

УДК 539.3:69.002.5

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.179138

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРУ КОЛИВАНЬ СПОРУДИ ПРИ ДІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Вабіщевич М. О., Дєдов О. П., Глітін О. Б.

1. Вступ

В сучасних умовах виробництва наявна проблема реструктуризації виробництва з впровадженням новітніх технологій та застосування енергоефективних процесів обробки матеріалів. Тенденції створення нових виробництв лежить в площині використання існуючих будівель і переобладнання їх під виробничі приміщення із застосуванням новітнього обладнання. Така технологія цілком виправдана з точки зору заощадження коштів на спорудження нових конструкцій. Але досить часто існуючі будівлі по ряду причин виявляються непридатні до застосовування того чи іншого технологічного обладнання, і як наслідок, в процесі експлуатації таких споруд можуть бути виявлені аварійні стани. Серед причин, які приводять до негативних наслідків, найчастіше зустрічаються: зношування споруди, порушення вимог монтажу обладнання, відсутність належних розрахунків щодо взаємного впливу обладнання і споруди. Як правило, зношування споруди і правильність виконання монтажних робіт може бути вирішено в межах загального інструментального обстеження будівельного об'єкту. Встановлення ж взаємовпливу між спорудою та обладнанням потребує більш глибоких досліджень і відповідних розрахунків.

Вивченню динамічної поведінки будівельних конструкцій під впливом зовнішніх факторів присвячено ряд робіт. Як правило, динамічну дію на конструкцію розглядають як сейсмічного та техногенного характеру. Так, в роботі [1] наведені результати вимірювань мікросейсмічних впливів та запропонована методика і проведення експериментальних досліджень на основі визначення динамічних параметрів. В роботі [2] запропонований метод оцінки впливу вібрації залізничної дороги на прилеглу забудову та поширення такої вібрації через ґрунтовий масив. В роботі [3] приводяться дослідження застосування додаткових будівельних конструкцій для гасіння вібраційної дії, запропонована модель та методика врахування динамічних параметрів споруди та віброгасника. Експериментальні дослідження на основі вимірювань прискорень наведені у роботі [4]. На основі побудованого спектру коливань визначаються власні частоти коливань. Викладена методика може бути використана при дослідженні більш складних динамічних систем. Вимірювання динамічних характеристик систем з метою діагностики та моніторингу існуючих дефектів у металоконструкціях представлені в роботі [5]. Подана методика застосування експериментальних досліджень вібрації та їх обробка. Запропоновано вдосконалення розрахункової моделі на основі отриманих динамічних характеристик [6]. У роботі [7] подано застосування методу до

нелінійних систем контролю активної вібрації. За відомостями авторів даний метод дозволяє отримати результат без суттєвих знань про дисипативні властивості системи, що звісно дає переваги і скорочення часу на дослідження. Щодо засобів вимірювання, то можна застосовувати різного типу датчики. Так, в роботі [8] застосовують датчики вимірювання прискорення. Дистанційне вимірювання, наведене в роботі [9], базується на застосуванні лазерних та оптичних приладів. А застосування датчика коливань на основі оптичного волокна пропонується в роботі [10]. Звичайно, такі системи збору даних володіють високою точністю та чутливістю. Але застосування їх обмежене високою вартістю.

Зважаючи на значну кількість публікацій та широке коло задач, які в них розглядаються, вивчення поведінки будівельних конструкцій під впливом динамічного навантаження є актуальним напрямком як теоретичних, так і експериментальних досліджень.

Таким чином, *об'єктом досліджень* обрано процес розповсюдження коливань від технологічного обладнання на металоконструкції споруди. А метою роботи є визначення поведінки металевого каркасу виробничого цеху під впливом динамічного навантаження.

2. Методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження виконувались в умовах експлуатації будівельного об'єкту – споруди технологічного цеху, під час проведення інструментального обстеження її технічного стану. Основна задача технічного обстеження полягала у визначенні причин понаднормових коливань зовнішньої стіни технологічного цеху при тривалій роботі технологічного обладнання.

Споруда технологічного цеху в плані має прямокутну форму з габаритними розмірами 53.865x17.70 м. Висота будівлі до нижнього поясу ферм покриття складає 10.535 м.

Колони – виконані з гарячекатаних швелерів № 20, з'єднаних за допомогою переривчастих зварних швів в «короб». Між колонами наявні система вертикальних в'язей.

Покриття – система сталевих ферм, виконаних з рівнополічкових кутиків. В рівні верхніх поясів ферм розміщені прогони покриття, виконані з квадратних гнuto зварних труб, до яких кріпиться конструкція набірної сандвіча. Горизонтальні та вертикальні в'язі між фермами відсутні.

В'язеві елементи. Розпірки між колонами виконані зі зварених у «короб» гнутих швелерів 160x65. Вертикальні в'язі – зі швелерів № 14.

Зовнішні стіни – набірні, комбіновані: нижня частина (до відмітки +5.000) виконана з піноблоків, верхня – набірний сандвіч.

Фундаменти – мілкового закладання, монолітні, залізобетонні, глибиною закладання 1.15 м, ширина підшви 1.30x1.35 м.

Для проведення робіт по вимірюванню та отриманню реальних значень коливань різних точок споруди використовувався сейсмограф ZET 048С (Росія), технічні дані якого наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики акселерометра ZET 048C

Тип датчиків	диференціальні
Число вимірюваних координат	3 (X, Y, Z)
Параметр вимірювання	віброприскорення
Робочий діапазон, Гц	від 0.3 до 400
Чутливість	не більше 10^{-5} м/с ²
Основна відносна похибка, %	не більше ± 10
Робоча температура, °C	від -30 до +50

Виконання досліджень полягало у експериментальному вимірюванні параметрів руху елементів несучих конструкцій в реальному часі з подальшою їх обробкою та визначенням динамічних характеристик таких елементів та споруди в цілому.

У якості динамічного критерію для оцінки стану несучих конструкцій були використані значення власних частот коливань.

Для визначення динамічних параметрів обрані п'ять точок контролю, перелік яких наведений в табл. 2.

Таблиця 2

Розташування точок контролю статичного моніторингу

Точка контролю	Опис конструктивного елемента	Кількість датчиків вимірювання	Параметр, що підлягає контролю
T1K1	Підлога на першому поверсі	3 (X, Y, Z)	Віброприскорення
T1K2	Трубчастий елемент стіни	3 (X, Y, Z)	
T1K3	Підлога настилу другого рівня	3 (X, Y, Z)	
T1K4	Підлога настилу другого рівня	3 (X, Y, Z)	
T1K5	Підлога настилу третього рівня	3 (X, Y, Z)	

Зареєстровані віброграми коливань споруди у точках контролю підлягали обробці за допомогою програмного забезпечення ZETLAB SEISMO за допомогою спектрального аналізу методом дискретного перетворення Фур'є.

Отримані спектри були проаналізовані з метою визначення числових значень частот коливань, які відповідають основним пікам на спектрограмах та є наслідком відгуку конструкції на зовнішні джерела вібрації.

Розрахункова схема каркаса та його несучих елементів прийнята відповідно до відомих правил будівельної механіки. Статична схема рядових поперечних рам прийнята з жорстким обпиранням на фундамент колон, шарнірним спряженням крайніх колон з фермою покриття та з жорстким з'єднанням відправних елементів ригеля у монтажних вузлах. Обпирання покрівельних прогонів на ферми покриття прийняте шарнірним (розрізна схема).

Статичний та модальний аналіз конструкцій виконаний у лінійній постановці з використанням обчислювального комплексу «Scad Office», що базується на використанні методу скінчених елементів.

3. Результати дослідження та обговорення

В ході натурних вимірювань вібрацій конструкцій були отримані віброграми коливань у контрольних точках. Зафіксовані коливання показують, що інтенсивність вібродії на конструкцію зростає із збільшенням висоти та зменшенням відстані до джерел технологічного, зовнішнього впливу.

Коливання стіни каркасу (рис. 1) свідчать про режим, близький до резонансного (режим биття) і є наслідком накладання щонайменше двох частот близьких за числовим значенням. Крім того, одна з них є частотою власних коливань конструкції із відповідною її формою коливань.

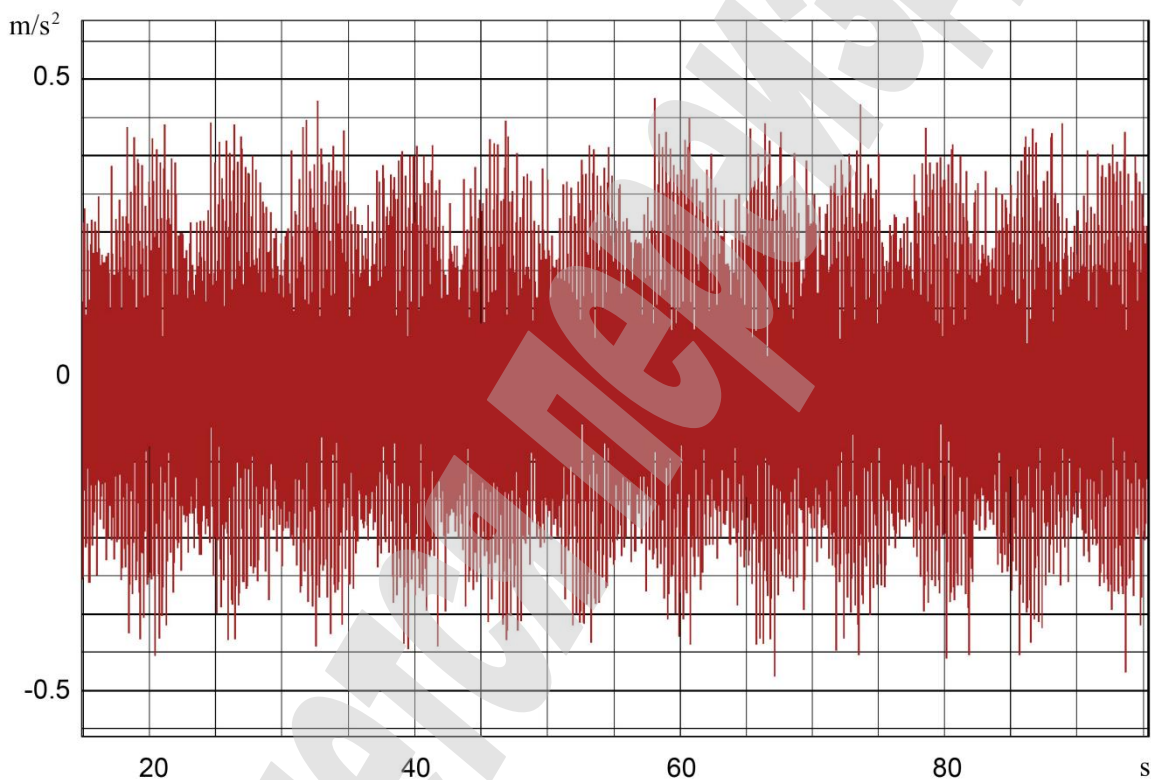


Рис. 1. Віброграма коливань точка контролю Т1К2

В результаті аналізу віброграм отримані спектральний розподіл частот коливань у кожній точці контролю. Спектр коливань у точці контролю Т1К2 (рис. 2) має чітко виражені два піки, значення яких, відповідно, 3.470 та 3.625 Гц. Очевидно, що саме ці значення частот і є причиною виникнення близького до резонансного режиму коливань конструкції стіни, так як піки з іншими (вищими) числовими значеннями частот коливань проявляються меншою мірою.

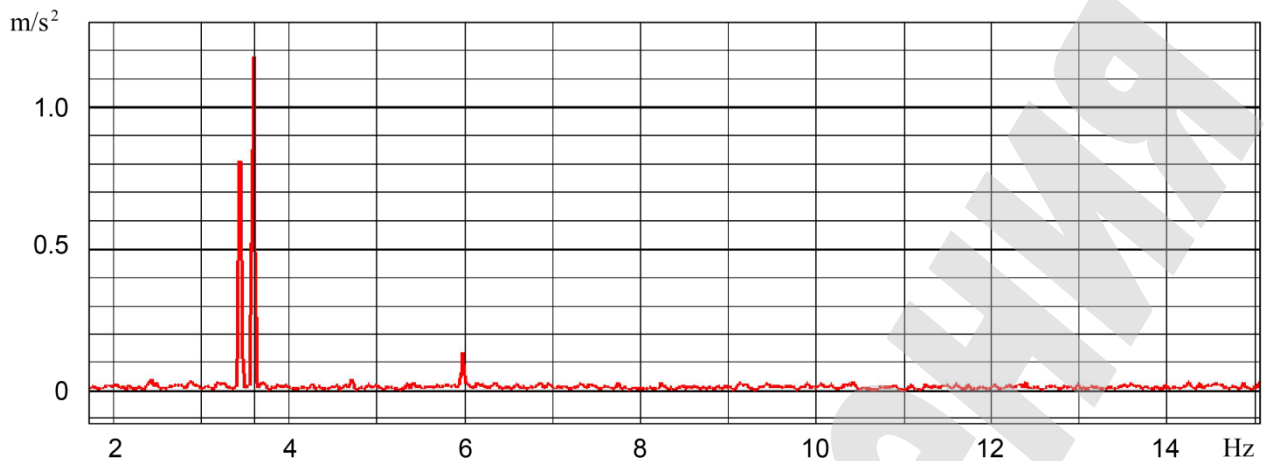


Рис. 2. Спектр частот коливань Т1К2 у діапазоні частот від 0 до 10 Гц

У точках контролю Т1К3–Т1К5 виявлені аналогічні піки з такими ж значеннями частот коливань, але меншої інтенсивності, що свідчить про передавання коливань від огорожувальних конструкцій каркасу споруди до несучих елементів технологічного призначення.

Результати чисельного модального аналізу скінчено елементної моделі каркасу споруди наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Періоди та частоти власних коливань

Навантаження	Номер форми	Частоти		Період сек	Модальні маси (%)			
		рад/сек	Гц		X	Y	Z	
7	Модальний аналіз	1	2.795	0.445	2.248	0.021	80.865	0
		2	4.059	0.646	1.548	56.264	0.378	0.011
		3	4.76	0.758	1.32	5.105	2.722	0
		4	8.934	1.422	0.703	0.078	2.464	0
		5	9.267	1.475	0.678	0.013	0.602	0
		6	11.503	1.831	0.546	23.039	0	0
		7	13.883	2.21	0.453	1.53	0	0
		8	15.838	2.521	0.397	0	0.04	0.03
		9	17.011	2.707	0.369	0.015	0.973	0
		10	17.529	2.79	0.358	0	0.013	0
		11	17.84	2.839	0.352	0	3.175	0
		12	21.095	3.357	0.298	0.017	0.016	0
		13	23.057	3.67	0.273	0.056	0.082	0.047
		14	23.598	3.756	0.266	1.628	0.011	0.019
		15	24.839	3.953	0.253	3.786	0.199	2.021
Сума модальних мас					91.558	91.544	2.154	

За результатами розрахунків виявлено, що частоти 13-ї форми власних коливань (3.67 Гц) фактично співпадають з вимушеними. Саме ці значення

частот призвели до виникнення близького до резонансного режиму коливань конструкції стіни промислової споруди.

4. Висновки

У роботі за результатами вимірювання динамічних параметрів руху елементів несучих конструкцій промислової споруди при дії технологічного обладнання визначені частоти коливань 3.470 та 3.625 Гц. Саме ці значення частот і є причиною виникнення близького до резонансного режиму коливань конструкції стіни (рис. 1). Розроблено розрахункову скінчено-елементну модель каркасу споруди технологічного цеху, коливання якої досліджувалися.

Виконаний статичний та модальний аналіз скінчено-елементної моделі каркасу у лінійній постановці з використанням обчислювального комплексу «Scad Office», що базуються на використанні методу скінчених елементів. Встановлено, що обчислена частота 13-ї форми власних коливань (3.67 Гц) близька до експериментально визначених домінуючих частот коливань. Саме ці значення частот призвели до виникнення близького до резонансного режиму коливань конструкції стіни промислової споруди.

Література

1. Щербіна, С. В., Бріцький, О. І., Ільєнко, В. А., Белов, І. Д., Остапенко, В. В., Лісовий, Ю. В. та ін. (2016). Дослідження провальних явищ в історичній частині Києва на території національного заповідника «Софія Київська». *Геоінформатика*, 2, 68–78.
2. Connolly, D. P., Kouroussis, G., Giannopoulos, A., Verlinden, O., Woodward, P. K., Forde, M. C. (2014). Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58, 37–47. doi: <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.12.003>
3. Cacciola, P., Banjanac, N., Tombari, A. (2017). Vibration Control of an existing building through the Vibrating Barrier. *Procedia Engineering*, 199, 1598–1603. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.065>
4. Kavyanpoor, M., Shokrollahi, S. (2019). Dynamic behaviors of a fractional order nonlinear oscillator. *Journal of King Saud University – Science*, 31 (1), 14–20. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.03.006>
5. Giagopoulos, D., Arailopoulos, A., Dertimanis, V., Papadimitriou, C., Chatzi, E., Grompanopoulos, K. (2017). Computational Framework for Online Estimation of Fatigue Damage using Vibration Measurements from a Limited Number of Sensors. *Procedia Engineering*, 199, 1906–1911. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.424>
6. Bendjama, H., Bouhouche, S., Boucherit, M. S. (2012). Application of Wavelet Transform for Fault Diagnosis in Rotating Machinery. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2 (1), 82–87. doi: <http://doi.org/10.7763/ijmlc.2012.v2.93>
7. Yamamoto, G. K., da Costa, C., da Silva Sousa, J. S. (2016). A smart experimental setup for vibration measurement and imbalance fault detection in rotating machinery. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, 4, 8–18. doi: <http://doi.org/10.1016/j.csmssp.2016.07.001>

8. Jia, Y., Seshia, A. A. (2014). An auto-parametrically excited vibration energy harvester. *Sensors and Actuators A: Physical*, 220, 69–75. doi: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.012>
9. Lezhin, D. S., Falaleev, S. V., Safin, A. I., Ulanov, A. M., Vergnano, D. (2017). Comparison of Different Methods of Non-contact Vibration Measurement. *Procedia Engineering*, 176, 175–183. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.286>
10. Gianti, M. S., Prasetyo, E., Wijaya, A. D., Berliandika, S., Marzuki, A. (2017). Vibration Measurement of Mathematical Pendulum based on Macrobending-Fiber Optic Sensor as a Model of Bridge Structural Health Monitoring. *Procedia Engineering*, 170, 430–434. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.069>