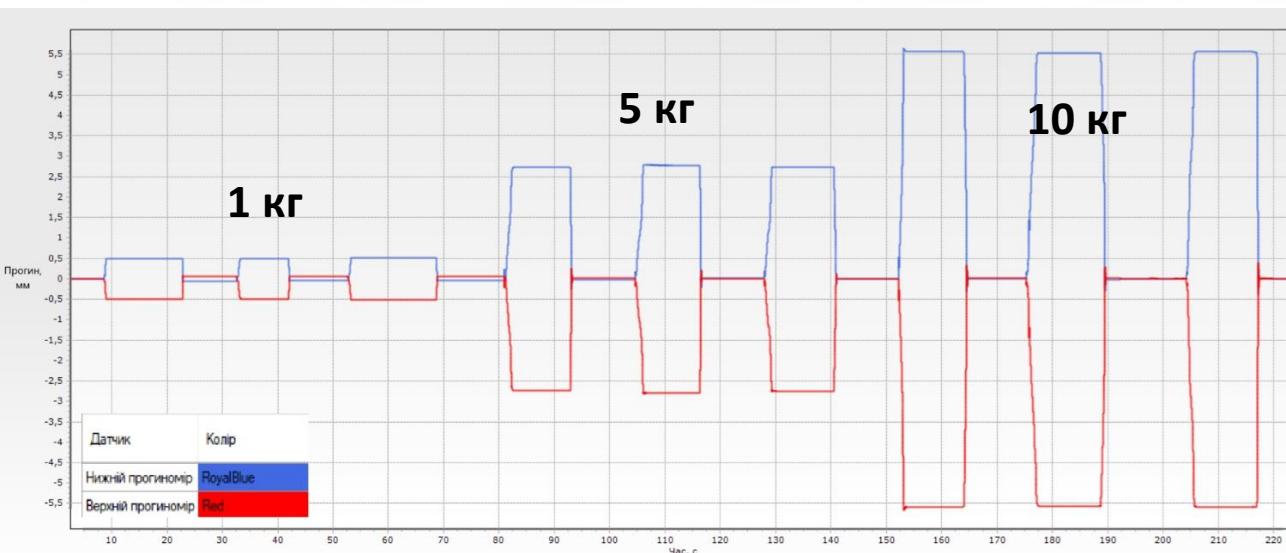
$$\sigma_{\text{th}}(x) = \frac{M(x) y}{I_x}.$$

$$M\left(\frac{L}{2}\right) = R_A \frac{L}{2} = \frac{P b}{L} \cdot \frac{L}{2} = \frac{P b}{2} = 0,95 P,$$

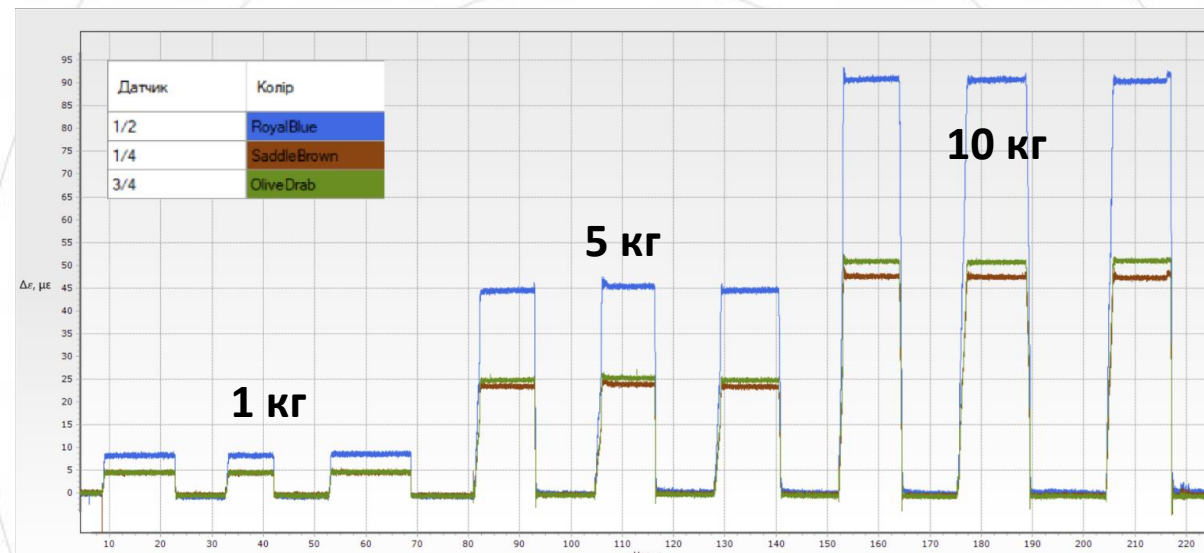
| Навантаження,<br>кг | P, Н  | $\sigma^{\text{розн}}(1/4)$ ,<br>МПа | $\sigma^{\text{розн}}(1/2)$ ,<br>МПа | $\sigma^{\text{розн}}(3/4)$ ,<br>МПа |
|---------------------|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1                   | 9,81  | 0,982                                | 1,963                                | 1,033                                |
| 5                   | 49,05 | 4,909                                | 9,817                                | 5,167                                |
| 10                  | 98,10 | 9,817                                | 19,635                               | 10,334                               |

# Статичне завантаження. Результати

Заміри прогинів при статичному завантаженні вантажами в 1 кг, 5 кг та 10 кг



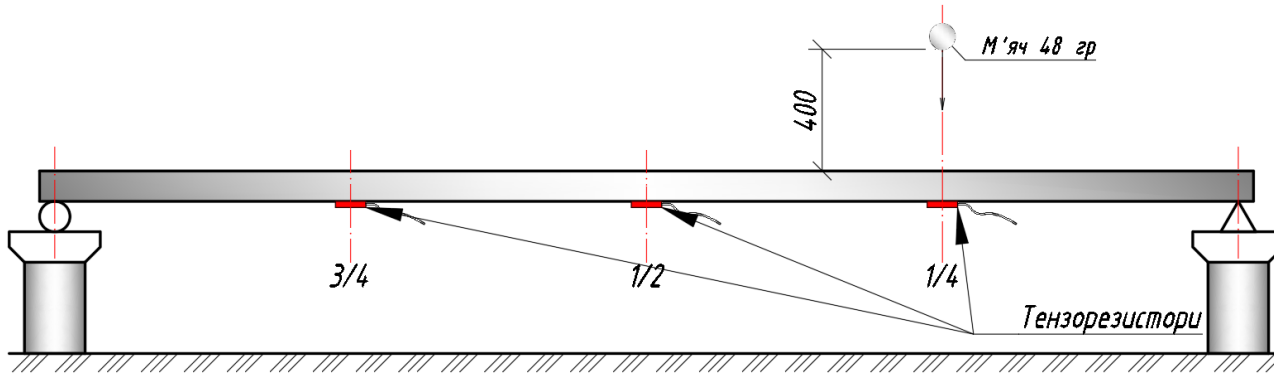
Заміри напружень при статичному завантаженні вантажами в 1 кг, 5 кг та 10 кг



| Рівень навантаження (m)                     | 1 кг | 5 кг  | 10 кг |
|---------------------------------------------|------|-------|-------|
| Зусилля (P), Н                              | 9,81 | 49,05 | 98,10 |
| Прогин ( $\omega_{1/2}^{\text{факт}}$ ), мм | 0,54 | 2,76  | 5,57  |
| $\Delta \epsilon_{1/4}$ , мє                | 4,90 | 25,42 | 51,32 |
| $\Delta \epsilon_{1/2}$ , мє                | 8,80 | 44,91 | 90,80 |
| $\Delta \epsilon_{3/4}$ , мє                | 4,70 | 23,77 | 47,85 |

За результатами статичного випробування визначено узагальнену фактичну згинальну жорсткість балки  $(EI)^{\text{факт}} = 22,04 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ , яка перевищує теоретичну оцінку  $(EI)^{\text{ПК}} = 19,94 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$  на 10,6%.

# Динамічне завантаження



## Очікувані теоретичні значення форм коливань

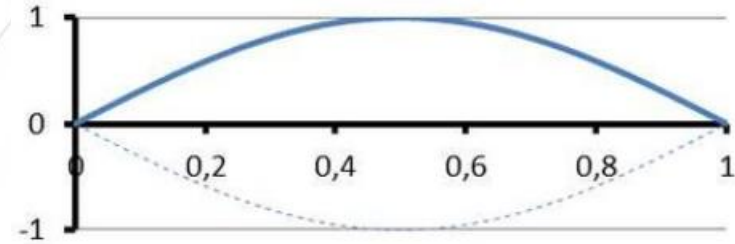
Для першої форми

$$\omega_1 = 50,74 \text{ рад/с}, \quad f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 8,08 \text{ Гц.}$$

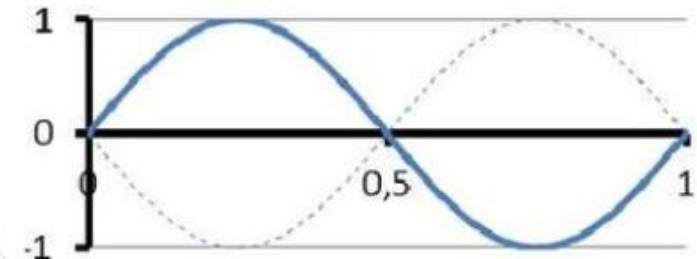
Для другої форми з урахуванням залежності  $\omega_n = n^2 \omega_1$  отримують

$$f_2 = 4f_1 = 32,30 \text{ Гц.}$$

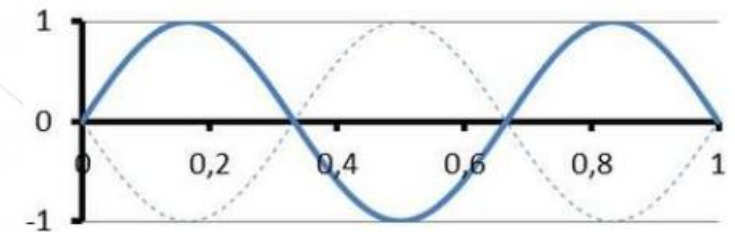
Перша форма



Друга форма

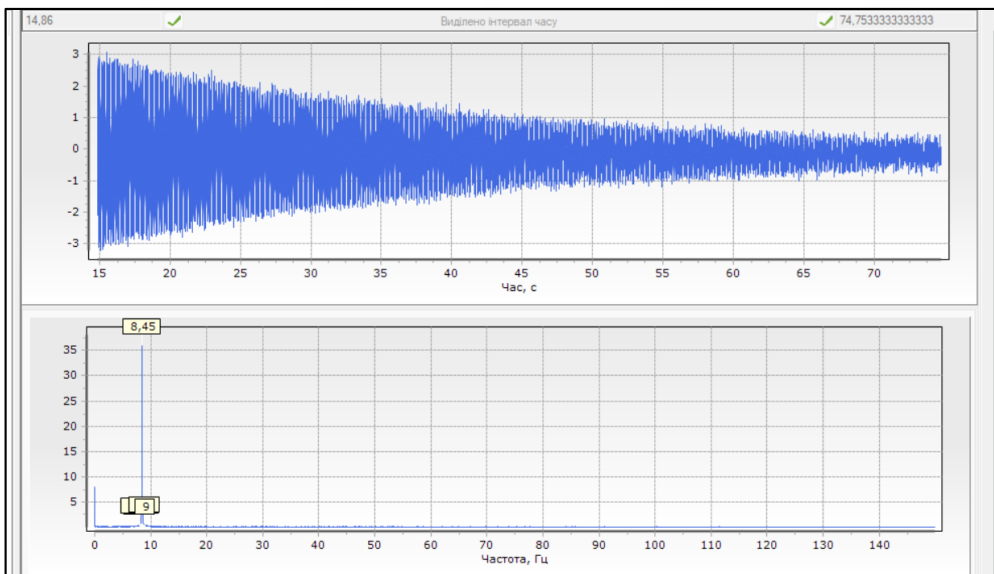
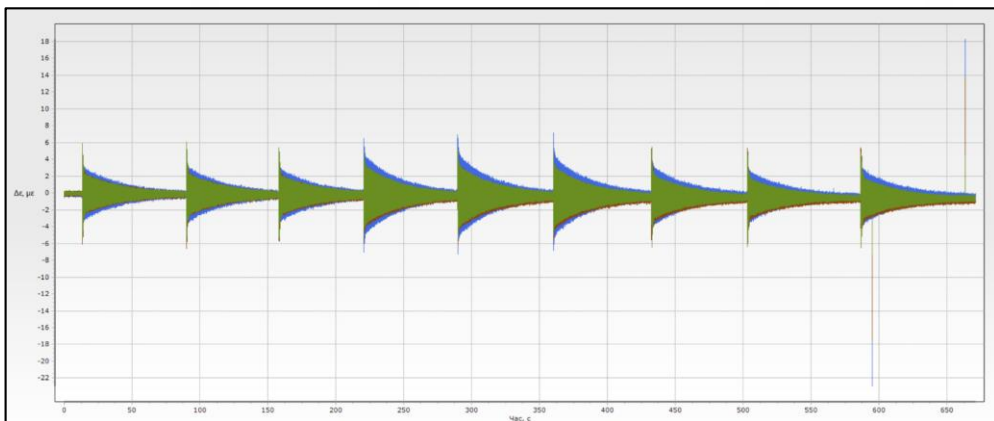


Третя форма

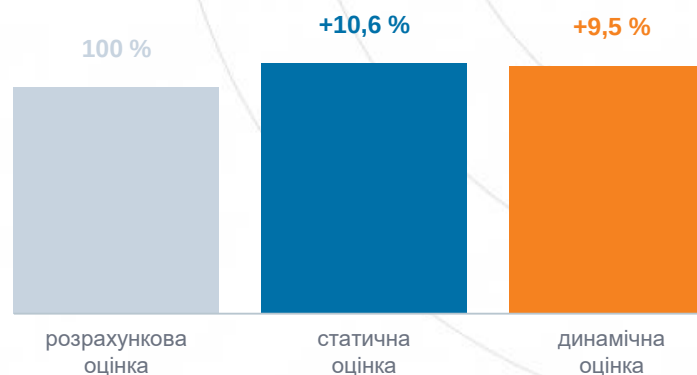




# Динамічні завантаження. Результати



| №                  | Досліджуваний переріз | 1/2 прогону |            | 1/4 прогону |            | 3/4 прогону |            |
|--------------------|-----------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|                    |                       | $f_1$ , Гц  | $f_2$ , Гц | $f_1$ , Гц  | $f_2$ , Гц | $f_1$ , Гц  | $f_2$ , Гц |
| експеримент A2-1.1 | 1/4                   | 8,45        | -          | 8,45        | 33,75      | 8,45        | 33,80      |
| експеримент A2-1.2 | 1/4                   | 8,45        | -          | 8,45        | 33,50      | 8,45        | 33,45      |
| експеримент A2-1.3 | 1/4                   | 8,45        | -          | 8,45        | 33,60      | 8,45        | 33,50      |
| експеримент A2-1.4 | 1/2                   | 8,45        | -          | 8,45        | -          | 8,45        | -          |
| експеримент A2-1.5 | 1/2                   | 8,45        | -          | 8,45        | -          | 8,45        | -          |
| експеримент A2-1.6 | 1/2                   | 8,45        | -          | 8,45        | -          | 8,45        | -          |
| експеримент A2-1.7 | 3/4                   | 8,45        | -          | 8,45        | -          | 8,45        | -          |
| експеримент A2-1.8 | 3/4                   | 8,45        | -          | 8,45        | -          | 8,45        | -          |
| експеримент A2-1.9 | 3/4                   | 8,45        | -          | 8,45        | -          | 8,45        | -          |



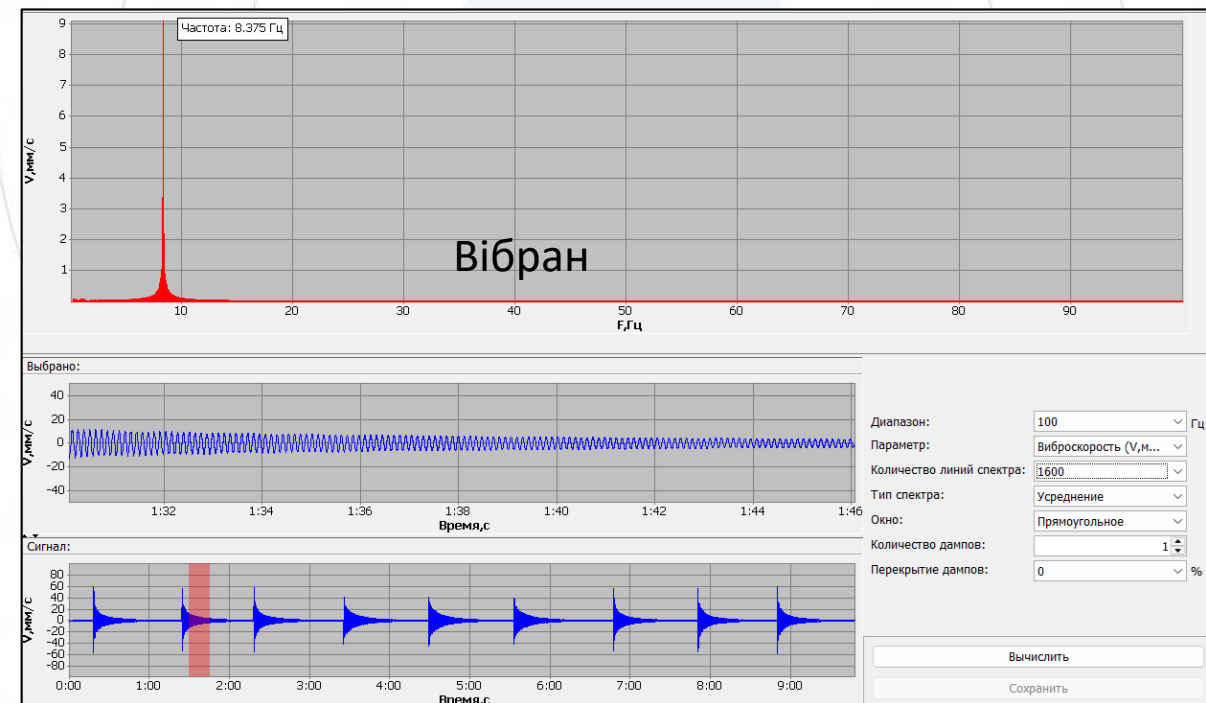
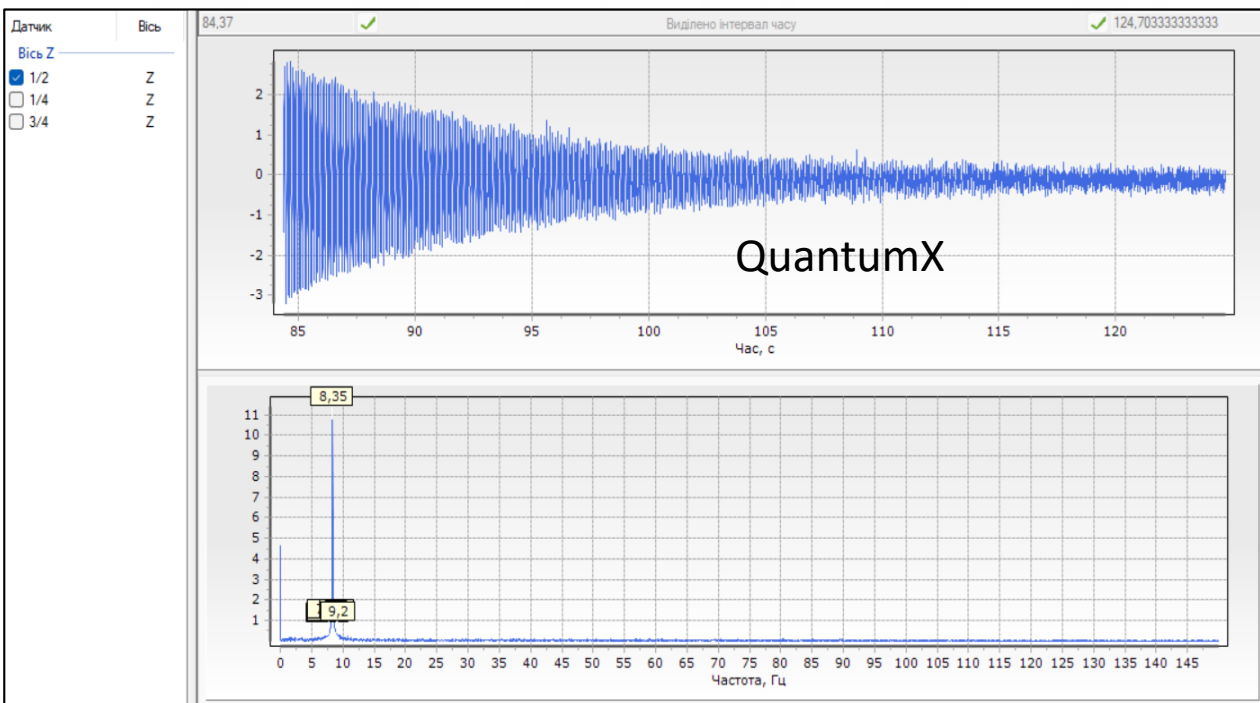
Фактична робота балки виявилася жорсткішою за ідеалізовану розрахункову схему. Це узгоджується з меншими експериментальними прогинами та особливостями фактичної геометрії тонкостінного профілю.



# Незалежна перевірка

| Серія експериментів | $f_1$ , QuantumX, Гц | $f_1$ , Вібран, Гц | $\Delta f$ , Гц | $\delta$ , % |
|---------------------|----------------------|--------------------|-----------------|--------------|
| A3-1                | 8,35                 | 8,38               | -0,03           | 0,36         |
| A3-2                | 8,35                 | 8,38               | -0,03           | 0,36         |
| A3-3                | 8,40                 | 8,38               | 0,02            | 0,24         |

Серія A3 показала, що тензOMETричні та акселерометричні записи дають практично однакову оцінку першої власної частоти за однакових умов випробування.



# Дослідження впливу типу ударного тіла



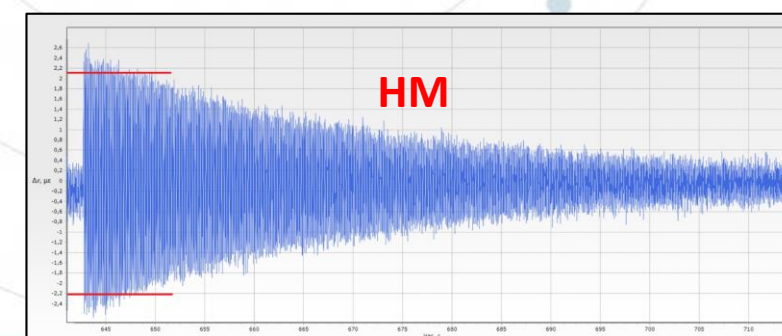
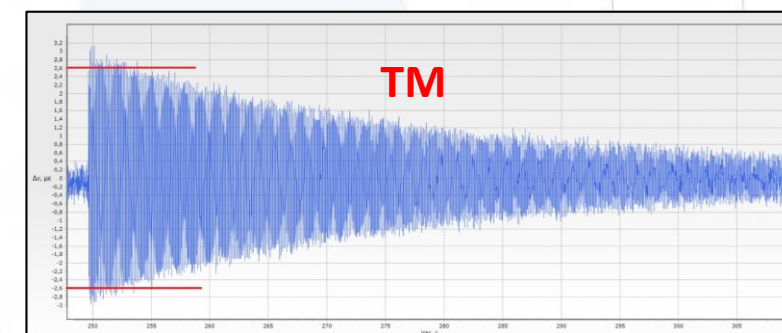
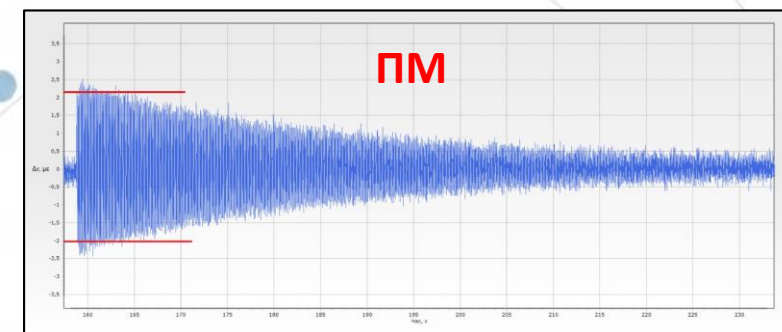
Порівнювалися три ударні тіла однакової маси 48 г, але з різними контактними властивостями.  
**ПМ** – поліетиленовий мішечок, **ТМ** – тканинний туго збитий мішечок, **НМ** – тканинний менш туго збитий мішечок

Усі варіанти забезпечили достатнє імпульсне збудження балки та дозволили зареєструвати вільні затухаючі коливання.

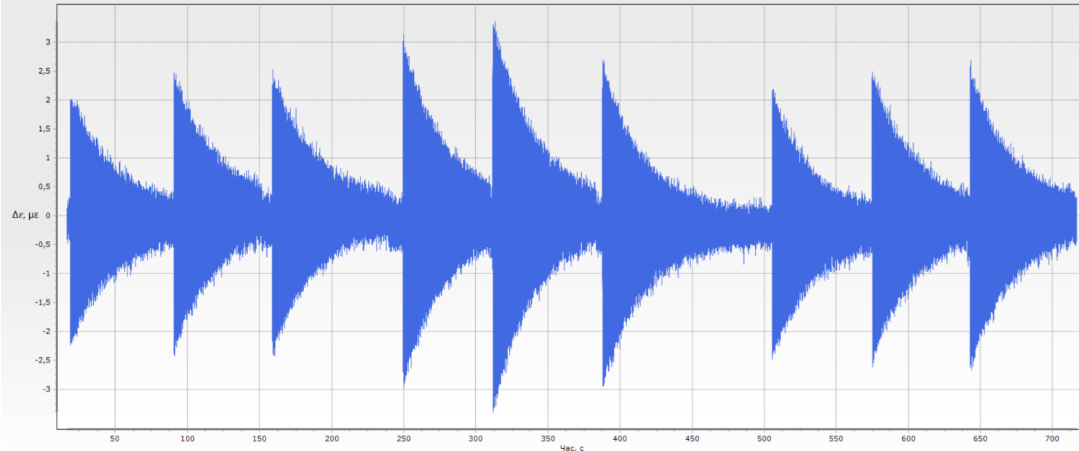
Найбільший амплітудний відгук отримано для тканинного туго збитого мішечка. Поліетиленовий мішечок сформував найменшу амплітуду, а менш туго збитий тканинний мішечок зайняв проміжне положення.

## Висновок

Тип ударного тіла впливає переважно на амплітуду сигналу, але всі розглянуті варіанти є придатними для визначення модальних параметрів балки. Найбільш раціональним для подальших дослідів прийнято тканинний туго збитий мішечок.



# Маса і висота скидання



Приклад запису відгуку балки при скидуванні ударного тіла з висот 10, 20 та 40 см

## Серія А5

- змінювали масу тіла та висоту 10, 20, 40 см
- показник оцінки – екстремуми першого циклу коливань
- амплітуда зростає зі збільшенням маси або висоти
- $f_1$  стабільна
- тіла 10–20 г також дають змогу визначити  $f_1$

**Що змінювали**  
маса ударного тіла  
висота скидування



**Що змінювалося**  
амплітудний рівень  
деформаційного відгуку



**Що залишалося сталим**  
перша власна частота  
балки  $f_1$

**Висновок.** Параметри ударного тіла визначають рівень збудження, але не змінюють власну частоту балки як характеристику конструкції

# Чутливість методу до зміни стану балки

Мета етапів – перевірити реакцію першої власної частоти та модальних параметрів на зміну масово-інерційного і жорсткісного стану балки.

## Послідовність виконаних дослідів

### А6 Рациональний режим

Уточнено режим імпульсу.  $f_1$  визначається стійко.

### Б1 Додаткова маса 0,6 кг

Додано 0,6 кг маси. Зафіксовано зниження  $f_1$ .

### Б2 Другий шар додаткової маси 0,6 кг

Додано ще 0,6 кг. Зафіксовано подальше зниження  $f_1$ .

### Б3 Локальне пошкодження

Проріз верхнього поясу. Отримано додаткову зміну параметрів.

Усі етапи підтвердили чутливість методу до зміни стану балки. Додавання маси знижує першу власну частоту, а локальне пошкодження додатково змінює модальні параметри.



# Висновки лабораторної верифікації

Лабораторні дослідження підтвердили працездатність імпульсного випробування як інструменту визначення модальних параметрів балки.

## 1. Базова модель

Сформовано контрольовану систему реєстрації прогинів, деформацій і вібраційного відгуку.

## 2. Жорсткість балки

Підтверджено узгодженість статичної та динамічної оцінок згинальної жорсткості.

## 3. Власні частоти

Стійко визначено першу власну частоту за тензометричними даними.

## 4. Умови збудження

Тип ударного тіла, маса та висота скидання змінюють амплітуду сигналу, але не змінюють власну частоту балки.

## 5. Чутливість методу

Підтверджено реакцію модальних параметрів на зміну маси та жорсткості елемента.

Результати обґрунтовують перехід від лабораторної перевірки до натурного застосування методу на елементах прогонових будов мостів.



Агентство  
Відновлення

14.05.2026

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

# МОЛОДЬ – ДРАЙВЕРИ ЗМІН У ВІДНОВЛЕННІ УКРАЇНИ

П'ЯТА ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ

Завгородній Сергій  
Центр мостів та будівельних конструкцій ДП «НІРІ» ✨