

ВЛАСНІ КОЛИВАННЯ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ МОСТОВИХ СПОРУД

NATURAL OSCILLATION OF BEAM STRUCTURES IN BRIDGE BUILDINGS

Трач В.М., д.т.н., проф., ORCID ID: 0000-0001-9500-2743, **Хоружий М.М., к.т.н.,** ORCID ID: 0000-0002-4546-9270 (Національний університет водного господарства та природокористування)

Trach V.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID ID: 0000-0001-9500-2743, **Khoruzhyi M.M., PhD.,** ORCID ID: 0000-0002-4546-9270 (National University of Water and Environmental Engineering)

Представлено використання можливостей сучасних програмних комплексів для отримання динамічних характеристик балкових конструкцій мостових споруд. Проведене порівняння частот і форм власних коливань в балках, що моделюються різними типами скінченних елементів.

The topic of bridge reconstruction is extremely important and, accordingly, relevant today. Making high-quality design decisions is a crucial stage in the process of their rehabilitation. In this context, obtaining theoretical dynamic characteristics for bridge structures is of great practical importance. Determination of the actual frequencies and modes of natural oscillation forms of the bridge span structure is one of the main tasks to be solved during dynamic testing. Comparison of full-scale experimental data on deflections and oscillation frequencies with theoretical ones can provide a picture of the state of the span structure, taking into account hidden defects that can be significant. In this paper, modern computer software products are used to establish the parameters describing the natural vibrations of bridge girder structures. They are based on the use of the finite element method (FEM) and also allow modeling the behavior of structures under various actions. The paper compares the frequencies and modes of natural oscillations for beams modeled by two types of finite elements. In the first type of modeling, a universal spatial rod FEM was used, and in the second, a spatial universal eight-node isoparametric FEM was used. The modeling and calculations of the beam structure were carried out in the environment of the LIRA-SAPR software package. The reliability of the theoretical calculation was assessed by comparing the experimental data obtained for a steel beam with a box cross section. For the beam structures under consideration, the first three frequencies of natural

oscillations were determined and their corresponding shapes were constructed. The influence of the ratio of the beam length to the cross-sectional height on the natural vibration frequencies is studied.

Ключові слова: міст, балка, динаміка, коливання, частота, bridge, beam, dynamics, oscillations, frequencie

Вступ. Тема мостів є надзвичайно актуальною сьогодні з погляду на необхідність забезпечення безпеки регіонів і держави в цілому. У ході протистояння України повномасштабному збройному наступу російської федерації відбулось руйнування та пошкодження сотень мостів на автомобільних дорогах різного адміністративного підпорядкування [1].

Якість прийнятих проектних рішень це важливий і відповідальний етап у процесі їхнього відновлення.

Аналіз останніх досліджень. Технічна діагностика конструкцій мостів припускає одержання інформації, що спрямована на розробку заходів з утримання та можливого відновленню конструкцій [2]. Загальна методологія технічної діагностики при цьому базується на проведенні статичних і динамічних випробувань [3].

Визначення фактичних частот і форм власних форм коливань прогонової будови мосту є одним з основних завдань, яке вирішується при проведенні динамічних випробувань. Серед названих двох характеристик власних коливань визначення форми коливань є найбільш складним завданням при проведенні динамічних випробувань [6].

В роботі [5] розглянуто результати випробувань конструкції моста з використанням стандартного виду динамічної дії – руху автомобіля з різними швидкостями. Проведено аналіз зареєстрованих сигналів прискорення коливань, а також їх спектрів. Показано, що параметри коливань поймистого та руслового прогонів різняться між собою. При цьому визначено, що значні відхилення від результатів теоретичних розрахунків, як за резонансною частотою коливань, так і за динамічним коефіцієнтом фіксуються для руслового прогону мостової конструкції.

В статті [6] представлено метод визначення форм власних коливань конструкції шляхом вимірювання її власних частот при наявності додаткової маси. А в [7], цим же автором, представлено метод визначення положення дефекту за зміною форм власних коливань конструкції. В той же час, зазначається, що на практиці фактичні форми власних коливань не будуть строго синусоїдальними – свій вплив вносять: наявність невеликих консолей за опорами балок; обпирання на опорні частини нижньою гранню, а не по осі балки; величина відношення висоти балки до її довжини (відмінність від математичної лінії) і т. п.

В роботі [9] розроблена методика визначення вантажопідйомності залізобетонних прогонових будов під залізничну колію, за результатами

статичних або динамічних випробувань. Порівняння фактичних даних за прогинами та частотами з теоретичними дає реальну картину стану прогонової будови враховуючи й скриті дефекти.

Таким чином, отримання теоретичних динамічних характеристик для мостових конструкцій є актуальним, що має також прикладне значення.

Постановка мети і задач досліджень. Для визначення характеристик власних коливань балкових конструкцій в мостових спорудах, було прийнято рішення стосовно використання можливостей сучасних програмних комплексів, які дають змогу математичного моделювання конструкції за використання методу скінченних елементів (МСЕ) [8]. В даній статті проведено порівняння частот і форм власних коливань в балках, які змодельовані різними типами скінченних елементів (СЕ).

Методика досліджень. Моделювання та розрахунок зазначеної конструкції проводився в середовищі програмного комплексу «ЛІРА-САПР» [10]. Для оцінки достовірності розрахунку використані експериментальні результати з [6] для сталюї балки коробчастого перерізу $h \times b = 40 \times 80$ мм з товщиною стінки $t=2$ мм. Довжина балки – $L=4$ м, погонна маса – $g=3,62$ кг/м ($L/h=100$, $h/b=0,5$). Балку було встановлено ширшою стороною на одну рухому і одну нерухому опорні частини, що розташовувались на відстані 5 см від торців балки, отже, розрахунковий прогін становив 3,9 м (рис. 1).

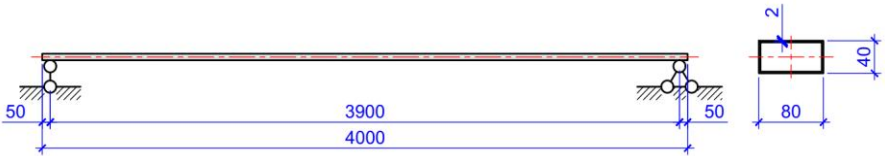


Рис.1. Розрахункова схема балки

При першому варіанті моделювання скінченно-елементної моделі балки використаний універсальний просторовий стержневий СЕ (№10 в бібліотеці СЕ програмного комплексу «ЛІРА-САПР») (рис.2).

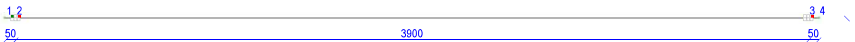


Рис.2. Скінченно-елементна модель балки за варіантом №1

В другому варіанті моделювання використаний універсальний просторовий восьмивузловий ізопараметричний СЕ (№36 в бібліотеці СЕ програмного комплексу «ЛІРА-САПР») (рис.3).

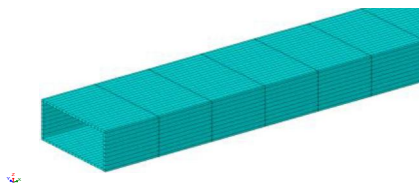


Рис.3. Скінченно-елементна модель балки за варіантом №2

Результати досліджень. Результати визначення власних частот балки за першим варіантом моделювання для трьох перших форм коливань представлені в таблиці 1.

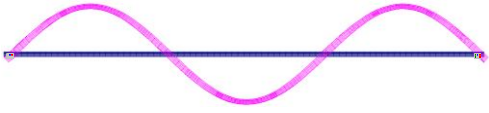
Таблиця 1
Результати СЕ розрахунку власних частот коливань балки (варіант №1)

Форма коливань	Частота	
	Рад/с	Гц
1	55,24	8,769
2	220,89	35,065
3	496,72	79,096

Результати визначення власних частот балки за другим варіантом моделювання для трьох перших форм коливань представлені в таблиці 2.

Таблиця 2
Результати СЕ розрахунку власних частот коливань балки (варіант №2)

Форма коливань	Частота	
	Рад/с	Гц
1	62,34	9,927
2	248,64	39,591

3		556,59	88,629
---	---	--------	--------

В таблиці 3 та на діаграмі рис. 4 представлені співставлення отриманих при скінченно-елементному розрахунку частот власних коливань балки із експериментальними даними із роботи [6].

Таблиця 3

Значення частот власних коливань балки за результатами СЕ розрахунків та експериментальних даних

№ форми	Експеримент [6]	МСЕ В.1	Розбіжн., %	МСЕ В.2	Розбіжн., %
1 форма	8,811	8,796	0,2	9,927	12,6
2 форма	34,442	35,173	2,1	39,591	12,2
3 форма	76,365	79,096	3,6	88,629	11,6

Частота власних коливань, Гц

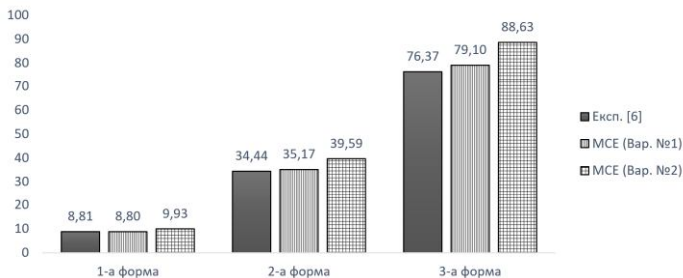


Рис.4. Порівняння частот власних коливань балки за результатами СЕ розрахунку та експерименту

Аналіз представлених результатів показав несуттєве неспівпадіння експериментальних і розрахункових частот власних коливань, що отримані для першого варіанта скінченно-елементного моделювання. Максимальна розбіжність склала 3,6% для третьої форми коливань.

Частоти власних коливань, що отримані при використанні другого СЕ скінченно-елементному моделюванні, відрізняються від експериментальних в середньому на 12%.

Згідно [6], [7] на фактичні форми власних коливань впливає величина відношення висоти балки (h) до її довжини (L) (відмінність від математичної лінії). Проаналізуємо, як відрізнятиметься частота власних коливань при першому і другому варіанті СЕ моделювання для різних співвідношень L/h .

Результати розрахунку власних частот сталюї балки коробчастого перерізу для різних співвідношень її висоти перерізу (h) до довжини (L) для трьох перших форм коливань представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Розрахункові значення частот власних коливань балки для різних співвідношень її висоти перерізу (h) до довжини (L)

L/h	h/b	Власна частота, Гц								
		1-а форма			2-а форма			3-а форма		
		MCE		Δ	MCE		Δ	MCE		Δ
		B.1	B.2	%	B.1	B.2	%	B.1	B.2	%
10 0	0.5	8,8	9,9	11,5	35,1	39,5	11,2	78,9	88,4	10,8
50	1	16,6	17,2	3,4	66,4	68,1	2,6	149,1	150,6	1,0
20	2.5	37,2	37,0	0,6	148,2	141,0	5,1	330,5	261,0	26,7
10	5	68,6	65,5	4,8	269,8	85,4	216,1	474,5	95,4	397,1

На рис. 5-7 представлені залежності, які графічно ілюструють отримані результати розрахунку. Крива 1 відповідає першому варіанту скінченно-елементного моделювання універсальними просторовими стержневими СЕ, а крива 2 – моделі балки, яка утворена універсальними просторовими восьмивузловими ізопараметричними СЕ (варіант 2).

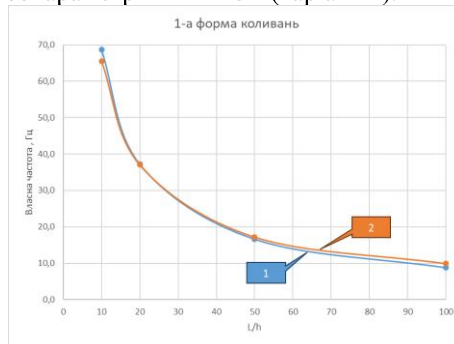


Рис.5. Залежність частоти власних коливань балки від співвідношення її довжини до висоти перерізу (1-а форма коливань): 1 – СЕ №1, 2 – СЕ №2

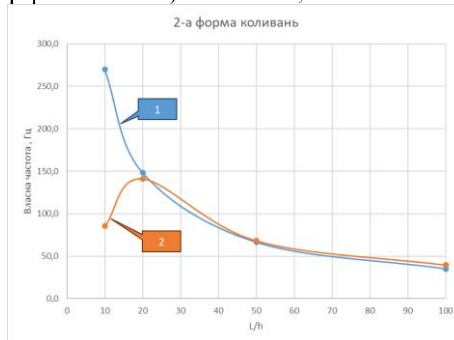


Рис.6. Залежність частоти власних коливань балки від співвідношення її довжини до висоти перерізу (2-а форма коливань): 1 – СЕ №1, 2 – СЕ №2

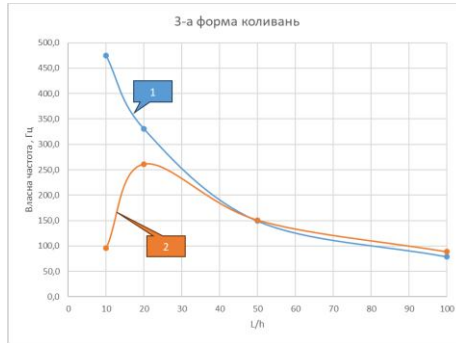


Рис.7. Залежність частоти власних коливань балки від співвідношення її довжини до висоти перерізу (3-а форма коливань): 1 – СЕ №1, 2 – СЕ №2

Аналіз результатів розрахунку, показав, що для балок із співвідношенням довжини до висоти її перерізу $L/h > 20$ тип скінченного елемента при моделюванні не сильно впливає на значення частот власних коливань. Модальний аналіз показав максимальну розбіжність в представлених варіантах 11,5% для першої форми коливань, 11,2% – для другої і 10,8% – для третьої.

Із збільшенням висоти перерізу балки розбіжність між розрахунковими значеннями власних частот, що отримані при різних варіантах СЕ моделювання зростає, що потребує додаткових досліджень. Це пояснюється, в першу чергу, відмінністю модального аналізу балки, що утворена стержневим СЕ і відображає пружну лінію зігнутої осі від об'ємної СЕ моделі (варіант №2). При другому варіанті, із збільшенням висоти балки при динамічному впливі відбувається збільшення коливання коробчастого поперечного перерізу, що підтверджується отриманими формами коливань на рис.8.

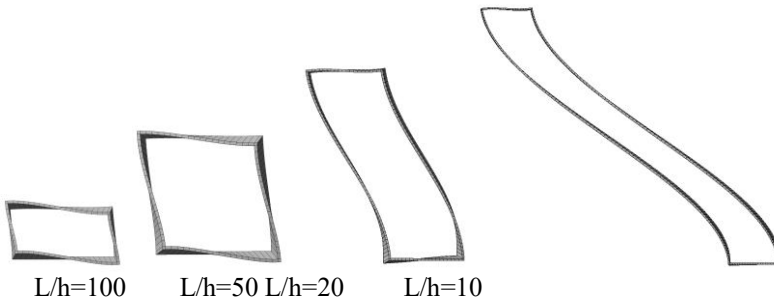


Рис.8. Форми коливань поперечного перерізу СЕ моделі балки (варіант 2)

Висновки та рекомендації. Аналізуючи отримані результати математичного моделювання балки, можна стверджувати, що використання

МСЕ може бути ефективним підходом до визначення динамічних характеристик в балкових конструкціях мостових споруд. Це підтверджується незначною розбіжністю між розрахунковими та експериментальними частотами власних коливань для сталюї балки коробчастого перерізу. Для таких балок, при співвідношенні довжини до висоти її перерізу $L/h > 20$ при моделюванні можна використовувати як стержневі СЕ, так і об'ємні. Ще однією корисною властивістю сучасних розрахункових комплексів, які використовують МСЕ, є можливість відображення отриманих результатів у візуальній формі, що дозволяє виявити характерні особливості в роботі споруди.

1. Каськів В. І., Завгородній С. С., Борисенко М. А. Обстеження мостів, пошкоджених і зруйнованих вибухами. Дороги і мости. Київ, 2023. Вип. 27. С. 168–176.

Kaskiv V. I., Zavhorodnii S. S., Borysenko M. A. Obstezhennia mostiv, poshkodzenykh i zruinovanykh vybukhamy. Dorohy i mosty. Kyiv, 2023. Vyp. 27. S. 168–176.

2. Bien J., Krzyzanowski J., Rawa P., Zwolski J. Dynamic load tests in bridge management. 9-th Int. Bridge management Conf. (April 28-30, 2003, Orlando, USA). IBMC03-20. 18 p.

3. Лучко Й.Й., Коваль П.М., Корнієв М.М. та ін. Мости: конструкції та надійність. Львів: Каменяр, 2005. 989 с.

Luchko Y.I., Koval P.M., Korniiiev M.M. ta in. Mosty: konstruktsii ta nadiinist. Lviv: Kameniari, 2005. 989 s.

4. Коваль П.М., Філоненко С.Ф., Сташук П.М., Корнієнко І.К. Аналіз динамічних характеристик моста. Дороги і мости. Київ, 2008. Вип. 9. С. 119-128.

Koval P.M., Filonenko S.F., Stashuk P.M., Korniienko I.K. Analiz dynamichnykh kharakterystyk mosta. Dorohy i mosty. Kyiv, 2008. Vyp. 9. S. 119-128.

5. Саламахин П.М. Проблемы динамического расчета и определения выносливости автодорожных мостов. Дороги і мости. Київ, 2009. Вип. 11. С. 276-284.

Salamakhyn P.M. Problemy dynamycheskoho rascheta y opredeleniia vynoslyvosty avtodorozhnykh mostov. Dorohy i mosty. Kyiv, 2009. Vyp. 11. S. 276-284.

6. Редченко В.П. Визначення форм власних коливань методом додаткової маси. Дороги і мости. Київ, 2010. Вип. 12. С. 159-164.

Redchenko V.P. Vyznachennia form vlasnykh kolyvan metodom dodatkovoi masy. Dorohy i mosty. Kyiv, 2010. Vyp. 12. S. 159-164.

7. Редченко В.П. Визначення положення дефекту за змінюванням власних форм коливань конструкції. Дороги і мости. Київ, 2011. Вип. 13. С. 118-123.

Redchenko V.P. Vyznachennia polozhennia defektu za zmiuvanniam vlasnykh form kolyvan konstruktsii. Dorohy i mosty. Kyiv, 2011. Vyp. 13. S. 118-123.

8. Загоруйко С.М., М.К. Журбенко, В.А. Мірошник. Определение собственных колебаний автодорожной неразрезной криволинейной в плане эстакады. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. Дніпропетровськ, 2013. Вип. 4. С. 4-11.

9. Солдатов К. І., Журбенко М. К., Мірошник В. А. Визначення класу залізобетонної прогонової будови залізничного моста за частотою (періоду) власних коливань. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 7. С. 57-64.

10. Програмний комплекс ЛІРА-САІР. Приклади розрахунку і проектування. К.: LIRALAND, 2023. 635 с. URL: https://lira.land/public_private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf (дата звернення: 20.11.2023).