

## НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

**НАСТАНОВА ЩОДО  
ПРОВЕДЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ  
АВТОДОРОЖНИХ МОСТІВ****DIRECTIVE FOR  
VIBRATION TESTING  
OF HIGHWAY BRIDGES**Чинний від 201X-XX-XX**1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ**

Цей стандарт поширюється на проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів.

Стандарт поширюється на постійні автодорожні мости, мости суміщені під рейковий транспорт (трамвай або метрополітен) та пішохідні, що експлуатуються на автомобільних дорогах загального користування та вулицях і дорогах, які знаходяться в комунальній власності міст і населених пунктів.

**2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ**

У цьому стандарті наведено посилання на такі національні стандарти:  
ДСТУ 2300-93 Вібрація. Терміни та визначення

ДСТУ 3021-95 Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення

ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів

**Примітка.** Чинність стандартів, на які є посилання в цьому стандарті, перевіряють згідно з офіційними виданнями національного органу стандартизації – каталогом національних нормативних документів і щомісячними інформаційними покажчиками національних стандартів .

Якщо стандарт, на який є посилання, замінено новим або до нього внесено зміни, треба застосовувати новий стандарт, охоплюючи всі внесені зміни до нього.

## **прДСТУ**

### **3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ**

У цьому стандарті вжито терміни, які наведені в ДСТУ 2300 – (коливання, вібрація, вільна вібрація (вільні коливання), власна частота, власна форма коливань, видуга коливань (видуга форми коливань), логарифмічний декремент коливань, спектральний аналіз); ДСТУ 3021 – (випробування, експлуатаційні випробування, контрольні випробування, натурні випробування); ДСТУ-Н Б В.2.3-23 – (вантажопідйомність, технічний стан); а також в ДБН В.2.3-6 [7] – (обстеження, динамічні випробування) та ДБН В.2.3-22 [10] – (міст, автодорожній міст, динамічний коефіцієнт (коефіцієнт динамічний)).

Нижче подано терміни, додатково вжиті в цьому стандарті, та визначення позначених ними понять.

#### **3.1 відгук (*response* [14])**

Змінна величина (прогину, напруження, прискорення тощо), що спостерігається (реєструється) та залежить від певних чинників (навантаження на конструкцію)

#### **3.2 віброграма (*oscillogram* [14])**

Графік відгуку конструкції на динамічне навантаження

#### **3.3 квазістатичний (відгук) (*quasistatic response*) [14])**

Умовно статичний (відгук) інерційної системи при дії динамічного навантаження за умови відсутності інерції

#### **3.4 датчик (*sensor* [14])**

Чутливий елемент реєстраційної системи, який перетворює відгук конструкції в електричний сигнал

#### **3.5 балкова форма коливань**

Власна форма коливань прогонової будови, при якій кожний попереріж її переріз має форму коливань, що відповідає формі коливань моделі прогонової будови у вигляді балки (стрижня). При цьому коливання різних

поздовжніх перерізів можуть бути як синфазними так і антифазними (з викривленням поперечного перерізу)

### **3.6 модальні параметри**

Параметри власних форм коливань конструкції: власні форми в нормалізованих ординатах, власні частоти та логарифмічні декременти коливань

### **3.7 модальний контроль**

Контрольні випробування для оцінки технічного стану конструкцій мосту за їх модальними параметрами

### **3.8 незашумлена довжина віброграми**

Ділянка віброграми вільних коливань конструкції, на якій вплив фонових та апаратних шумів не спотворює спектру вільних згасаючих коливань (графік амплітудного спектру є гладким, без “порізів”)

### **3.9 функція динамічного коефіцієнта**

Функція залежності динамічного коефіцієнта від швидкості рухомого навантаження. Кожне значення цієї функції є максимальним значенням динамічного коефіцієнта для найбільш несприятливого характеру навантаження при даній швидкості руху.

## **4 ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ**

У цьому стандарті вжито такі позначки та скорочення:

МСЕ – метод скінчених елементів;

ПК – персональний комп'ютер;

$F_i$  – частота власної форми коливань,  $i$  – номер форми;

$\delta_i$  – логарифмічний декремент власної форми коливань,  $i$  – номер форми.

## **5 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ**

**5.1** Динамічні випробування є обов'язковою процедурою при визначенні технічного стану прогонових будов з розрахунковою довжиною прольоту 35 м і більше, а також для всіх мостів, які знаходяться в районах з сейсмічністю 7 балів і більше та мають прогонові будови довжиною більше ніж 18 м. Для інших конструкцій динамічні випробування слід проводити при потребі визначення впливу на них динамічного навантаження, чи визначення впливу коливань конструкції на комфортність руху (наприклад, пішоходів).

За методами проведення випробувань та аналізу їх результатів розрізняють такі види експлуатаційних динамічних випробувань:

- модальний контроль (аналіз вільних коливань);
- випробування рухомим навантаженням (аналіз вимушених коливань).

**5.2** Динамічні випробування як закінчена процедура повинні складатися з таких обов'язкових етапів:

- підготовка до випробувань;
- проведення натурних випробувань;
- порівняння результатів випробувань з розрахунками та складання висновку.

**5.3** На першому етапі (підготовка) об'єкт випробування (міст) необхідно обстежити та виявити особливості його конструкції як динамічної системи. За результатами обстеження формується розрахункова модель споруди чи окремої конструкції, якщо її можна виділити в окрему розрахункову модель. Модель створюється в програмному комплексі, що реалізує МСЕ. На створеній моделі виконуються пробні віртуальні експерименти, які імітують заплановані випробування та за результатами яких розробляється програма випробувань.

**5.4** Реєстраційна система, яка використовується при динамічних випробуваннях, підбирається на підготовчому етапі та повинна відповідати наступним загальним вимогам:

- забезпечувати синхронну реєстрацію сигналів від датчиків в цифровому форматі та збереження даних у файл ПК;
- забезпечувати частоту дискретизації не менш, ніж у 2,5 рази більшу від частоти вищої власної форми, яку планується досліджувати;
- механічна частина (датчики та їх приєднання до конструкції) повинні бути частотно незалежними (в діапазоні вимірювань) та мати власні частоти не менше, ніж у 10 разів більшими від досліджуваних власних частот конструкції;
- механічна частина не повинна мати вузлів з сухим тертям;
- чутливість датчиків та аналогове підсилення їх сигналів повинні бути достатніми за цілями випробувань (підбираються за результатами попередніх пробних експериментів).

**5.5** Результати випробувань порівнюються з розрахунками (за обґрунтування можливе порівняння з даними попередніх випробувань), на основі чого робляться відповідні висновки. Без такого порівняння випробування є не закінченим.

## **6 МОДАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ**

**6.1** Модальний контроль полягає у визначенні модальних параметрів конструкції шляхом аналізу її вільних коливань. Періодичне проведення модального контролю дозволяє проводити моніторинг технічного стану конструкції згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-23.

**6.2** Збудження коливань конструкції досягається прикладанням та зняттям навантаження. Це може бути рухоме навантаження (транспорт, пішоходи), імпульсне навантаження чи будь-яке інше динамічне навантаження.

## прДСТУ

**6.3** Маса рухомого навантаження не повинна перевищувати фактичної вантажопідйомності моста визначену згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-23. При створенні імпульсного навантаження шляхом скидання певного вантажу, його маса повинна бути, як мінімум, у 3 рази меншою від дозволеної для даної ділянки конструкції за її міцністю на статичну дію такого вантажу визначену згідно з [8–10]. Також цей вантаж не повинен перевищувати 0,5 % від загальної маси конструкції (для нерозрізної конструкції маси даного прольоту).

**6.4** Вільні коливання конструкції реєструються після припинення динамічної дії навантаження (з'їзду транспорту з прогонової будови, формування стоячих хвиль після прикладення імпульсу, тощо).

**6.5** Початкові амплітуди вільних коливань та характеристики реєстраційної системи повинні бути такими, щоб забезпечити отримання віброграми вільних коливань відповідно до наступної нерівності

$$T \geq \frac{4}{\delta F},$$

де  $T$  – тривалість незашумленої віброграми, с.

Виконання цієї умови направлене на забезпечення потрібної точності визначення модальних параметрів конструкції. Неможливість виконання цієї умови потрібно відмітити у висновках з поясненням причин та оцінкою точності визначення модальних параметрів.

**6.6** Визначення модальних параметрів виконується шляхом аналізу спектральних функцій віброграм вільних коливань конструкції. Планування випробувань та методи аналізу повинні забезпечити точність визначення цих параметрів із забезпеченням довірчого інтервалу не більше, ніж:

- для власних частот  $\pm 0,25$  %;
- для логарифмічних декрементів коливань  $\pm 10$  %;
- для ординат форми (в зоні видуг)  $\pm 2,5$  %.

**6.7** Для забезпечення вказаної точності, планування випробувань та попереднє опрацювання віброграм слід виконувати з використанням рекомендацій викладених у [13]. Аналіз віброграм вільних коливань з визначенням модальних параметрів слід виконувати з використанням удосконалених алгоритмів спектрального аналізу (Додаток А).

**6.8** Щонайменше підлягають визначенню модальні параметри:

- для розрізних прогонових будов за першою балковою формою зі всіма варіантами викривлення поперечного перерізу;
- для нерозрізних прогонових будов за першими балковими формами, кількість яких дорівнює кількості прольотів зі всіма варіантами викривлення поперечного перерізу у кожній балковій формі.

**6.9** Для балкових прогонових будов модальні параметри власних форм коливань за балковою формою у горизонтальній площині потрібно визначати, якщо їх частоти співрозмірні з частотами балкових власних форм коливань у вертикальній площині або ж якщо є певні особливості у динамічних навантаженнях на міст у горизонтальній площині. В іншому випадку можна визначати лише модальні параметри власних форм у вертикальній площині.

**6.10** Ординати власних форм прогонової будови згідно з 6.8 щонайменше визначають для її поперечних перерізів посередині (в зоні вигину форми) та у чвертях кожного прольоту.

Для балкових (плитних) прогонових будов точки визначення ординат у поперечнику повинні бути щонайменше по кожній балці (плиті).

Для просторових конструкцій (ферма, арка тощо) точки визначення ординат повинні бути у вузлах верхнього та нижнього поясу (на арці та на плиті надаркової будови).

Достатність точок для визначення певної власної форми коливань слід уточнювати на стадії моделювання прогонової будови.

## **прДСТУ**

**6.11** Для балкових прогонових будов ординати форми визначають у двох ортогональних осях (головні осі поперечного перерізу прогонової будови). Якщо ординати власної форми по одній з осей (вертикальній) на порядок більші, ніж по іншій (горизонтальній), то можна визначати лише ординати форми у напрямі цієї осі.

**6.12** Для просторових конструкцій (ферма, арка тощо) кожна з власних форм визначається як просторова, з визначенням її ординат у трьох ортогональних осях (головні осі прогонової будови).

**6.13** Для реєстрації вільних коливань рекомендується використовувати датчики, які не потребують контакту з нерухомою точкою (акселерометри, сейсмоприймачі тощо). Для визначення форми коливань в точках, кількість яких перевищує кількість датчиків, рекомендується використовувати метод реперного датчика згідно з [13].

**6.14** При виконанні модального контролю слід фіксувати температуру конструкції та графік зміни температури повітря напередодні дня випробувань та під час його проведення. Рекомендується проводити випробування вранці в похмуру погоду. Для цілей моніторингу технічного стану конструкції модальний контроль слід проводити за однакових погодних умов.

## **7 ВИПРОБУВАННЯ РУХОМИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

**7.1** Випробування рухомим навантаженням є аналогом статичних випробувань, але проводяться без закриття руху по мосту. Ці випробування виконуються з метою визначення:

- фактичної жорсткості прогонової будови;
- маси прогонової будови;
- ліній (поверхонь) впливу;
- функції динамічного коефіцієнта.

**7.2** Як випробувальне навантаження використовуються одиночні транспортні засоби із загального транспортного потоку: випадкові або ж



спеціально для цього призначені. Маса транспортного засобу не повинна перевищувати фактичної вантажопідйомності мосту, яка визначена згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-23. Випадкове навантаження використовують лише для визначення функції динамічного коефіцієнта та якісних ліній впливу (чи їх аналогів наприклад, коефіцієнта поперечного розподілу).

**7.3** Випробування рухомим навантаження для визначення жорсткості та маси, а також ліній (поверхонь) впливу виконується згідно з [12]. Для достовірного виділення квазістатичної складової з динамічного відгуку конструкції швидкість руху навантаження при цих випробуваннях не повинна перевищувати 55 км/год.

**7.4** Випробування рухомим навантаження для визначення функції динамічного коефіцієнта виконується згідно з [11].

**7.5** За результатами випробувань рухомим навантаження визначають фактичну вантажопідйомність мосту та встановлюють відповідне обмеження щодо швидкості руху транспорту (за необхідності).

## **8 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ**

**8.1** Результати динамічних випробувань оформлюють у вигляді звіту згідно з ДБН В.2.3-6 [7].

**8.2** Для всіх мостів, які відповідають вимогам 5.1 за результатами їх динамічних випробувань складають динамічний паспорт мосту за формою (Додаток Б).

## **9 ВИМОГИ ЩОДО БЕЗПЕКИ**

**9.1** Всі роботи з проведення динамічних випробувань мають виконуватись з дотриманням вимог безпеки праці згідно з ДБН А.3.2-2 [6] та нормативних актів [1-5].

## **прДСТУ**

**9.2** Роботи з приладами, технологічними інструментами та оглядовими конструкціями повинні виконуватися з дотриманням вимог безпеки, які викладені в інструкціях з їхнього використання.

**9.3** Засоби кріплення датчиків та обладнання для випробувань не повинні впливати на роботу конструкцій мосту та спричиняти їх пошкоджень.

**9.4** При проведенні динамічних випробувань забороняється використання пожежонебезпечних, вибухонебезпечних та речовин з підвищеним рівнем радіації.

**9.5** Робоча зона (місця розташування приладів та працівників) повинна бути відмічена сигнальною стрічкою, а у випадку її розташування в зоні руху транспорту повинна додатково мати відповідне огородження (прикриття) відмічене дорожніми знаками.

**9.6** При організації робочого місця на висоті більше ніж 3 м без огородження слід використовувати ремені безпеки.

## **10 ВИМОГИ ЩОДО ЗБЕРЕЖЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА**

**10.1** Роботи з проведення динамічних випробувань моста не повинні змінювати стан навколишнього природного середовища більш, ніж це відбувається під час експлуатації даного моста.

**10.2** Не дозволяється використовувати речовини та механізми, які можуть понаднормово забруднювати об'єкти довкілля.

**10.3** Всі використані при випробуваннях матеріали (елементи живлення, тимчасові конструкції тощо) підлягають утилізації згідно вимогам, які викладені в інструкціях з їх використання.

## ДОДАТОК А

(довідковий)

## УДОСКОНАЛЕНІ АЛГОРИТМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

## А.1 Додавання спектрів

Якщо маємо функцію в часовій області  $s(t)$ , яка є сумою  $n$  функцій виду  $A_i y_i(t)$

$$s(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i(t), \quad (\text{A.1})$$

то її спектральне перетворення  $S(\omega)$  теж буде сумою  $n$  доданків  $A_i Y_i(\omega)$

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot Y_i(\omega), \quad (\text{A.2})$$

де доданки  $A_i Y_i(\omega)$  є спектральними функціями кожної з функцій доданків у часовій області.

Якщо є декілька функцій за виразом (А.1), що утворюють систему рівнянь, то відповідною буде і кількість функцій за виразом (А.2), які утворюють систему рівнянь в частотній області. Внаслідок лінійності, розв'язання цих рівнянь (виділення спектрів складових гармонік) можна виконати їх алгебраїчним додаванням з попереднім множенням на відповідні коефіцієнти – цей підхід і є основою методу додавання.

Пояснимо сказане на простому прикладі. Нехай у нас є дві функції, одна з яких є сумою двох гармонік, а інша їх різницею:

$$s_1(t) = A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(\omega t + \varphi);$$

$$s_2(t) = A_1 \cos(\omega t) - A_2 \cos(\omega t + \varphi)$$

Їх спектральні функції також будуть сумою (чи різницею) двох спектральних функцій від їх доданків

$$S_1(\omega) = A_1 \cdot Y_1(\omega) + A_2 \cdot Y_2(\omega);$$

$$S_2(\omega) = A_1 \cdot Y_1(\omega) - A_2 \cdot Y_2(\omega).$$

## прДСТУ

У спектрах  $S_1(\omega)$  та  $S_2(\omega)$ , складові гармоніки можуть не виділятися чіткими окремими піками, що при близьких значеннях частот чи значному декременті коливань найчастіше і відбувається. Після почергового додавання та віднімання рівнянь отримуємо

$$S_1(\omega) + S_2(\omega) = 2A_1 \cdot Y_1(\omega);$$

$$S_1(\omega) - S_2(\omega) = 2A_2 \cdot Y_2(\omega).$$

В останніх виразах праві частини ( $2A_1 Y_1(\omega)$  та  $2A_2 Y_2(\omega)$ ) є спектральними функціями кожної з гармонік, у спектрах яких положення частот гармоніки проявляється чітким піком.

Внаслідок лінійності функцій аналогічний результат отримуємо і при додаванні (відніманні) синхронних віброграм (тобто функцій  $s_1(t)$  та  $s_2(t)$ ), а вже потім знаходження спектру сумарної результуючої віброграми. Який підхід застосувати (складати віброграми чи складати спектри) залежить лише від суб'єктивних уподобань дослідника.

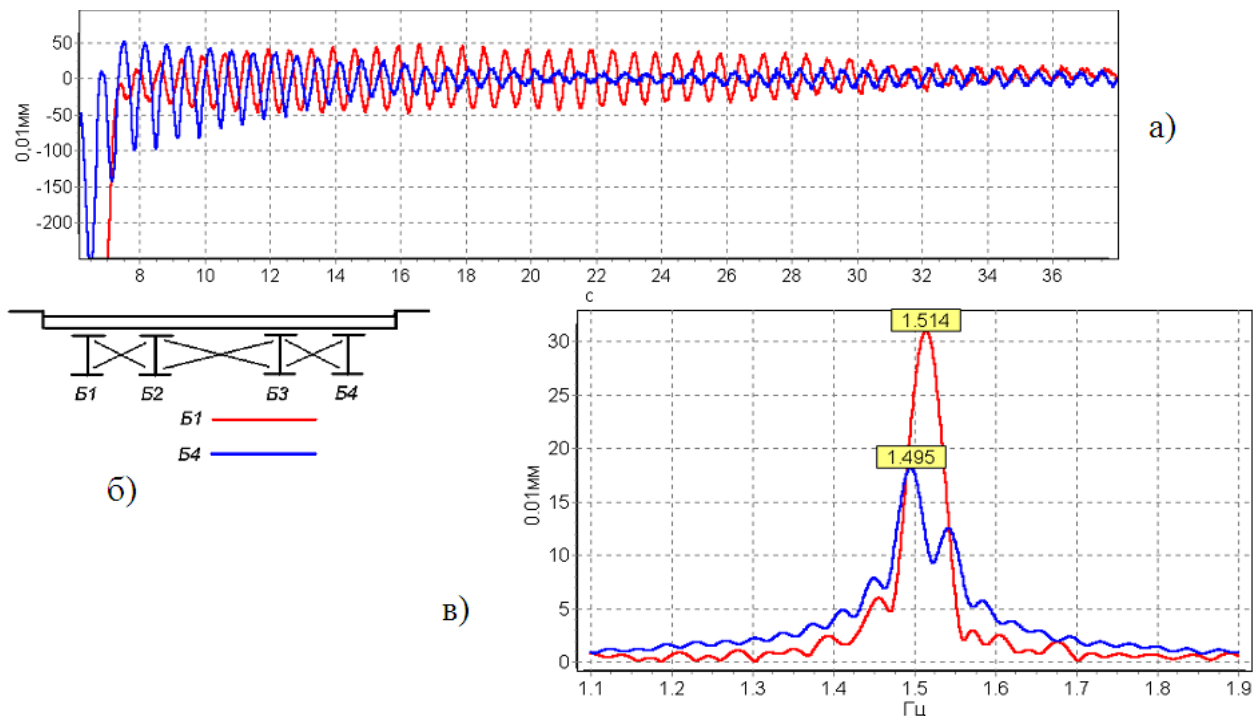
Може бути, що коефіцієнти (амплітуди гармонік) в кожному з рівнянь є іншими. Тоді перед складанням (відніманням) рівнянь їх потрібно попередньо помножити на відповідні коефіцієнти.

Якщо гармонік, які ми хочемо виділити, не дві, а більше ( $n$ ) то відповідно потрібно мати і більшу кількість рівнянь ( $n$  рівнянь) для виділення їх спектрів, для чого треба зареєструвати  $n$  віброграм в різних точках конструкції. Складністю при цьому буде визначення коефіцієнтів, на які слід помножити рівняння (віброграми чи їх спектри) перед додаванням (відніманням).

### *Приклад*

Досліджується натурна балкова розрізна прогонова будова автоторожнього моста, в поперечнику якої є чотири поздовжні балки. Виконано реєстрацію динамічних прогинів в середині прольоту для двох фасадних балок (симетричні відносно осі прогонової будови) при проходженні по споруді одиночного автомобіля.

На рис. А.1 представлено віброграми вільних коливань, які були за-реєстровані, та їх амплітудні спектри.



**Рисунок А.1** – Віброграми вільних коливань крайніх балок та їх амплітудні спектри: (а) - синхронні віброграми; (б) - переріз прогонової будови; (в) - амплітудні спектри віброграм

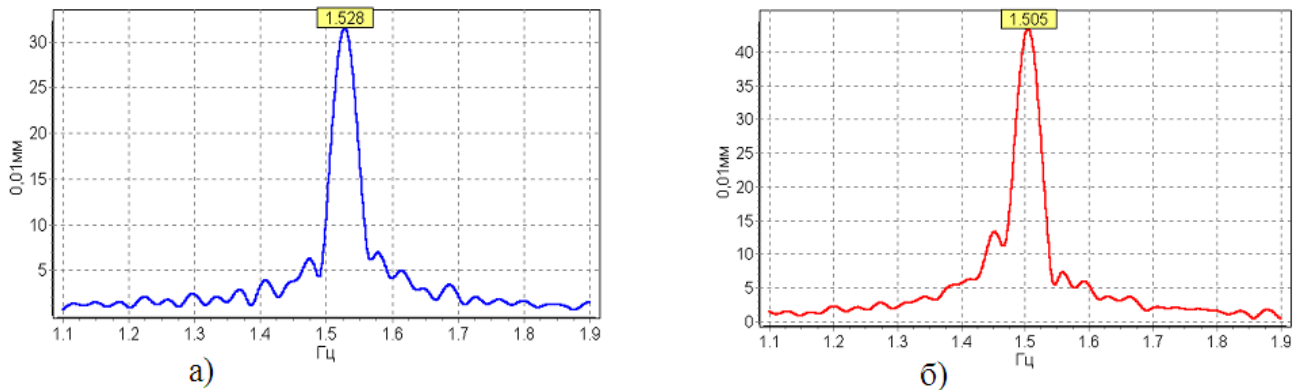
З характеру віброграм видно, що коливання обох балок є результатом складання як мінімум двох форм коливань. При цьому амплітудні спектри, визначені за наявними віброграмами, не дають чіткого визначення частот складових гармонік. На одному з амплітудних спектрів маємо лише один пік в зоні екстремуму, на іншому спектрі піків є два, але положення їх вершин не чітке та зміщене від дійсних частот гармонік.

Застосувавши алгоритм додавання в сумі спектрів отримуємо лише синфазні (симетричні) коливання, а в різниці спектрів, навпаки, будуть тільки антифазні (кососиметричні) коливання (див. рис. А.2).

На обох виділених нами амплітудних спектрах маємо чітко виражені піки для частот: 1,528 Гц – симетричні коливання (за сумою спектрів); 1,505 Гц – кососиметричні (крутильні) коливання (за різницею спектрів). Ці

## прДСТУ

спектри можна використати для більш точного, ніж за початковими спектрами, визначення власних частот та їх декрементів коливань.



**Рисунок А.2** – Амплітудні спектри: а) суми спектрів (синфазні коливання); б) різниці спектрів (антифазні коливання)

### А.2 Спектральна фільтрація

Цей алгоритм є розвитком алгоритму додавання, а його відмінність полягає в тому, що одним з доданків є не натурна віброграма чи її спектр, а розрахункові дані. Якщо вже було визначено певну власну частоту ( $F_i$ ) та її декремент коливань ( $\delta_i$ ), то для виділення спектрів інших гармонік можна замість натурної віброграми сформувати розрахункову віброграму за наступним рівнянням:

$$y(t) = A_k e^{-\delta_i F_i t} \cos(2\pi F_i t + \varphi_k), \quad (\text{A.3})$$

де  $A_k = 2\delta_i F_i Y_k$ ;

-  $Y_k$  та  $\varphi_k$  – ордината та початкова фаза на частоті  $F_i$  у спектрі коливань  $k$ -ї точки конструкції (спектру віброграми, з якої збираємося відняти розрахункову віброграму).

Далі цю розрахункову віброграму можна використати аналогічно натурним в алгоритмі додавання.

Алгоритм спектральної фільтрації найбільш доцільно використовувати при визначенні нормалізованих ординат власних форм конструкції, оскільки при відніманні моногармонічної віброграми амплітуди інших гармонік не змінюються.

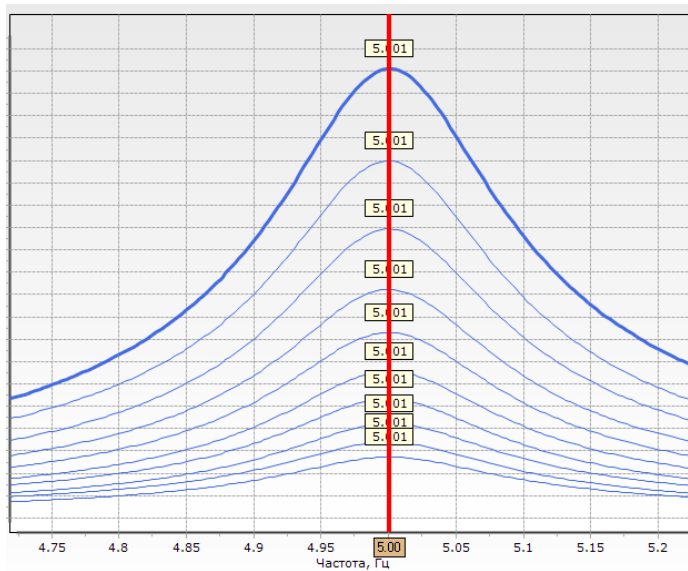
### А.3 Алгоритм зміщення робочого вікна

Головний принцип даного алгоритма полягає в тому, що змінюючи початковий момент аналізу віброграми ми змінюємо початкові фазові положення складових гармонік віброграми і саме тому вигляд амплітудного спектра змінюється. Аналіз таких змін дозволяє робити певні висновки. Довжину віброграми слід брати кожного разу однаковою, тобто при зміщенні моменту початку аналізу зміщувати відповідно момент його закінчення. На віброграмі таку ділянку зручно окреслити прямокутником – вікном. В даному алгоритмі термін “робоче вікно” означає ділянку віброграми, для якої розраховуємо спектр, і цей термін не має нічого спільного з тими ваговими функціями - вікнами, які застосовуються в класичному спектральному аналізі для перетворення віброграм з метою згладжування їх спектра.

*Зауваження:* алгоритм зміщення робочого вікна працює в повній мірі за умови знаходження спектральної функції із застосуванням класичного перетворення Фур'є. Алгоритм швидкого перетворення Фур'є тут застосовувати важче, оскільки в його випадку довжина віброграми або ж обрізається або ж доповнюється нулями для забезпечення кількості точок відліку кратної степені двійки. Відповідно довжину робочого вікна слід брати не довільно, а підбирати.

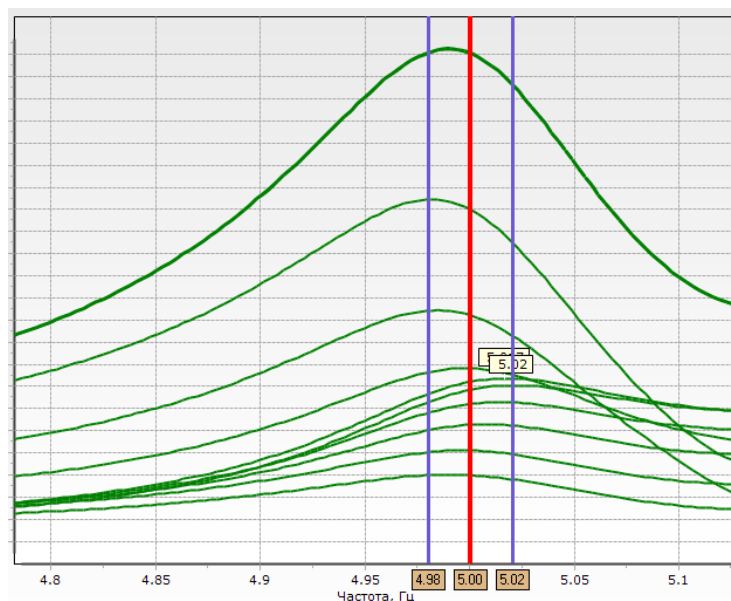
#### *Приклади*

На рисунку А.3 представлено сімейство амплітудних спектрів утворене зміщенням робочого вікна для віброграми з однією гармонікою. Положення екстремумів для всіх кривих є однаковим – це є ознакою того, що екстремум спектра відповідає положенню частоти гармоніки. Якщо екстремуми для різних кривих сімейства спектрів змінюють свою координату по частоті, то це свідчить про: наявність інших гармонік, наявність фонових впливів або ж про нелінійність конструкції.



**Рисунок А.3** – Сімейство амплітудних спектрів для віброграми з однією гармонікою

Якщо зміщення екстремуму при послідовному розгляді графіків відбувається спочатку в одну сторону а потім в іншу (повертаються), то це, як правило, є ознакою впливу іншої гармоніки (рисунок А.4).



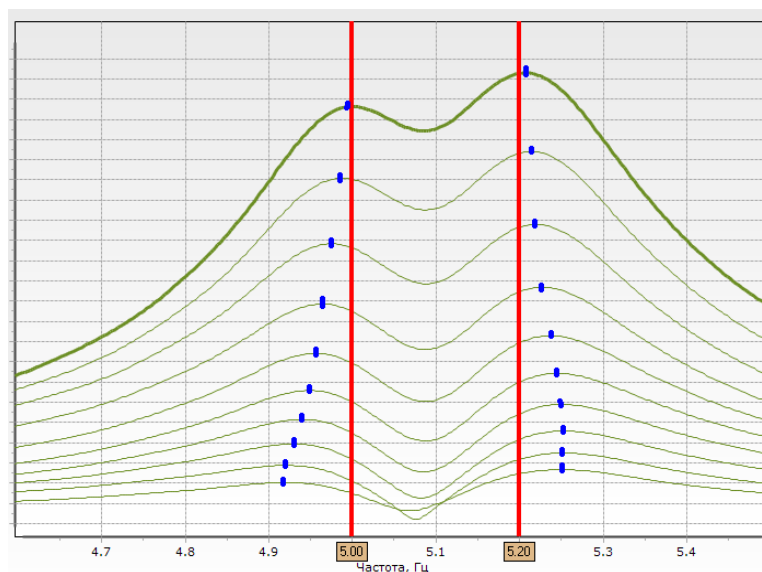
**Рисунок А.4** – Визначення частоти гармоніки як середнього значення (середня вертикаль) між крайніми положеннями екстремумів сімейства спектрів

Інтервал часу, за який екстремум “повертається” до початкового значення повинен забезпечити зміну різниці початкової фази близьких гармо-



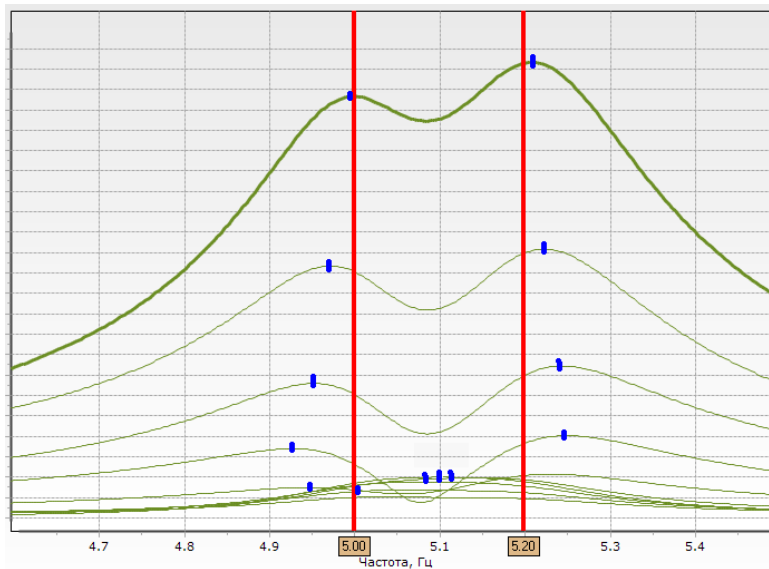
нік на діапазоні від  $-\pi$  до  $+\pi$ . Його тривалість є оберненою величиною до різниці між частотами близьких гармонік. В цьому випадку значення частоти можна визначити як середнє між положенням крайніх екстремумів. Насправді “точне” значення частоти гармоніки знаходиться не зовсім посередині між положенням крайніх екстремумів, але його уточнення є досить складним, тому можна обмежитися значенням середньої частоти з вказівкою довірчого інтервалу, який становить половину інтервалу між екстремумами. В розглянутому прикладі (див. рис. А.4) це буде  $(5 \pm 0,01)$  Гц.

Якщо інтервал зміщення робочого вікна не охоплює весь період зміни різниці початкових фаз близьких гармонік, тобто менший від часу, потрібного для “повернення” екстремуму, то у цьому випадку екстремуми спектру будуть знаходитися в якійсь одній зі сторін від дійсного значення частоти (див. рис. А.5).



**Рисунок А.5** – Сімейство спектрів при інтервалі зміщення робочого вікна меншому, ніж повний період зміни початкових фаз близьких гармонік. Мітками позначені екстремуми спектрів, вертикальними лініями дійсні частоти гармонік

При близьких частотах гармонік навіть при інтервалі зміщення робочого вікна, який охоплює весь період зміни різниці їх початкових фаз, точні значення частот визначити теж складно (див. рис. А.6).



**Рисунок А.6** – Сімейство спектрів при інтервалі зміщення робочого вікна меншому, ніж повний період зміни початкових фаз близьких гармонік

У такому випадку слід провести додаткові дослідження, відповідно спланувавши експеримент із синхронною реєстрацією відгуку в декількох точках конструкції та з використанням на стадії аналізу алгоритму додавання. В цілому ж, як правило, за віброграмою коливань конструкції лише в одній з її точок частоти власних коливань можна визначити лише наближено. Рекомендується завжди визначати власні частоти шляхом аналізу вільних коливань різних точок конструкції.

### А.3 Визначення декременту коливань

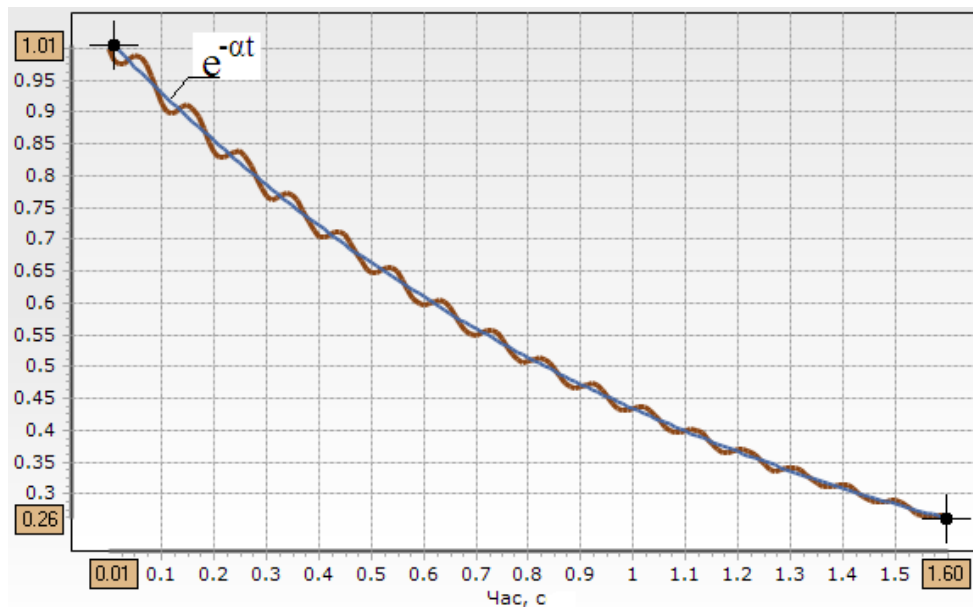
Якщо зміщувати робоче вікно на одиницю дискретизації віброграми, то можна побудувати графік зміни відносної ординати амплітудного спектру для певної власної частоти (див. рис. А.7). Провівши апроксимаційну експоненту ( $e^{-\alpha t} = e^{-\delta F t}$ ) по серединній лінії цього графіка, можна за її показником степені вирахувати значення декременту коливань

$$\delta = \frac{\alpha}{F}, \quad (\text{A.4})$$

де  $\alpha$  – показник степені апроксимаційної експоненти.

Найбільш точно значення декременту коливань за певною власною формою можна визначити апроксимацією графіка зміни ординат амплітуд-

ного спектра, який отримано за методом додавання, відповідно спланувавши експеримент та аналіз його результатів.



**Рисунок А.7** – Графік зміни відносної ординати амплітудного спектру та його апроксимаційна експонента

ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

**ФОРМА ДИНАМІЧНОГО ПАСПОРТА МОСТА**

**Б.1** Динамічний паспорт моста (далі паспорт) складається з титульного аркуша, 4 розділів та 2 додатків, в які згруповано відповідні таблиці та рисунки. На титульному аркуші міститься інформація про споруду та підпис відповідального виконавця та підпис керівника організації, яка склала паспорт.

**Б.2** Розділ 1 паспорта має назву “Динамічні навантаження на міст” та містить три таблиці, в яких наводиться інформація про динамічні навантаження які діють постійно чи можуть діяти періодично на міст.

**Б.3** В таблиці 1.1 розділу 1 (рис. Б.1) відображено дію транспорту, яка виражається через динамічний коефіцієнт, що визначається випробуванням для кожної прогонової будови моста як функція від швидкості руху навантаження виду:

$$(1 + \mu) = 1 + a + b \cdot v ,$$

де:  $v$  – швидкість руху (м/с);

$a$  та  $b$  – постійні.

Рекомендується ілюструвати формулу графіком значень динамічного коефіцієнта за результатами випробувань.

Таблиця 1.1 – Фактичний динамічний коефіцієнт

Номер прог. будови	Динамічний коефіцієнт за проектом	Дата випробувань та стан дорожнього покриття	Формула динамічного коефіцієнту за результатами випробувань виду: $(1 + \mu) = 1 + a + b \cdot v$ , де $v$ – швидкість руху (м/с); $a$ та $b$ – постійні.

**Рисунок Б.1** – Таблиця 1.1 паспорта

**Б.4** Для районів з сейсмічністю більш ніж 6 балів наводяться дані про сейсмічність майданчика моста – ці дані містяться в таблиці 1.2 розділу 1 (рис. Б.2).

Таблиця 1.2 – Сейсмічність майданчика

За проектом	За чинними нормами	З врахуванням типу <u>грунтів</u>

**Рисунок Б.2** – Таблиця 1.2 паспорта

**Б.5** В таблиці 1.3 розділу 1 (рис. Б.3) наведено інформацію про інші динамічні навантаження, до яких відносяться вітрові навантаження, дія гідроагрегатів, інших механізмів та обладнання, мікросейсмічні впливи та ін.

Таблиця 1.3 – Інші динамічні навантаження

Тип навантаження	Характеристика та зона прикладання навантаження	Параметри відгуку конструкції

**Рисунок Б.3** – Таблиця 1.3 паспорта

**Б.6** Розділ 2 паспорта має назву “Характеристики власних форм коливань прогонових будов моста” та поділений на підрозділи за кількістю прогонових будов даного моста. В кожному підрозділі є по три таблиці, в яких наведено інформацію про параметри власних форм коливань відповідної прогонової будови.

**Б.7** У таблиці 2.1.1 розділу 2 (рис. Б.4) приводяться частоти та логарифмічні декременти власних форм коливань, які визначені за результатами випробувань. В примітках цієї таблиці даються посилання на експерименти та ілюстрації, які приводяться в додатку Б паспорта.

## прДСТУ

Таблиця 2.1.1 – Частоти та логарифмічні декременти власних форм коливань

Номер форми	Частота, Гц	Посилання на ілюстрації (додаток Б)	Логарифмічний <u>декремент</u>	Посилання на ілюстрації (додаток Б)
(дата випробувань, погодні умови)				

**Рисунок Б.4** – Таблиця 2.1.1 паспорта

**Б.7** В таблиці 2.1.2 розділу 2 (рис. Б.5) приводяться ординати за кожною власною формою коливань для точок конструкції, в яких виконувалися вимірювання та інформація про які наводиться в додатку А.

Таблиця 2.1.2 – Таблиця нормалізованих ординат форм власних коливань

Номер точки конструкції	Нормалізовані ординати форми по осям		
	X	Y	Z
1	2	3	4
Форма власних коливань №_з частотою ____ Гц			

**Рисунок Б.5** – Таблиця 2.1.2 паспорта

**Б.8** Таблиця 2.1.3 розділу 2 (рис. Б.6) відображає картину зміни параметрів власних форм коливань прогонової будови у порівнянні зі всіма попередніми оцінюваннями.

Таблиця 2.1.3 – Моніторинг параметрів власних форм коливань

Дата випробувань, погодні умови	Номер власної форми	Частота, Гц	Логарифмічний <u>декремент</u>	Характерні ординати форми

**Рисунок Б.6** – Таблиця 2.1.3 паспорта

**Б.9** Розділ 3 паспорта має назву “Особливості роботи моста на динамічні навантаження”. Цей розділ відведено для запису висновків щодо ре-

зультатів аналізу роботи мосту на динамічні навантаження (зміни в параметрах власних форм коливань та їх причини, необхідність обмеження швидкості та інтервалу руху транспорту, оцінка сейсмостійкості, відповідність параметрів коливань нормам, рівень стійкості до вітрового навантаження тощо).

**Б.10** Розділ 4 має назву “Рекомендації” та заповнюється в разі потреби проведення певних заходів, які пов’язані з відхиленнями нормальної роботи моста на динамічні навантаження.

**Б.11** Додаток А до паспорта є обов’язковим та містить інформацію про точки вимірювання на конструкції (місця встановлення датчиків). Ця інформація подається для кожної прогонової будови та може бути представлена як креслення з відповідними помітками та розмірами, або ж як схема конструкції з відповідними координатними осями та таблицею точок вимірювання і їх координатами.

**Б.12** Додаток Б до паспорта є рекомендованим для довідок. В ньому представлені графіки, які ілюструють та підтверджують значення власних частот та їх декрементів коливань, що визначені за результатами випробувань для кожної прогонової будови. Також доцільно давати коротку інформацію про експерименти, за якими були визначені власні частоти та їх декременти: точки прикладання навантаження (смуги руху навантаження), точки реєстрації тощо ).

**ДОДАТОК В**  
**(довідковий)**  
**БІБЛІОГРАФІЯ**

1 НПАОП 45.21-1.03-98 Правила безпеки праці під час проведення робіт з будівництва мостів», затверджені наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.03.1998 №31

2 НПАОП 60.1-1.48-00 Правила безпеки для працівників залізничного транспорту на електрифікованих лініях, затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 31.05.2000 №120

3 НПАОП 63.21-1.01-09 Правила охорони праці під час будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг, затверджені наказом Держгірпромнагляду України від 28.12.2009 №216, зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 15.03.2010 за №218/17513

4 НПАОП 63.21-1.07-00 Правила безпеки під час проведення вишукувань автомобільних доріг затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 28.12.2000 №376

5 НПАОП 63.21-1.25-07 Правила безпеки праці під час виконання робіт у колійному господарстві, затверджені наказом Держгірпромнагляду України від 12.03.2007 №43, зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 03.04.2007 за №303/13570

6 ДБН А.3.2-2:2009 Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення

7 ДБН В.2.3-6:2016 Мости та труби. Обстеження і випробування

8 ДБН В.2.3-14:2006 Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування

9 ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи

10 ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування

11 Р В.2.3-03450778-858:2015 Рекомендації щодо встановлення обмеження швидкості руху на автодорожніх мостах відповідно до їх фактичного технічного стану

12 Р В.2.3-218-03450778-711:2007 Рекомендації з діагностики стану прогонових будов мостів за динамічною дією рухомого навантаження

13 Р В.3.1-218-03450778-777:2010 Рекомендації з визначення натурних динамічних характеристик автодорожніх мостів

14 Англо-український словник. У 2-х т. / Склав М.І. Балла. – Київ: Освіта, 1996.



Код згідно з ДК 004 93.040

**Ключові слова:** випробування, власні форми коливань, динамічні випробування, міст, спектральний аналіз.