

УДК 624.042.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2026.40.11>

# МЕТОДИКА ТА ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ НАТУРНИХ ВІБРОДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ МЕТАЛЕВИХ МОДУЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ТРАНСПОРТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Мар'єнков Микола Григорович<sup>1</sup>, Хименко Богдан Олегович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
професор кафедри будівництва,

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна,  
e-mail: m.maryenkov@nubip.edu.ua, orcid: 0000-0002-7246-845X

<sup>2</sup> аспірант кафедри будівництва,

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна,  
e-mail: bogkhyt@gmail.com, orcid: 0009-0007-2612-8909

**Анотація.** Метою даного дослідження є розробка, теоретичне обґрунтування та практична апробація комплексної методики проведення натурних вібродинамічних випробувань великогабаритних просторових модульних систем безпосередньо в польових умовах на різних етапах їхнього логістичного життєвого циклу.

**Методологія.** Об'єктом дослідження виступає великогабаритний металевий модуль повної заводської готовності (автономна котельня). Маса системи становить 4500 кг, з наявним значним несиметричним зосередженим навантаженням. Емпіричні вимірювання віброприскорень та власних частот просторового каркаса реалізовано за допомогою спеціалізованого апаратно-програмного комплексу. Реєстрація даних здійснювалася на трьох етапах: ініціювання вільних коливань методом миттєвого зняття навантаження, кінематичне збурення під час відриву системи підйомним краном та транспортування модуля дорогами з різним типом покриття. Для обробки отриманих масивів даних застосовувалися алгоритми швидкого перетворення Фур'є.

**Результати.** Отриманий масив верифікованих емпіричних даних доводить факт інтенсивного руйнівного впливу на просторовий каркас ще до введення його в експлуатацію. Процеси переміщення та монтажу генерують критичні кінематичні збурення, які не враховуються при стандартному розрахунку на статичку. За результатами спектрального аналізу зафіксовано фактичні частоти власних коливань каркаса: 12,25 Гц за поперечною віссю та 16,0 Гц за поздовжньою. Під час вантажно-розвантажувальних робіт пікові вертикальні віброприскорення сягали 1,4 м/с<sup>2</sup>. Безпосереднє транспортування модуля згенерувало критичні значення просторових віброприскорень, що наближалися до межі 9,0 м/с<sup>2</sup>, що еквівалентно впливу високобального землетрусу.

**Наукова новизна.** Вперше отримано достовірні емпіричні дані щодо кінематичного відгуку великогабаритних металевих модульних систем в умовах реальних транспортних та монтажних навантажень. Доведено, що логістичні динамічні впливи за своєю інтенсивністю можуть значно перевищувати експлуатаційні статичні навантаження, формуючи складний динамічний контур системи. Ідентифіковані базові частоти власних коливань зафіксовано як еталонні вхідні параметри для подальшої валідації скінченно-елементних моделей.

**Практична значущість.** Ринок швидкокомтованих будівель в Україні наразі демонструє масове виробництво несертифікованих модульних конструкцій. Фіксується тотальна відсутність спеціалізованих державних будівельних норм, що регламентують стійкість таких систем до логістичних та експлуатаційних динамічних навантажень. Отримані результати підтверджують нагальну необхідність структурної модернізації мобільних будівель та інтеграції спеціальних демпфуючих пристроїв (гумово-металевих сейсмоізоляторів) у конструктивну схему, що дозволить знизити деформативні ризики для несучих вузлів.

**Ключові слова:** великогабаритні модульні системи, натурний експеримент, просторовий металевий каркас, вібродинамічні випробування, транспортування, кінематичне збурення, частоти і форми.

## ВСТУП

Масштабна військова агресія та подальша необхідність оперативного відновлення критичної інфраструктури України зумовили експоненційне зростання попиту на технології модульного будівництва. Великогабаритні просторові модульні системи повної заводської готовності (житлові блоки, автономні котельні, медичні пункти) дозволяють мінімізувати терміни розгортання об'єктів. Проте масова комерціалізація цієї галузі виявила критичну проблему: відсутність спеціалізованих нормативних документів, які б жорстко регламентували стійкість таких конструкцій до логістичних та експлуатаційних динамічних навантажень.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наукова робота виконувалася у рамках досліджень [8] із урахуванням процесів, виявлених та отриманих динамічних впливів на споруди [15] та подальшої зміни напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, що впливає на подальшу безпечну роботу [5]. Для коректного проектування таких модулів необхідне створення адекватних математичних моделей та цифрових двійників [19]. Як було доведено у попередніх дослідженнях авторів [6], ефективним методом гасіння таких прискорень є інтеграція демпферів. Динамічна поведінка просторових сталевих каркасів активно досліджується в контексті експлуатаційних вібрацій [18], проте вплив транспортних навантажень залишається нерозкритою проблемою.

Стандартний проектувальний підхід здебільшого обмежується розрахунком модулів на статичні навантаження, ігноруючи складний динамічний контур системи, який активується задовго до початку цільової експлуатації [2; 4]. Відомо, що під час вантажно-розвантажувальних робіт, підйому краном та транспортування автомобільними шляхами просторовий металевий каркас зазнає інтенсивних кінематичних збурень [7; 11]. Дослідження

напружено-деформованого стану та динамічної стійкості модульних систем в умовах складних логістичних навантажень широко представлені в роботах закордонних вчених, що підтверджує глобальну актуальність даного напрямку [10–12; 14; 16].

Ці збурення можуть генерувати віброприскорення, що наближаються до параметрів високобальних сейсмічних впливів, призводячи до накопичення втомних пошкоджень у зварних вузлах, деформації огорожувальних конструкцій та розукомплектування внутрішнього технологічного обладнання [9; 14; 17].

## МЕТА

Метою даного дослідження є розробка, теоретичне обґрунтування та практична апробація комплексної методики проведення натурних вібродинамічних випробувань великогабаритних просторових модульних систем безпосередньо в польових умовах на різних етапах їх логістичного життєвого циклу.

Методика експериментальних досліджень. Об'єктом натурних випробувань виступає великогабаритний просторовий металевий модуль повної заводської готовності, спроектований для функціонування як автономна котельня. Габаритні розміри конструкції становлять 6000×2400×2630 мм. Несучий каркас виконаний зі сталевих профілів товщиною 4–6 мм. Параметри та загальний вигляд просторової системи наведені на рис. 1.

Загальна маса укомплектованого модуля фіксується на рівні 4500 кг. Слід відмітити наявність значного несиметричного зосередженого навантаження, зумовленого розташуванням внутрішнього технологічного обладнання. Така конфігурація мас формує складний динамічний контур системи, чутливий до зовнішніх збурень.

Запропонований підхід базується на фундаментальних принципах лінійної теорії сейсмоізоляції та методах чисельного моделювання складних інженерних об'єктів за допомогою цифрових двійників [13; 17; 19; 20].



а)

## ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ТА РОЗМІРИ КОТЕЛЬНІ

Найменування параметрів та розмірів, розмірність	Значення
<b>Габаритні розміри:</b>	
- довжина, мм	6000±10
- ширина, мм	2400±5
- висота, мм	2650±5
<b>Внутрішні розміри:</b>	
- довжина, мм	5800
- ширина, мм	2200
- висота, мм	2300
Різниця довжин діагоналей, мм	8
Маса модуля, кг, не більше	4150

б)

Рис. 1. Загальний вигляд (а) та основні параметри (б) просторового металевих каркаса досліджуваного модульного блоку

Джерело: технічна документація виробника

Оцінка ризику пошкодження несучих конструкцій модуля визначається за адаптованою формулою згідно з теорією надійності:

$$P = \Phi\left(\frac{\bar{R} - \bar{S}}{\bar{Z}_m}\right), \quad (1)$$

де  $\Phi$  – значення інтеграла ймовірності (функції Лапласа) для нормального розподілу;  $\bar{R}, \bar{S}$  – математичні очікування параметрів несучої здатності конструкції та зовнішнього сейсмічного або транспортного навантаження відповідно;  $\bar{Z}_m$  – середньоквадратичне відхилення загального допустимого ризику.

Методика розрахунку лінійної багатомасової системи (якою є просторовий каркас модуля) на випадкові транспортні кінематичні впливи базується на системі диференціальних рівнянь вимушених коливань, яка у матричному вигляді має вигляд:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{\ddot{y}_0\}, \quad (2)$$

де  $[M]$  матриця мас системи;  $[K]$  – матриця жорсткості системи;  $[C]$  – матриця демпфування (внутрішнього опору);  $\{y\}$ ,  $\{\dot{y}\}$ ,  $\{\ddot{y}\}$  – вектори переміщень, швидкостей та прискорень вузлів просторової моделі відповідно;  $\{\ddot{y}_0\}$  – вектор випадкових кінематичних прискорень, що діють на систему через опорні вузли під час транспортування.

Використовуючи метод розкладання за формами власних коливань, здійснюється перехід до головних координат. Підстановка матриці власних форм дозволяє отримати систему незалежних диференціальних рівнянь для кожної  $i$ -ої форми коливань:

$$\ddot{q}_i(t) + \gamma\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2q_i(t) = \frac{\eta_{ik}}{M_i}\ddot{x}_{ок}(t), \quad (3)$$

де  $\dot{E}_i$  – колова частота  $i$  о тону власних коливань;  $\gamma$  коефіцієнт непружного опору;  $q_i(t)$  узагальнена координата;  $\eta_{ik}$  коефіцієнт участі  $i$ -ої форми від дії кінематичного збурення за  $k$ -им напрямком.

Реєстрація горизонтальних та вертикальних коливань конструкцій відбувалася через застосування автономного багатоканального апаратно-програмного комплексу. Як первинні перетворювачі використовувалися п'єзоелектричні акселерометри Wilcoxon Research 731A (США) з чутливістю 10  $V/g$ .

Запис вібросигналів здійснювався у частотному діапазоні від 0,3  $Гц$  до 100  $Гц$ . Програма натурних досліджень передбачала послідовну реалізацію трьох ізольованих фаз експерименту, кожна з яких моделювала специфічний етап логістичного життєвого циклу модульної споруди.

Перша фаза базувалася на методі вільних коливань. Ініціація кінематичного збурення здійснювалася шляхом миттєвого зняття статичного навантаження безпосередньо у рівні покриття модульного блоку (рис. 2). До несучих елементів даху за допомогою сталевого троса кріпився еталонний вантаж масою 5  $кг$ . Шляхом механічного перерізання троса генерувався миттєвий динамічний імпульс, необхідний для реєстрації мікросейсмічного відгуку системи.

Друга фаза експерименту відтворювала реальні умови вантажно-розвантажувальних робіт. Здійснювалася безперервна фіксація просторових віброприскорень безпосередньо під час підйому та відриву модуля від землі за допомогою вантажопідіймального крана. Цей

процес генерує специфічний вертикальний удар, який передається на нижній пояс просторового металевго каркаса і викликає його деформативні коливання.

Третя фаза моделювала експлуатаційну транспортну логістику. Досліджуваний великогабаритний модуль жорстко закріплювався на вантажній платформі напівпричепа. Здійснювалося транспортування об'єкта тестовими ділянками з різним типом дорожнього покриття, включаючи індустриальні залізобетонні плити та ґрунтові відрізки. Вимірювальна апаратура функціонувала в режимі безперервного моніторингу з метою фіксації пікових амплітуд транспортних віброприскорень. Слід відмітити, що саме цей етап дозволяє задокументувати найбільш критичні та руйнівні навантаження, які діють на конструкцію до моменту її встановлення на фундамент.

Обробка отриманих масивів сигналів прискорень реалізована через спеціалізоване програмне середовище «Сейсмоніторинг». Ідентифікація фактичних частот власних коливань просторової системи виконувалася за допомогою алгоритмів швидкого перетворення

Фур'є в рамках методики Operational Modal Analysis (OMA). Використання даного математичного апарату є еталонним рішенням для аналізу динамічного відгуку сталевих каркасів [17].

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати спектрального аналізу сигналів мікросейсмічних коливань, ініційованих методом миттєвого зняття навантаження, дозволили ідентифікувати базові динамічні характеристики модульної системи. Обробка сирих даних за допомогою алгоритмів швидкого перетворення Фур'є зафіксувала чіткі піки на частотній осі.

Вузькосмуговий спектр горизонтальних віброприскорень у напрямку поперечної осі демонструє фактичну частоту власних коливань просторового каркаса на рівні 12,25 Гц (рис. 3).

Аналогічний спектральний аналіз кінематичного відгуку у напрямку поздовжньої осі фіксує резонансний пік на відмітці 16,0 Гц. Слід відмітити, що розрахований логарифмічний декремент коливань становить 0,13. Ці емпіричні значення є критично необхідними

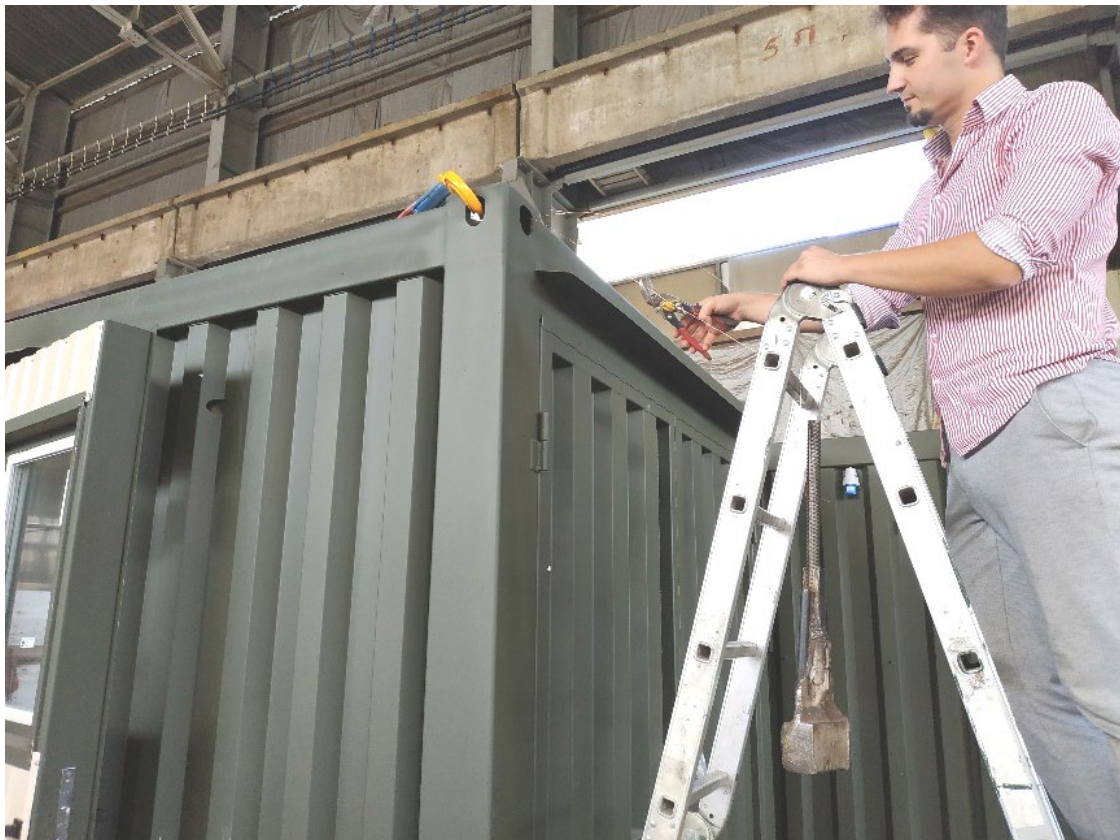


Рис. 2. Практична реалізація методу миттєвого зняття навантаження: фіксація еталонного вантажу та підготовка до ініціації вільних коливань системи

Джерело: розроблено авторами

для подальшої ідентифікації розрахункових СЕ моделей у програмних комплексах, рис. 4.

Аналіз часових реалізацій просторових віброприскорень під час вантажно-розвантажувальних робіт (друга фаза) демонструє

інтенсивний кінематичний відгук несучої системи (рис. 5). Безпосередній відрив модуля від поверхні за допомогою підйомного крана генерує специфічний вертикальний удар з піковою амплітудою прискорення на рівні  $1,4 \text{ м/с}^2$ .

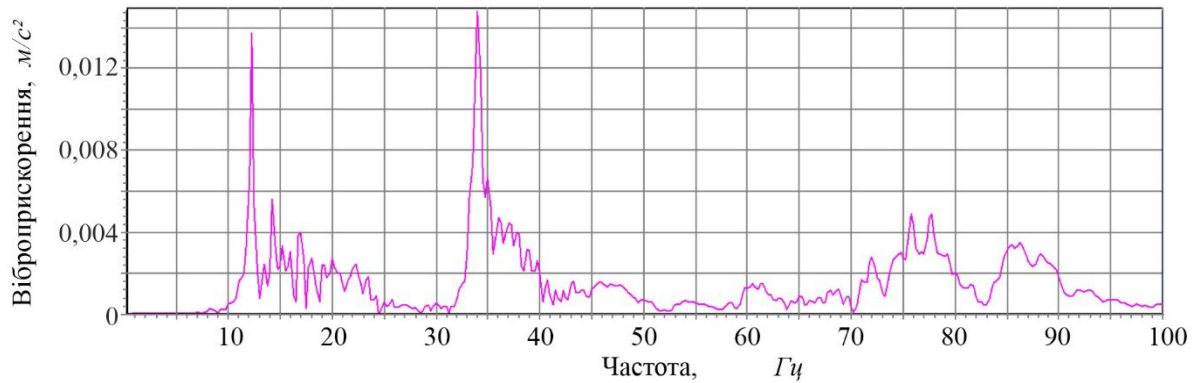


Рис. 3. Вузькосмуговий спектр горизонтальних віброприскорень просторового каркаса у напрямку поперечної осі (ідентифікована частота власних коливань становить 12,25 Гц) (графіки отримані експериментально)

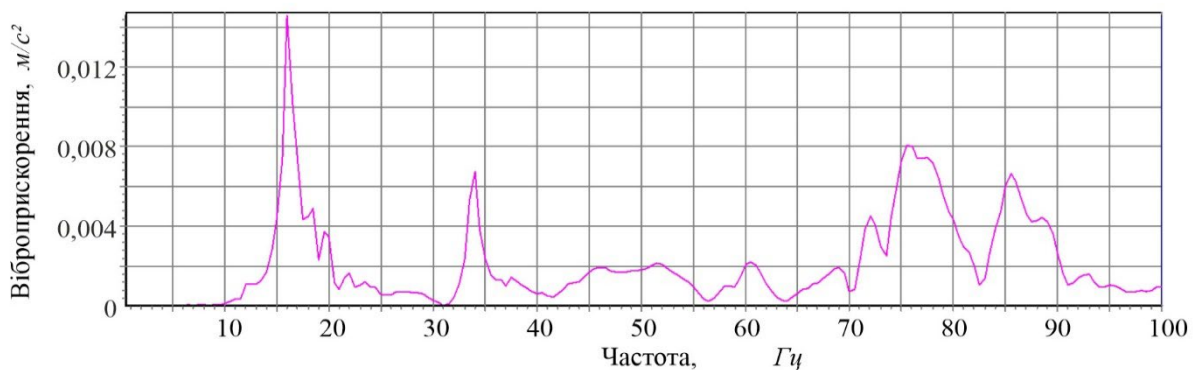


Рис. 4. Вузькосмуговий спектр горизонтальних віброприскорень просторового каркаса у напрямку поздовжньої осі (ідентифікована частота власних коливань становить 16,0 Гц) (графіки отримані експериментально)

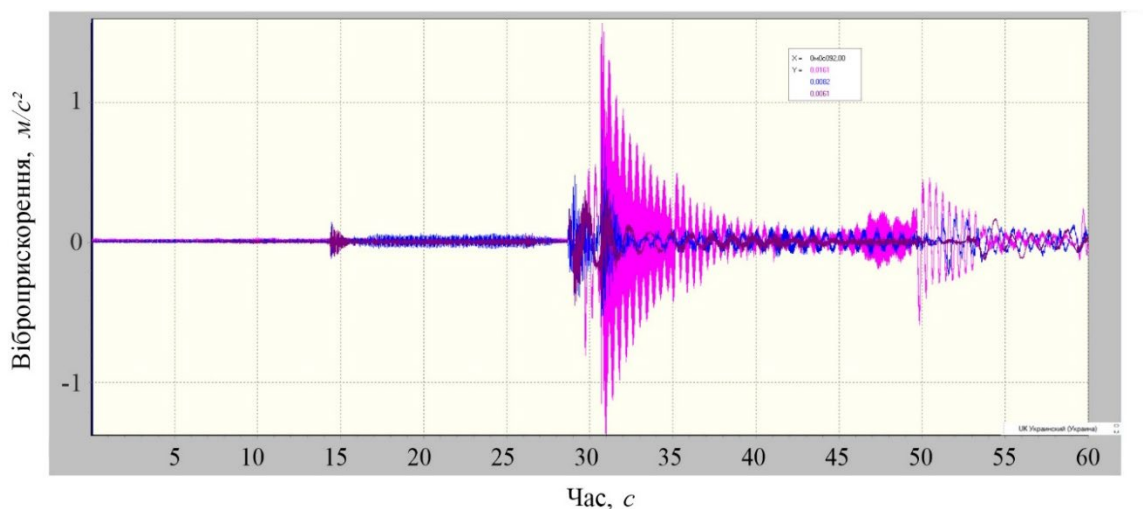


Рис. 5. Часові реалізації (акселерограми) віброприскорень несучої системи під час кінематичного збудження процесом відриву модуля підйомним краном (графіки отримані експериментально)

Найбільш екстремальні показники динамічного впливу зареєстровано під час реалізації третьої фази, яка моделювала логістичне транспортування, рис. 6, 7. Переміщення жорстко закріпленого на платформі напівпричепа модуля територією заводу по залізобетонних дорожніх плитах згенерувало максимальні просторові віброприскорення, значення яких сягали критичної межі у  $9,0 \text{ м/с}^2$  [11].

Детальний аналіз акселерограм вертикальних (рис. 7) та горизонтальних (рис. 8) віброприскорень підлоги і покриття будинку при проїзді трейлера по дорожніх плитах дозволив ідентифікувати переважаючі частоти. Зокрема, частота вертикальних коливань підлоги будинку становить  $0,9 \text{ Гц}$ ; горизонтальних поперечних коливань —  $11,4\text{--}11,8 \text{ Гц}$ , а поздовжніх коливань —  $15,9\text{--}16,2 \text{ Гц}$ .

При проїзді трейлера по дорозі із ґрунтовим покриттям (рис. 9, 10) також зареєстровано критичні віброприскорення на рівні  $9,0 \text{ м/с}^2$  з переважаючими частотами горизонтальних поперечних коливань у діапазоні  $10,8\text{--}11,8 \text{ Гц}$ .

При проїзді трейлера по дорозі із ґрунтовим покриттям (рис. 9, 10) також зареєстровано критичні віброприскорення на рівні  $9,0 \text{ м/с}^2$  з переважаючими частотами горизонтальних поперечних коливань у діапазоні  $10,8\text{--}11,8 \text{ Гц}$ .

Такі безпрецедентно високі показники віброприскорень, що наближаються до значення  $1,0g$  ( $g=9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення сили

тяжіння), фіксуються під час звичайного транспортування. Як наслідок, просторовий каркас модульної будівлі піддається інтенсивному динамічному впливу задовго до того моменту, як він буде встановлений на підготовлений фундамент.

Отримані масиви натурних емпіричних даних стали базисом для розробки та подальшої ідентифікації скінченно-елементної моделі 2 поверхового просторового каркаса модуля в ліцензійному програмному комплексі ЛІРА САПР 2024 (рис. 11), де червоним виділені високо демпфуючі гумо металеві вібро-сейсмоопори [7; 1].

Для нейтралізації зареєстрованих інтенсивних динамічних впливів запропоновано конструктивне рішення модульного будинку у вигляді інтеграції в опорні вузли в основі та між модулями вібро-сейсмоопори (рис. 11).

Розрахункова 5 форма власних коливань моделі будинку приведена на рис. 12 – коливання у напрямку поздовжньої осі модульного будинку.

Теоретичний розрахунок динамічного відгуку (рис. 13) математично доводить, що застосування демпфуючих пристроїв (вібро-сейсмоопор) дозволяє знизити в 1,5 рази амплітуди сейсмічних та динамічних навантажень, що забезпечує транспортування модульних блоків без пошкоджень та безпечну експлуатацію будинків зі сталевим каркасом в високосейсмічних районах України інтенсивністю 8 та 9 балів.

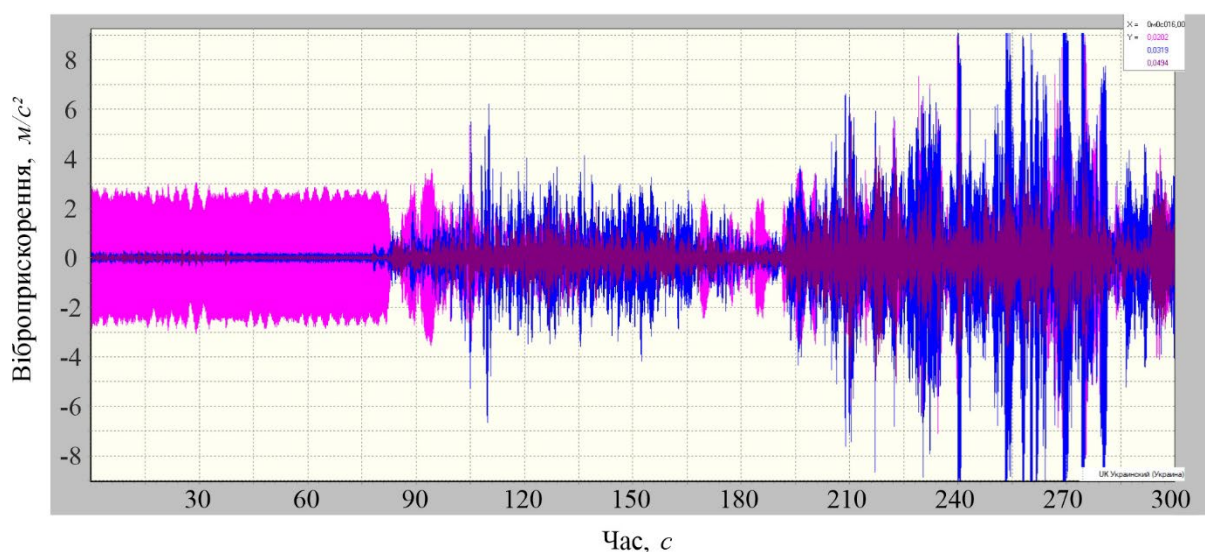


Рис. 6. Часові реалізації просторових віброприскорень каркаса під час транспортування трейлером по залізобетонних плитах (зафіксоване максимальне значення прискорень понад  $9,0 \text{ м/с}^2$ ) (графіки отримані експериментально)

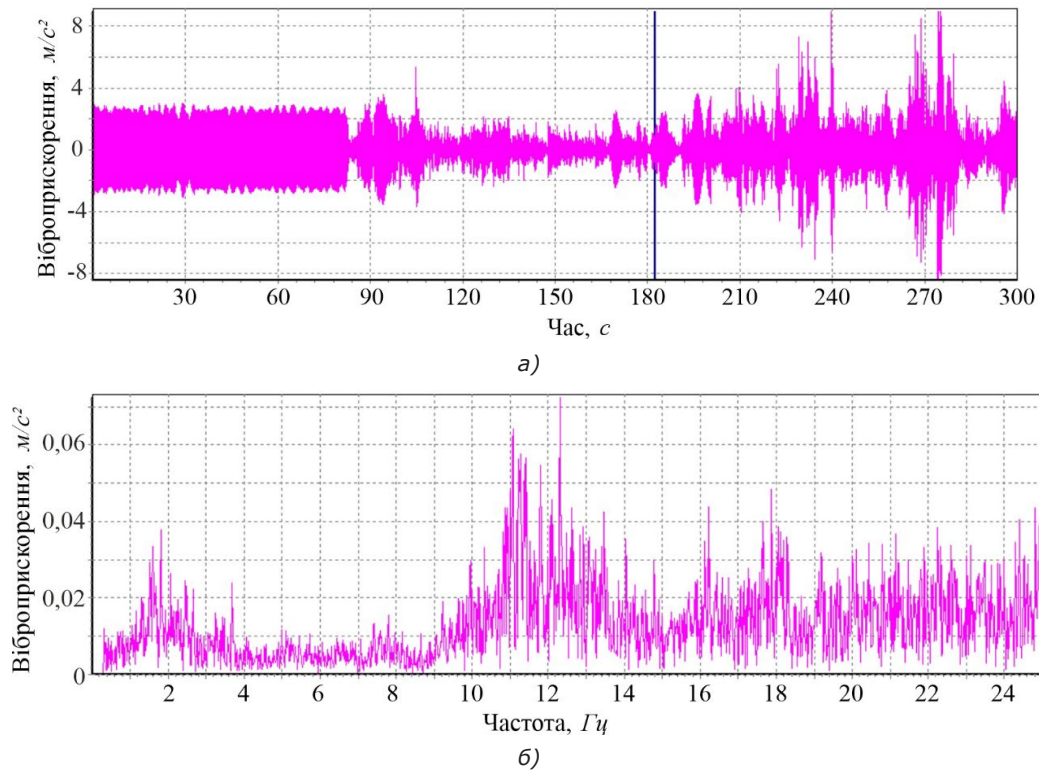


Рис. 7. Акселерограма (а) та вузькосмуговий спектр (б) вертикальних віброприскорень (датчик №5) підлоги будинку при проїзді трейлера по дорожніх плитах (графіки отримані експериментально)

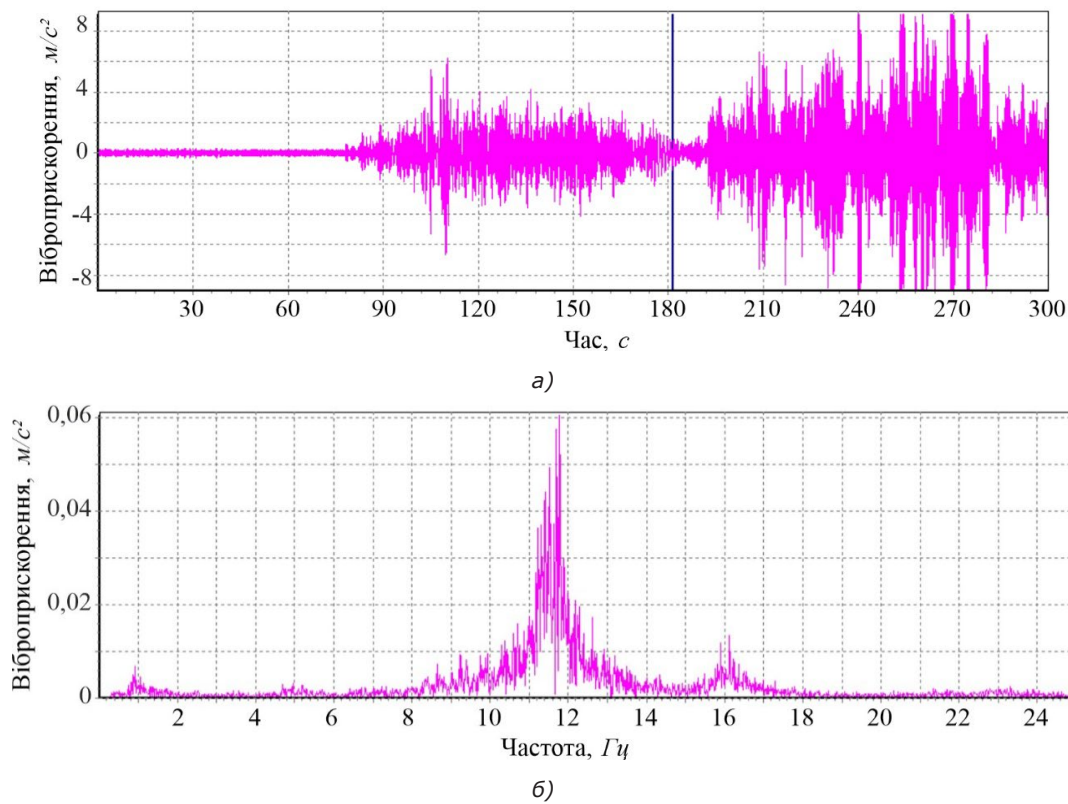


Рис. 8. Акселерограма (а) та вузькосмуговий спектр (б) горизонтальних віброприскорень (датчик №6) покриття будинку за поперечною віссю при проїзді трейлера по дорожніх плитах (графіки отримані експериментально)

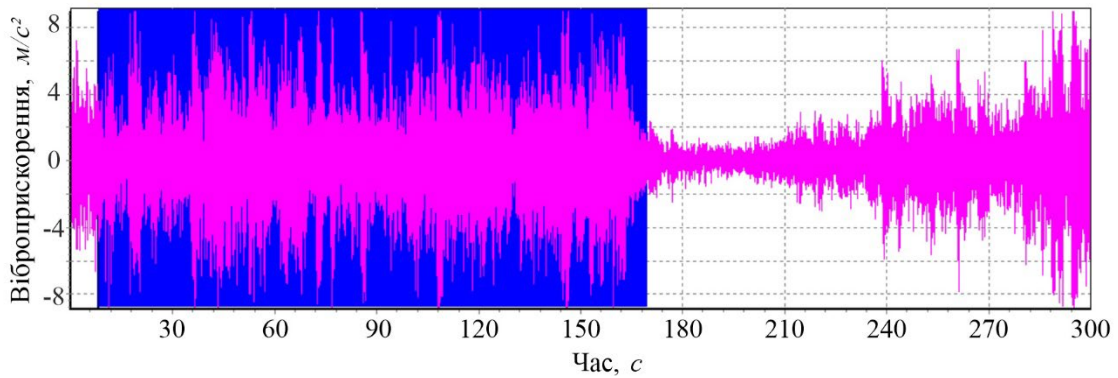


Рис. 9. Акселерограма вертикальних віброприскорень (датчик №5) підлоги будинку при проїзді трейлера по дорозі із ґрунтовим покриттям (графіки отримані експериментально)

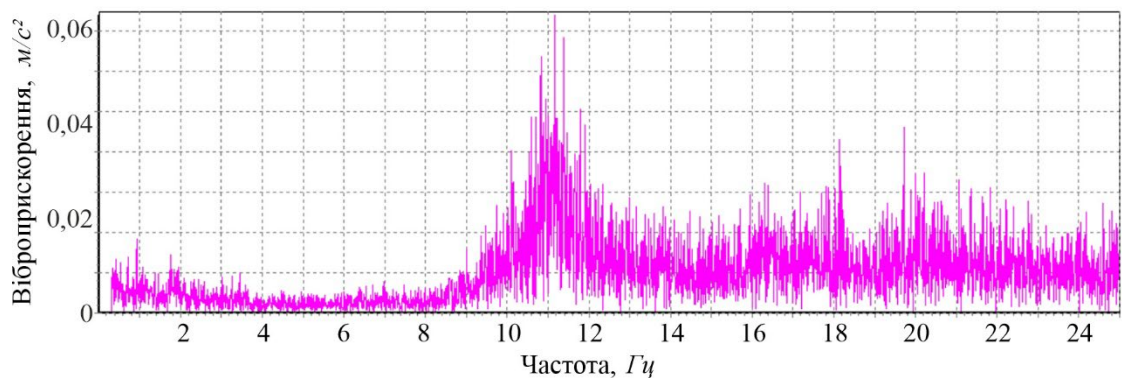


Рис. 10. Вузькосмуговий спектр горизонтальних віброприскорень (датчик №6) покриття будинку за поперечною віссю при проїзді трейлера по дорозі із ґрунтовим покриттям (графіки отримані експериментально)

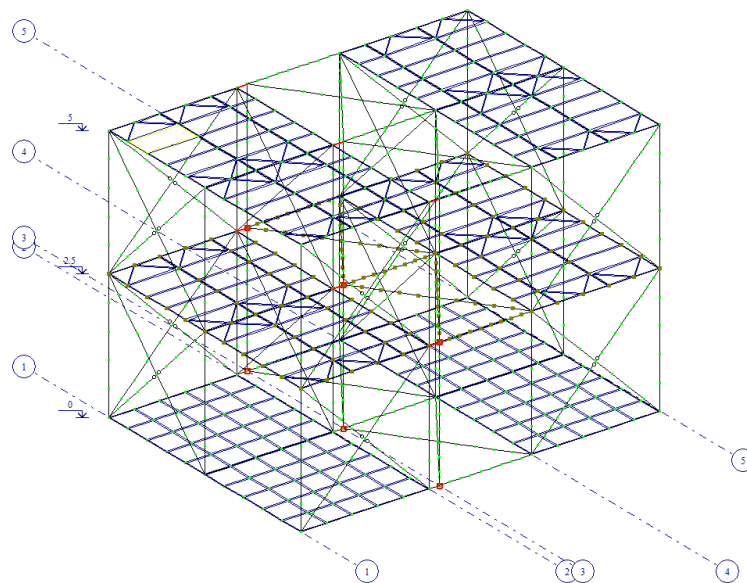


Рис. 11. Базова скінченно-елементна модель просторового металевого каркаса модульного блоку в розрахунковому комплексі (моделювання виконувалося авторами у ПК «ЛІРА САПР»)

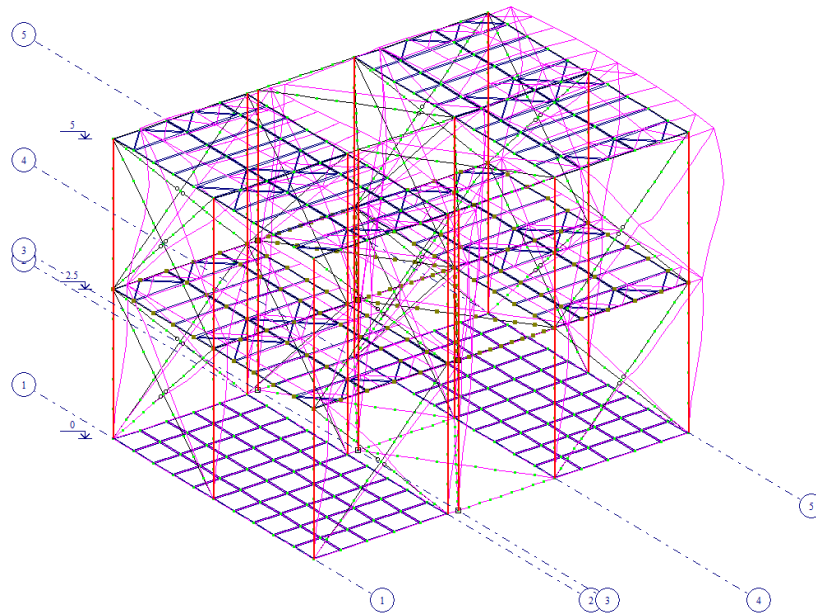


Рис. 12. Розрахункова 5 форма власних коливань просторової системи з 4 модульних блоків заводського виготовлення (моделювання виконувалося авторами у ПК «ЛІРА САПР»)

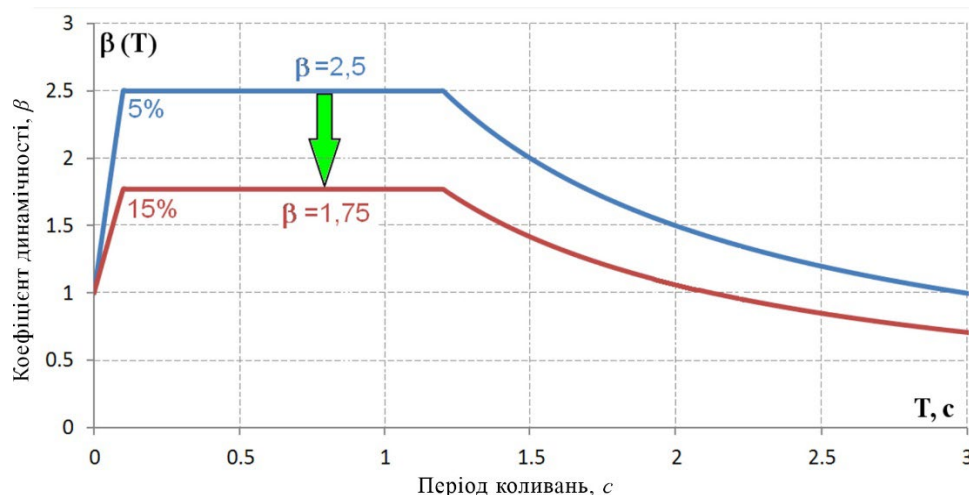


Рис. 12. Розрахункова 5 форма власних коливань просторової системи з 4 модульних блоків заводського виготовлення (моделювання виконувалося авторами у ПК «ЛІРА САПР»)

## ВИСНОВКИ

Практична апробація комплексної методики натурних вібродинамічних випробувань дозволила сформулювати верифіковану базу емпіричних даних щодо фактичного кінематичного відгуку великогабаритних модульних систем. Аналіз отриманих результатів фіксує, що просторовий металевий каркас піддається критичним руйнівним навантаженням задовго до моменту встановлення на фундамент.

Зареєстровані амплітуди віброприскорень під час вантажно-розвантажувальних

робіт ( $1,4 \text{ м/с}^2$ ) та експлуатаційного транспортування ( $9,0 \text{ м/с}^2$ ) об'єктивно доводять надзвичайно високу інтенсивність логістичних збурень. Зокрема, зафіксоване максимальне транспортне прискорення становить понад 91% від прискорення вільного падіння ( $1,0g$ ) і є еквівалентним впливу інтенсивного землетрусу (8–9 балів за шкалою сейсмічної інтенсивності згідно ДСТУ Б В.1.1-28:2010). Такі показники перевищують стандартні розрахункові статичні навантаження більше ніж у 5 разів, створюючи критичні ризики для зварних з'єднань.

Ідентифіковані базові частоти власних коливань системи (12,25 Гц та 16,0 Гц) зафіксовано як еталонні вхідні параметри для подальшої валідації скінченно-елементних моделей у розрахункових комплексах. Задokumentовані екстремальні значення транспортних віброприскорень підтверджують невідкладну необхідність структурної модернізації мобільних будівель. Доцільно зазначити обов'язковість впровадження спеціалізованих систем сейсμοзахисту, зокрема гумово-металевих віброізоляторів та демпфуючих пристроїв, безпосередньо у просторову схему модулів. Це дозволить радикально знизити напружено-деформований стан сталевого каркаса модульного будинку та ризику пошкоджень несучих вузлів і вартісного внутрішнього обладнання на всіх етапах логістичного життєвого циклу.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Віброрейсмакустична опора : пат. 150436 Україна : E02D 27/34, F16F 3/00, F16F 1/36 ; заявл. 27.09.21 ; опубл. 17.02.22, Бюл. № 7/2022.
- [2] ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. Київ : Мінрегіон України, 2014. 110 с.
- [3] ДБН В.1.2-10:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму та вібрації. Київ : Мінрегіон України, 2022. 16 с.
- [4] ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К. : Мінрегіон України, 2018. 26 с.
- [5] Дмитренко Є. А., Усенко М. В., Пилипака О. С., Бакай Т. В., Яковенко І. А. Критичний аналіз експериментальних методів дослідження та факторів, що впливають на зчеплення арматури з бетоном. *Теорія та практика дизайну. Архітектура та будівництво*. 2025. Вип. 4(38). Т. 2. С. 104–119. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.38.2.10>
- [6] Мар'єнков М. Г., Бабік К. М., Лисиця М. І., Хименко Б. О. Сейсμοзахист малоповерхових великопанельних та модульних каркасних будинків від потужних землетрусів. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Архітектура та будівництво*. 2024. № 25. С. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2024.25.022>
- [7] Спосіб захисту великопанельних багатопверхових будинків від землетрусів та осідань основи : пат. 155402 Україна : E04H9/02 E02D27/34 ; заявл. 22.12.21 ; опубл. 29.02.24, Бюл. № 9/2024.
- [8] Яковенко І. А., Бакулін Є. А. Напрями наукових досліджень кафедри будівництва НУБіП України. 36. тез доп. X Міжн. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання». К. : НУБіП України, 2023. С. 488–491.
- [9] Aras F., Sanrı Karapınar I. Dynamic properties of steel structures under different construction stages, ambient temperature and live load. *Revista de la Construcción*. 2021. Vol. 20(1). P. 163–176. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.1.163>
- [10] Gičev V., Kisomi H. B., Trifunac M. D., Jalali R. S., Todorovska M. I. Vertical and shear stresses at the base of a building on a deformable foundation excited by an incident P-wave pulse: Linear and nonlinear soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2026. Vol. 203. No 110048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.110048>
- [11] Godbole S., Lam N., Mafas M., Fernando S., Gad E., Hashemi J. Dynamic loading on a prefabricated modular unit of a building during road transportation. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 18. P. 260–269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2018.03.017>
- [12] Kaliukh I., Trofymchuk O., Berchun V. et al. The excessive tilts elimination in the high-rise buildings using an experimental information and analytical system and digital twins. *Fib Symposium 2024. ReConStruct: Resilient Concrete Structures*. Christchurch, New Zealand 11–13 November 2024. 2024. P. 2326–2336. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85216934515>
- [13] Kelly J. M. Base Isolation: Linear Theory and Design. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 1990. Vol. 6. P. 223–244. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.1585566>
- [14] Lacey A. W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural response of modular buildings – An overview. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 16. P. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2017.12.008>
- [15] Marienkov M., Yakovenko I., Bakulin Y., Babik K. Influence of Vibrations Analysis of the Agricultural Seed Conditioning Industrial Building Complex. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2025. Vol. 712. P. 172–185. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95663-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95663-8_18)
- [16] Munmulla T., Navaratnam S., Thamboo J., Ponnampalam T., Damruwan H., Tsavdaridis K. D., Zhang G. Analyses of Structural Robustness of Prefabricated Modular Buildings: A Case Study on Mid-Rise Building Configurations. *Buildings*. 2022. Vol. 12(8). 1289. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12081289>
- [17] Palmiotto A., Garbellini S., Audisio L., Sulla R., D'Amato M., Gigliotti R. Seismic behaviour of steel modular buildings: numerical analysis and comparisons between different design solutions. *Procedia Structural Integrity*. 2023. Vol. 44. P. 1156–1163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.150>
- [18] Ponomarov P.Y., Kostyra N.O. Stress-strain state of the elevator working tower floor under dynamic. *Теорія та практика дизайну. Архітектура та будівництво*. 2025. № 36. С. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.11>
- [19] Trofymchuk O.M., Kaliukh Iu.I., Berchun Ya.O., Marienkov M.G., Khymenko B.O., Tytarenko V.A., Vapnichna V.V. Hybrid Numerical Method for the Evaluation of the Seismic Protection of Buildings Based on Digital Twins. *Journal of Mathematical Sciences*. 2025. Vol. 291. P. 883–899. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-025-07858-2>
- [20] Zhang X., Nie Y., Qian K., Xie X., Zhao M., Zhao Z., Zheng X. Y. Experimental Investigation of the Seismic Behavior of a Multi-Story Steel Modular Building Using Shaking Table Tests. *Buildings*. 2025. Vol. 15. 2661. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15152661>

## REFERENCES

- [1] Bulat A.F. & oth. (2022). Vibroseismoakustychna opora [Vibroseismoacoustic support] (Patent of

Ukraine No. 150436). Ukrainian Intellectual Property Institute. [in Ukrainian].

[2] Ministry of Regional Development of Ukraine. (2014). Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy [Construction in seismic regions of Ukraine] (DBN V.1.1-12:2014). [in Ukrainian].

[3] Ministry of Regional Development of Ukraine. (2022). Zakhyst vid shumu ta vibratsii [Protection against noise and vibration] (DBN V.1.2-10:2021). [in Ukrainian].

[4] Ministry of Regional Development of Ukraine. (2018). Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud [General principles of ensuring reliability and structural safety of buildings and structures] (DBN V.1.2-14:2018). [in Ukrainian].

[5] Dmytrenko, Ye. A., Usenko, M. V., Pylypaka, O. S., Bakai, T. V., & Yakovenko, I. A. (2025). Krytychnyi analiz eksperymentalnykh metodiv doslidzhennia ta faktoriv, shcho vplyvaiut na zchepлення armatury z betonom [Critical analysis of experimental research methods and factors affecting the bonding of reinforcement with concrete]. *Theory and Practice of Design. Architecture and Construction*, 4(38), Vol. 2, 104–119. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.38.2.10> [in Ukrainian].

[6] Marienkov, M. H., Babik, K. M., Lysytsia, M. I., & Khymenko, B. O. (2024). Seismozakhyst malopoverkhovykh velykopanelnykh ta modulnykh karkasnykh budynkiv vid potuzhnykh zemletrusiv [Seismic protection of low-rise large-panel and modular frame buildings from powerful earthquakes]. *Bulletin of the Lviv National University of Nature Management. Architecture and Construction Series*, 25, 22–31. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2024.25.022> [in Ukrainian].

[7] Marienkov, M. H., et al. (2024). Sposib zakhystu velykopanelnykh bahatopoverkhovykh budynkiv vid zemletrusiv ta osidan osnovy [Method of protection of large-panel multi-story buildings from earthquakes and soil settlement] (Patent of Ukraine No. 155402). Ukrainian Intellectual Property Institute. [in Ukrainian].

[8] Yakovenko, I. A., & Bakulin, Ye. A. (2023). Napriamy naukovykh doslidzhen kafedry budivnytstva NUBiP Ukrainy [Scientific research directions of Construction Department, NULES of Ukraine]. In *Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference "Kramarivski readings"* (pp. 488–491). NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian].

[9] Aras, F., & Sanrı Karapınar, I. (2021). Dynamic properties of steel structures under different construction stages, ambient temperature and live load. *Revista de la Construcción*, 20(1), 163–176. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.1.163> [in English].

[10] Gičev, V., Kisomi, H. B., Trifunac, M. D., Jalali, R. S., & Todorovska, M. I. (2026). Vertical and shear stresses at the base of a building on a deformable foundation excited by an incident P-wave pulse: Linear and nonlinear soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 203, no 110048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.110048> [in English].

[11] Godbole, S., Lam, N., Mafas, M., Fernando, S., Gad, E., & Hashemi, J. (2018). Dynamic loading on a prefabricated modular unit of a building during road transportation. *Journal of Building Engineering*, 18, 260–269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.03.017> [in English].

[12] Kaliukh, I., Trofymchuk, O., & Berchun, V. (2024). The excessive tilts elimination in the high-rise buildings using an experimental information and analytical system and digital twins. In *Fib Symposium 2024. ReConStruct: Resilient Concrete Structures*, 2326–2336. URL : <https://www.scopus.com/pages/publications/85216934515> [in English].

[13] Kelly, J. M. (1990). Base isolation: Linear theory and design, 6, pp. 223–244. Earthquake Engineering Research Center. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.1585566> [in English].

[14] Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., & Bi, K. (2018). Structural response of modular buildings – An overview. *Journal of Building Engineering*, 16, 45–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.12.008> [in English].

[15] Marienkov, M., Yakovenko, I., Bakulin, Y., & Babik, K. (2025). Influence of vibrations analysis of the agricultural seed conditioning industrial building complex. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 712, 172–185. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95663-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95663-8_18) [in English].

[16] Munmulla, T., Navaratnam, S., Thamboo, J., Ponnampalam, T., Damruwan, H., Tsavdaridis, K. D., & Zhang, G. (2022). Analyses of structural robustness of prefabricated modular buildings: A case study on mid-rise building configurations. *Buildings*, 12(8), 1289. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12081289> [in English].

[17] Palmiotta, A., Garbellini, S., Audisio, L., Sulla, R., D'Amato, M., & Gigliotti, R. (2023). Seismic behaviour of steel modular buildings: numerical analysis and comparisons between different design solutions. *Procedia Structural Integrity*, 44, 1156–1163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.150> [in English].

[18] Ponomarov, P. Y., & Kostyra, N. O. (2025). Stress-strain state of the elevator working tower floor under dynamic. *Theory and Practice of Design. Architecture and Construction*, 36, 116–125. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.11> [in Ukrainian].

[19] Trofymchuk, O. M., Kaliukh, Iu. I., Berchun, Ya. O., Marienkov, M. G., Khymenko, B. O., Tytarenko, V. A., & Vapnichna, V. V. (2025). Hybrid numerical method for the evaluation of the seismic protection of buildings based on digital twins. *Journal of Mathematical Sciences*, 291, 883–899. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-025-07858-2> [in English].

[20] Zhang, X., Nie, Y., Qian, K., Xie, X., Zhao, M., Zhao, Z., & Zheng, X. Y. (2025). Experimental investigation of the seismic behavior of a multi-story steel modular building using shaking table tests. *Buildings*, 15(15), 2661. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15152661> [in English].

**ABSTRACT*****Marienkov M., Khymenko B. Methodology and practical approbation of in-situ vibrodynamic testing of large-scale metal modular systems under transportation loading***

**Purpose** of this study is the development, theoretical justification, and practical approbation of a comprehensive methodology for conducting in-situ vibrodynamic testing of large-scale spatial modular systems directly in field conditions at various stages of their logistic life cycle.

**Methodology.** The object of the study is a large-scale fully prefabricated metal module (an autonomous boiler house). The mass of the system is 4500 kg, featuring a significant asymmetric concentrated load. Empirical measurements of vibration accelerations and natural frequencies of the spatial framework were implemented using a specialized hardware-software complex. Data registration was performed at three stages: initiation of free vibrations by the method of instantaneous load removal, kinematic excitation during the detachment of the system by a lifting crane, and transportation of the module on roads with different types of pavement. Fast Fourier transform algorithms were used to process the obtained data arrays.

**Results.** The obtained array of verified empirical data proves the fact of intense destructive impact on the spatial framework long before it is put into operation. The processes of transportation and installation generate critical kinematic excitations that are not considered in standard static calculations. Spectral analysis recorded the actual natural frequencies of the framework: 12.25 Hz along the transverse axis and 16.0 Hz along the longitudinal axis. During loading and unloading operations, peak vertical vibration accelerations reached 1.4 m/s<sup>2</sup>. Direct transportation of the module generated critical values of spatial vibration accelerations approaching the limit of 9.0 m/s<sup>2</sup>, which is equivalent to the impact of a high-intensity earthquake.

**Scientific novelty.** For the first time, reliable empirical data on the kinematic response of large-scale metal modular systems under real transport and installation loads were obtained. It has been proven that logistic dynamic impacts can significantly exceed operational static loads in intensity, forming a complex dynamic contour of the system. The identified basic natural frequencies are fixed as reference input parameters for further validation of finite element models.

**Practical relevance.** The market for prefabricated buildings in Ukraine currently demonstrates the mass production of uncertified modular structures. A total absence of specialized state building codes regulating the resistance of such systems to logistic and operational dynamic loads is recorded. The obtained results confirm the urgent need for structural modernization of mobile buildings and the integration of special damping devices (rubber-metal seismic isolators) into the structural scheme, which will reduce deformative risks for bearing nodes.

**Keywords:** large-scale modular systems, in-situ experiment, spatial metal framework, vibrodynamic testing, transportation, kinematic excitation, frequencies and mode shapes.

**AUTHOR'S NOTE:**

**Marienkov Mykola**, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Professor at the Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: m.maryenkov@nubip.edu.ua, orcid: 0000-0002-7246-845X.

**Khymenko Bohdan**, Postgraduate Student at the Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: bogkhym@gmail.com, orcid: 0009-0007-2612-8909.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії  
відкритого доступу CC BY 4.0

