

## РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДИНАМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВЕЛИКОРОЗМІРНОЇ БУДІВЕЛЬНОЇ СПОРУДИ

Гайдайчук В. В., Котенко К. Е., Кедик І. В.

### 1. Вступ

В останні роки спостерігається тенденція збільшення кількості аварій будівельних споруд промислової та цивільної інфраструктури. Так обвалення даху зазнала споруда «Трансавль-парку» в Росії (м. Москва, 2004 р.). Аналогічні, найбільш відомі аварії, трапились у виставковому центрі в польському місті Катовіце (2006 р.), у будівлі катка в місті Бад-Райхель (Німеччина, 2006), у торговому центрі «Махіта» (Рига, Латвія, 2013 р.), у спортивному комплексі заводу медичного скла в м. Полтаві (Україна, 2016 р.). В більшості випадків подібні аварії виникають в зимовий період, супроводжуються людськими жертвами та наносять значні економічні втрати.

В зв'язку з цим, для попередження виникнення аварійної ситуації, або локалізації її масштабу, необхідною є інформація, завчасно відображаюча технічний стан об'єкта та характеризуюча тенденцію розвитку його змін. Джерелом такої інформації можуть бути результати моніторингу, що виконується при експлуатації об'єкта. Разом з тим, сучасна практика контролю технічного стану будівельних об'єктів свідчить про відсутність універсальних методів їх моніторингу. Існуючі моніторингові системи не достатньо відображають реальний стан. Впливає на результати контролю недостатнє врахування конструкційних особливостей об'єкта, вплив на нього внутрішніх і зовнішніх факторів. Недостатньою являється інформаційність контролюємих показників і технічні можливості існуючої апаратури та інше. Тому, дана робота передбачає вирішення проблеми нового методу оцінки технічного стану великорозмірних будівельних споруд та побудови його на основі моніторингової системи.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

*Об'єктом дослідження* є метод контролю і оцінки технічного стану конструкції великорозмірної будівельної споруди Міжнародного виставкового центру (м. Київ, Україна) по показникам її динамічних характеристик.

Забезпечення безаварійності будівельних об'єктів передбачає системний контроль їх технічного стану в процесі будівництва і експлуатації. Здійснюваний з цією метою інженерно-технічний супровід будівельних об'єктів виявив ряд недоліків в існуючих системах контролю і дозволив визначити основні напрямки вдосконалення і розвитку цих систем.

Основним, до недавнього часу, являлось використання статичних деформаційних показників контролюємих об'єктів: переміщень, кутів нахилу, повороту та інше. Характерним прикладом такого контролю є автоматизована система статичного моніторингу великорозмірної будівельної споруди Міжнародного виставкового центру, створена компанією SOLDATA [1]. Ця система

забезпечує автоматизоване лазерне спостереження переміщень металевих конструкцій в установлених точках. Дозволяє визначати зміни абсолютних величин переміщень та, при досягненні ними критичних значень, своєчасно інформувати відповідні технічні служби. Але такий контроль характеризує лише локальний стан конструкцій об'єкта. Він не враховує перерозподіл осьових зусиль і моментів в окремих конструкціях, виникаючий в реальних умовах внаслідок їх взаємодії та інших обставин. Дещо умовною є і прийнята критична величина цього показника. А інженерно-інтуїтивне визначення точок спостереження вносить суб'єктивність в систему контролю і може негативно впливати на об'єктивність його результатів. В зв'язку з цим, виникла необхідність пошуку і використання нових наукових підходів.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – розробка теоретично-експериментального динамічного моніторингу великорозмірної будівельної споруди для оцінки її технічного стану та можливості використання принципів положень розробленого моніторингу в системах контролю інших об'єктів відповідного класу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Створити математичну скінченно-елементну модель споруди.
2. Виконати верифікацію і адаптацію моделі до фактичних експлуатаційних умов.
3. Вибрати контрольовано-вимірювальну апаратуру для оцінки величини частот і форм власних коливань будівельної споруди.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Аналіз літературних даних, виконаного на ранньому етапі дослідження цієї проблеми, засвідчив перспективність використання математичного моделювання контролюємих будівельних об'єктів і використання в системах моніторингу показників динамічних характеристик конструкцій [2]. Більш пізні дослідження підтверджують цей висновок [3, 4] і доцільність використання власних частот, форм власних коливань і декремента затухання коливального процесу [5, 6]. Створений, на основі використання цих показників, динамічний моніторинг засвідчив високу ефективність його використання в системах контролю висотних об'єктів і унікальних споруд [7, 8]. Завдяки використанню динамічних показників, моніторинг дозволяє характеризувати глобальний стан споруди без спеціального спостереження окремих її елементів [8, 9]. Є окремі приклади використання даного моніторингу на відносно простих в конструктивному відношенні об'єктах [10]. Доцільним представляється його використання і в системах контролю складних та пов'язаних із значними ризиками об'єктів. Характерним прикладом таких об'єктів являються великі спортивні арени, великорозмірні будівельні споруди виставкових центрів, промислова інфраструктура та ін. Відзначаючись значною конструкційною наповненістю, різноманітністю елементів конструкцій та експлуатаційними особливостями, такі об'єкти являються трудомісткими для математичного моделювання. А ефективність використання для їх контролю динамічних показників потребує спеціального дослідження. Справа в тому, що споруди цього класу відносяться до категорії так званих «гнучких». Величини трьох перших частот основного тону їх власних коливань, в більшості випадків, не перевищують 1 Гц. Вітрове навантаження на них

значно відрізняється впливом від висотних об'єктів. Внутрішній коливальний процес цих об'єктів поступається інтенсивністю і контрастністю вказаним. Вплив конструкційних і експлуатаційних характеристик є більш суттєвим. Інформаційних матеріалів, які свідчать про використання даного моніторингу для контролю великорозмірних будівельних споруд в доступних джерелах, не було виявлено.

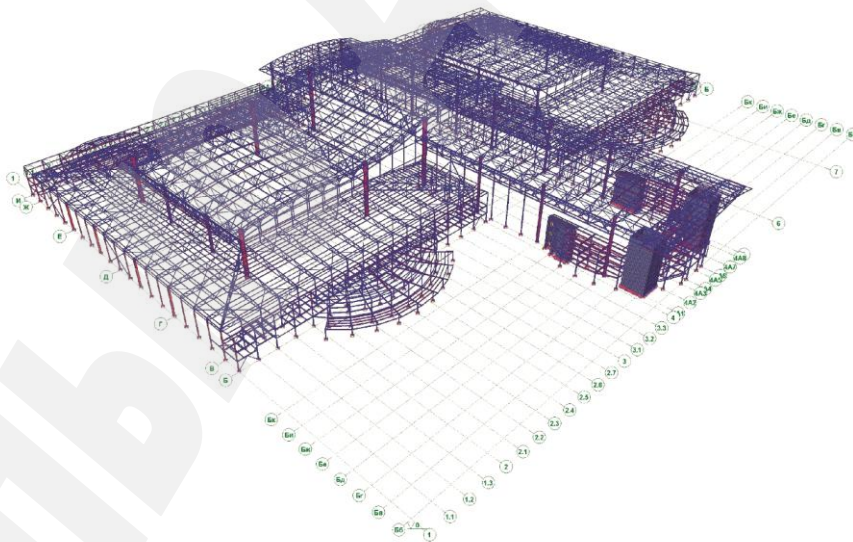
## 5. Методи дослідження

Для досягнення поставленої мети використовувалася теоретично-розрахунковий і експериментальний методи. За допомогою першого була створена математична модель споруди для розрахунків осьових зусиль, згинальних і крутячих моментів, переміщень вузлів, стійкості елементів конструкцій, величин власних частот, форм власних коливань, визначення моніторингових точок та інше. Цю інформативність передбачалось використати при вдосконаленні існуючого статичного моніторингу споруди і для оцінки її глобального технічного стану за допомогою динамічних показників. А експериментальні дослідження передбачали доповнити отриману інформацію і оперативно виявити початковий етап виникнення загрози, засвідчити доцільність і своєчасність внесення змін в математичну модель.

## 6. Результати дослідження

### 6.1. Створення скінченно-елементної моделі споруди

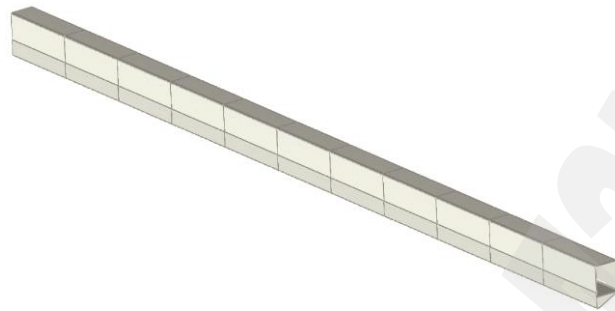
Загальний вид конструкції споруди, яка моделюється, приведено на рис. 1. Для створення її математичної моделі використовувались програмні комплекси SCAD (Росія) і NASTRAN (США). Процедура створення включала: передпроцесорну підготовку, виконання розрахунків диференціальних рівнянь, постпроцесорну обробку і аналіз отриманих результатів.



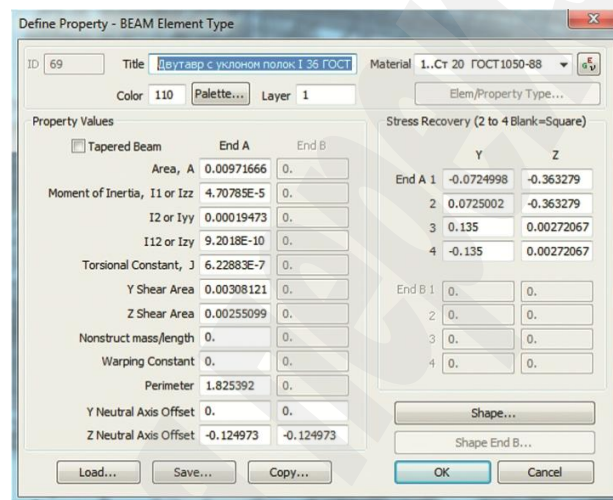
**Рис. 1.** Загальна конструктивна схема споруди:

А, Б, Бб...Бк, В...И – літерні осі споруди; 1, 1.1,...1.3, 2, 2.1,...2.7, 3, 3.1,...3.3, 4, 4.А1...4А8, 5...8 – цифрові осі споруди

На передпроцесорній стадії визначались і вводились в програмні комплекси геометричні характеристики перетину конструкційних елементів споруди і параметри їх фізичних характеристик (рис. 2, 3).



**Рис. 2.** Елементи складеного перетину.  
Труба 200x160x5 (ГОСТ 30245-94) та кутник 200x110x3



**Рис. 3.** Характеристики складеного перетину. Двутавр з ухилом полиць І 36 (ГОСТ 8239-89) та швелер 27У (ГОСТ 8240-97)

Прикладались розрахунків навантаження (табл. 1).

**Таблиця 1**

Навантаження в скінченно-елементній моделі

Номер	Навантаження
L1	Власна вага
L2	Власна вага огорожувальних конструкцій
L3	Технологічне навантаження
L4	Корисне навантаження
L5	Снігове навантаження
L6	Вітрове навантаження вздовж осі X
L7	Вітрове навантаження проти осі X
L8	Вітрове навантаження вздовж осі Y
L9	Вітрове навантаження проти осі Y

Прикладались сполучення навантажень (табл. 2).

Таблиця 2

Сполучення навантажень в скінченно-елементній моделі

Номер	Сполучення (комбінація) навантажень
C1	$1,0*(L1)+1,0*(L2)+0,95*(L3)+0,9*(L5)+0,9*(L6)$
C2	$1,0*(L1)+1,0*(L2)+0,95*(L3)+0,9*(L5)+0,9*(L7)$
C3	$1,0*(L1)+1,0*(L2)+0,95*(L3)+0,9*(L5)+0,9*(L8)$
C4	$1,0*(L1)+1,0*(L2)+0,95*(L3)+0,9*(L5)+0,9*(L9)$
C5	$C1*1,25$
C6	$C2*1,25$
C7	$C3*1,25$
C8	$C4*1,25$

Вибирались типи скінченних елементів для використання їх в програмних комплексах. Виконувалась розбивка конструкцій на скінченні елементи відповідно скінченно-елементним сіткам програмних комплексів. Вводились граничні умови в розрахункову схему (шарніри, в'язі) і виконувались розрахунки диференціальних рівнянь. Отримані результати оброблялись і аналізувались на постпроцесорній стадії і на їх основі робились попередні висновки.

В якості основних невідомих приймалися: переміщення та повороти вузлів розрахункової схеми. Тип скінченого елемента визначався:

- геометричною формою;
- правилами, що визначають залежність між переміщеннями вузлів даного елемента та вузлами системи;
- фізичними законами, визначаючими залежність між внутрішніми зусиллями та внутрішніми переміщеннями;
- набором параметрів (жорсткостей), що входять в опис даного закону.

У зв'язку з цим конструкція задавалась у вигляді, придатному до цього методу (в наборі тіл стандартного типу: Beam, Plate), використовуваних в міжнародній практиці [11].

Вузол в розрахунковій схемі представлявся у вигляді абсолютно жорсткого тіла безкінечно малого розміру. Положення його в просторі при деформаціях системи визначалось координатами центра та кута повороту трьох осей, жорстко зв'язаних з вузлом.

Вузол представлявся у вигляді об'єкта, що має шість ступенів свободи (три лінійних переміщення і три кути повороту). Система рівнянь методу переміщень обиралась шляхом накладання в кожному вузлі всіх в'язів, що забороняло всі вузлові переміщення. Умова нульових зусиль цих в'язів являла собою рівняння рівноваги, а зміщення в'язів – основними невідомими методу. Розрахункова схема задавалась як схема загального вигляду, тобто деформації та невідомі в схемі представлені лінійними переміщеннями точок вздовж напрямків X, Y, Z та поворотами в навколо RX, RY, RZ. Статичний розрахунок схеми виконувався в лінійному вигляді. В розрахунковій схемі були застосовані

узагальнені елементи балки Beam, елементи типу, оболонка Plate, а також елементи жорсткого зв'язку Rigid.

Для елементів типу Beam зусилля виводились в кінцевих перетинах пружної частини (початковій та кінцевій), і в центрі пружної частини. Для балкових елементів можливі наступні зусилля:

N – повздовжня сила;

MK – крутячий момент;

M<sub>Y</sub> – згинальний момент з вектором вздовж осі Y;

QZ – поперечна сила в напрямі осі Z, що відповідає моменту M<sub>Y</sub>;

MZ – згинальний момент відносно осі Z;

Q<sub>Y</sub> – поперечна сила в напрямі осі Y, що відповідає моменту MZ.

Додатні напрями зусиль в балкових елементах прийняті наступними:

– для сил QZ та Q<sub>Y</sub> – в напрямі відповідної осі Z, Y;

– для моментів MK, M<sub>Y</sub>, MZ – проти годинникової стрілки, якщо дивитись з кінця відповідної осі X, Y, Z;

– для повздовжньої сили N додатні значення завжди розтягують балковий елемент.

Загальне число скінченних елементів в моделі дорівнювало 107323, а число вузлів 97591.

Аналіз пружного деформування конструкції на кожному кроці реалізується розв'язанням системи лінеаризованих алгебраїчних рівнянь для скінченно-елементної моделі:

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} - \{r\}, \quad (1)$$

де [K] – лінеаризована матриця жорсткості системи;  $\{\Delta u\}$  – шуканий вектор приросту переміщень;  $\{\Delta f\}$  – вектор приростів заданих сил;  $\{r\}$  – вектор нев'язок. У зв'язку з тим, що за деякої комбінації внутрішніх сил попереднього навантаження, конструкція може втратити стійкість, було досліджене випучування елементів конструкції на основі постановки проблеми на власні значення для лінеаризованої системи алгебраїчних рівнянь [3–5]:

$$|K + \lambda_i L| = 0, \quad (2)$$

де K – матриця жорсткості для ненапруженої конструкції; L – різностороння матриця жорсткості;  $\lambda_i$  – шукані власні значення параметра навантаження (параметра переднавантаження); прямі дужки означають знак обчислення визначника.

Частоти та форми власних коливань визначаються на основі частотного аналізу. Рівняння руху елементів конструкції записуються в матричній формі:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (3)$$



де  $[K]$  та  $[M]$  – відповідно матриці жорсткості та мас, що відображають пружні та інерційні характеристики конструкції;  $\{u\}$  – вектор динамічних переміщень; точками над буквою позначено диференціювання по часу.

Після врахування гармонічного закону власних коливань конструкції аналіз системи рівнянь руху (3) зводиться до проблеми Штурма-Ліувіля для алгебраїчної системи:

$$[K + \lambda_i L] \{\psi_i\} = 0, \quad (4)$$

де  $\{\psi_i\}$  – власний вектор (мода коливань), що відповідає власному значенню (кругова чи циклічна частота).

Аналогічним способом створювалась скінченно-елементна модель для виконання розрахунків програмним комплексом SCAD. Враховувались особливості і вимоги програмного комплексу. Кількість скінченних елементів моделі в SCAD складала 29322, а кількість вузлів 18993.

## 6.2. Верифікація і перевірка адекватності скінченно-елементної моделі

Заключний етап досліджень включав верифікацію створеної моделі для врахування нею впливів від постійних та тимчасових навантажень, діючих на будівельну споруду. Оцінку об'єктивності розрахунків та реагування моделлю на зміни в технічному стані споруди. Перевірка включала виявлення впливу навантажень від ваги огорожувальних конструкцій та технологічного устаткування. В програмному комплексі NASTRAN ці навантаження приєднувались до маси конструкцій через неконструкційні маси. У комплексі SCAD така операція виконувалась через динамічні завантаження.

Паралельно, сейсмостанцією ZET 048-C, замірялись віброприскорення коливань споруди і з їх допомогою визначались фактичні величини власних частот. Результати розрахунків і експериментальні виміри засвідчили їх збіжність (табл. 3). Збіжність підтверджують результати розрахунків переміщень виконані обома програмними комплексами (табл. 4) і величини осьових зусиль в елементах великопрольотної (L=60 м) підкроквяної ферми ПФ6 [12]. Аналіз 16-ти її елементів виявив максимальну розбіжність зусиль (2.33 %) в центральному розкосі ферми і мінімальну (0.23 %) в крайній її вертикальній стійці. При цьому абсолютні величини зусиль розрахованих комплексом NASTRAN були більшими порівняно з їх величин в SCAD.

Таблиця 3

Частоти власних коливань

Номер тону частоти	Частота власних коливань, Гц		
	Розрахункова у програмних комплексах		Експериментальна, за даними натурних вимірювань
	SCAD	NASTRAN	
1	0.506	0.492	0.49–0.51
2	0.556	0.538	0.53–0.57
3	0.660	0.668	0.66–0.69

Таблиця 4

Переміщення вузлів по Z, (мм) в моделях, створених у SCAD та NASTRAN

Переміщення вузлів по Z, мм (вертикальні прогини)			
SCAD		NASTRAN	
min	max	min	max
-37.04	7.59	-34.86	7.48
-127.05	28.57	-133.41	28.32
-174.04	39.24	-187.00	39.86
-174.46	39.39	-187.26	39.92
-182.41	41.14	-193.37	41.26
-182.75	41.22	-193.01	41.19
-217.55	49.05	-233.75	49.83
-218.08	49.24	-234.08	49.90
-228.01	51.42	-241.71	51.57
-228.44	51.53	-241.27	51.49

Перевірявся також вплив жорсткості з'єднань несучих колон з фундаментами, просідання ґрунтової основи під колонами, поява пластичного шарніру в місцях з'єднань ферм з колонами. Такі пошкодження характерні для реальних умов і не виключається їх поява в споруді, яка аналізується. Отримані результати показали ефективність реагування на них моделлю і засвідчують їх небезпечність (табл. 5).

Таблиця 5

Величини трьох перших частот власних коливань

Номер власної частоти	Величина трьох перших частот споруди, Гц				
	Частота при нормативному стані споруди	Частота при умовному пошкодженні конструкції			
		Просідання ґрунтової основи під колонами типу К1		Пластичний шарнір в з'єднанні ферми Ф7 та колони типу К2	
		Величина частоти	Відхилення від нормативного стану, %	Величина частоти	Відхилення від нормативного стану, %
1	0.492	0.474	3.7	0.489	0.6
2	0.538	0.531	1.3	0.531	0.7
3	0.668	0.620	7.8	0.668	0.08

Реагування моделлю на зміни в технічному стані споруди оцінювались величинами трьох перших частот основного тону власних коливань.

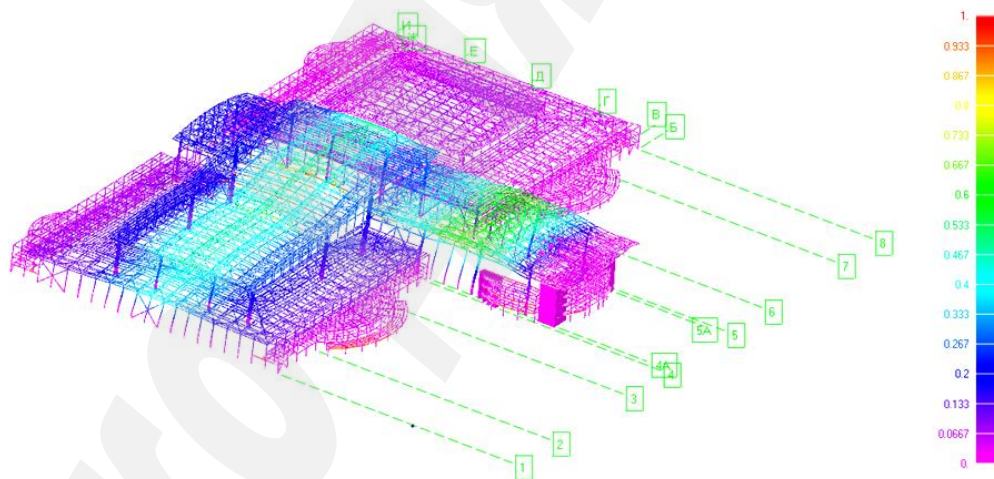
### 6.3. Приклади практичного використання скінченно-елементної моделі

В силу експлуатаційної специфіки, будівельна споруда Міжнародного виставкового центру в багатьох випадках зазнає негативних впливів від додаткових

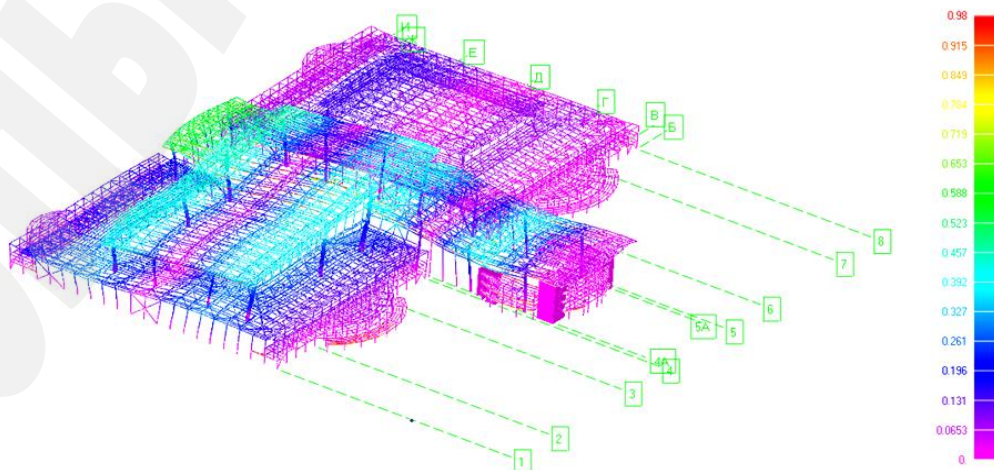


навантажень її конструкцій. Такі навантаження виникають при використанні нового, непередбаченого проектом, технологічного устаткування, значною вагою зразків демонстраційних експонатів, змінами технологічних процесів та інше. Виявлення цих впливів і оцінку їх небезпеки дозволяє використання скінченно-елементної моделі. З допомогою моделі були оптимізовані умови, які гарантують безпеку обслуговуючого персоналу і відвідувачів виставкових експозицій.

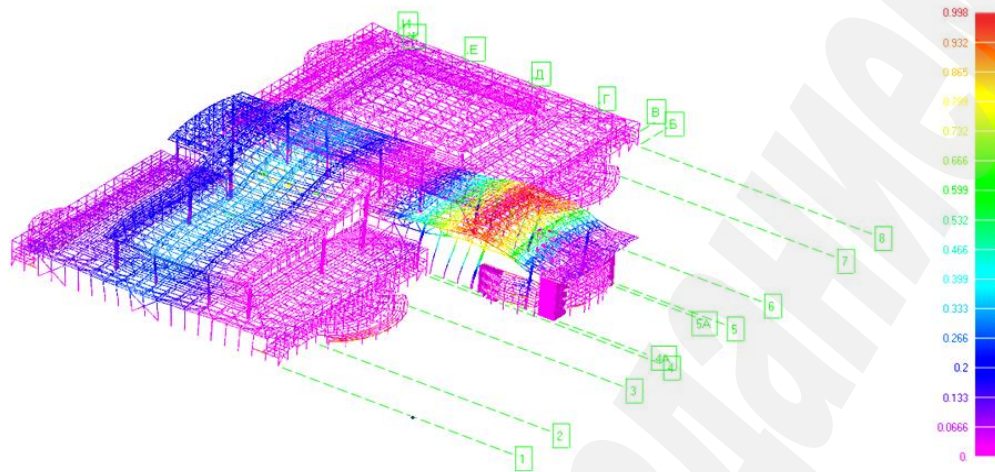
Позитивні результати були отримані і при використанні скінченно-елементної моделі для вдосконалення системи моніторингу споруди. З її допомогою була встановлена мінімально необхідна кількість точок для виконання спостереження за технічним станом споруди (моніторингові точки). Визначені їх місця на конструкціях споруди для використання в системі експериментально-динамічного моніторингу. За допомогою скінченно-елементної моделі стало можливим визначити величини амплітуд власних коливань споруди при різних власних частотах. Ці дослідження дозволили розширити інформаційні можливості модального показника. Виникла перспектива використання абсолютної величини його амплітуди по аналогії з її використанням для оцінки параметрів вимушених коливань, які допускаються [13]. Ефективність засвідчили і розрахунки напрямків коливання при 3-х нижчих власних частотах споруди (рис. 4, а, б, в).



а



б



6

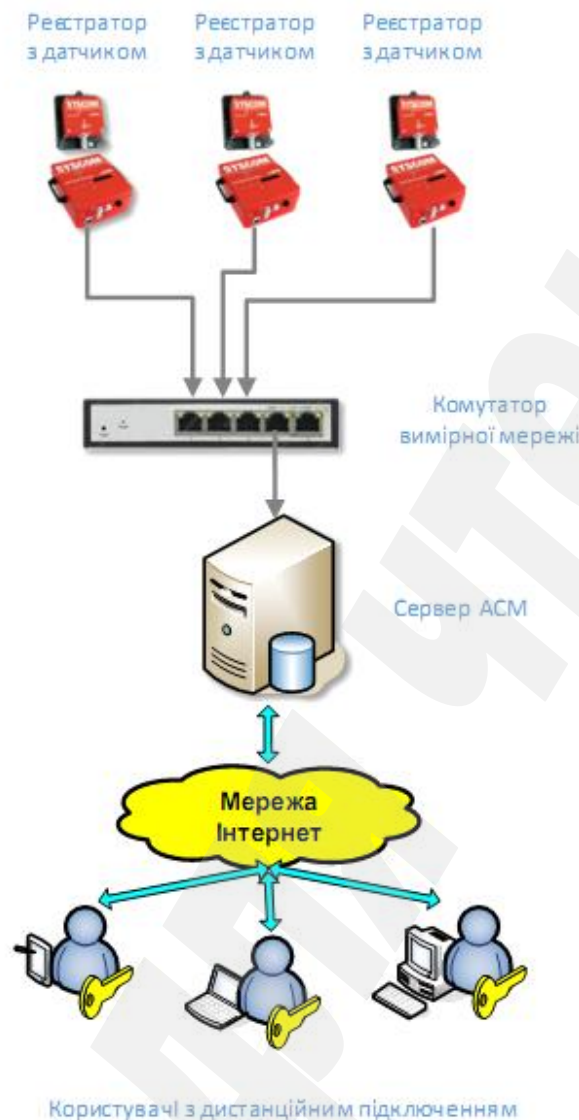
**Рис. 4.** Форми власних коливань споруди Міжнародного виставкового центру:  
*a* – перша форма коливань конструкції споруди (частота коливань 0,492079 Гц);  
*б* – друга форма коливань конструкції споруди (частота коливань 0,538250 Гц);  
*в* – третя форма коливань конструкції споруди (частота коливань 0,668650 Гц);  
 Б...И – літерні осі споруди; 1...8 – цифрові осі споруди

#### **6.4. Експериментальний моніторинг споруди**

Запропонований варіант експериментального динамічного моніторингу споруди Міжнародного виставкового центру (рис. 5) включає операційний і інформаційний інтерфейси. Він забезпечує отримання сигналів, які надходять від датчиків, їх синхронізацію, реєстрацію та передачу на сервер, який керує системою за допомогою програмного і операційного забезпечення. Для виконання вимірювання передбачено використання трикомпонентних акселерометрів MS2002+ (Швейцарія). Програмне і операційне забезпечення здійснюється програмним комплексом Geoscor (Франція) і операційною системою MS Server (США).

При виборі вказаних складових до уваги приймалися технічні характеристики комплексу і апаратури та досвід їх практичного використання. Особлива увага надавалась програмному комплексу, який забезпечував:

- одночасний автоматичний збір даних із датчиків і приладів;
- автоматичний розрахунок і керування критеріями сигналів системи операційного оповіщення;
- візуалізацію і аналіз даних спостережень;
- систематизацію і автоматичне друкування звітів;
- забезпечував функцію віддаленого доступу для зареєстрованих клієнтів;
- надання сигналу небезпеки при досягненні показником, який контролюється, критичної величини.



**Рис. 5.** Структурна схема автоматизованої системи моніторингу динамічного моніторингу будівельної споруди Міжнародного виставкового центру

Моніторингові точки визначались розрахунковим способом за допомогою скінченно-елементної моделі споруди. Вони знаходяться в місцях максимальних переміщень елементів покриття споруди на нижньому поясі кроквяних ферм блоку «В» в центрі прольоту [14].

Для забезпечення синхронної роботи вимірювальних станцій передбачається використання контролера системи (синхронізатора), який є її диспетчером. Контролюючі станції підключаються до нього по схемі «зірка». При такій схемі, виявлений однією із станцій сигнал амплітуди максимального збудження передається на контролер, ініціюючи старт вимірювального циклу іншим станціям.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Дослідженнями підтверджена ефективність використання власних частот і відповідаючих їм форм власних коливань в системі оцінки технічного стану великорозмірних будівельних споруд, які дозволяють оцінити технічний стан споруди, виявити його зміни та визначити їх тенденцію.

Оснований на використанні цих показників динамічний моніторинг дозволяє оцінювати глобальний технічний стан споруди і окремих її конструкцій, без спеціального спостереження за кожною з них. Особливістю його використання у великорозмірних будівельних спорудах є необхідність захисту контрольно-вимірювальної апаратури від впливу на неї експлуатаційних факторів цих споруд, які «зашумлюють» процес вимірювання.

Ефективними в системі моніторингу таких споруд, як і висотних об'єктів [15], виявилось використання теоретично-розрахункового і експериментального методів моніторингу. Особливо ефективним є комплексне їх використання. Створені з цією метою скінченно-елементні моделі споруди та варіант автоматизованої системи експериментального моніторингу дозволяють виявляти початковий етап пошкоджень споруди та локалізувати їх.

Для забезпечення адекватності моделі використовувались типові скінченні елементи та відомі програмні комплекси SCAD і NASTRAN. Створення двох варіантів моделей передбачало їх взаємоконтроль на стадії практичного освоєння моніторингової системи і послідовне використання одного із варіантів в системі контролю споруди, а іншого – для вдосконалення самої розрахункової моделі.

При розробці експериментальної складової моніторингу використовувалась сучасна контрольно-вимірювальна апаратура і прогресивне програмне-операційне забезпечення, гарантуючи об'єктивність і оперативність контролю.

*Weaknesses.* Разом з тим, залишаються невстановленими критичні нормативні параметри показників, які контролюються, оперативне виявлення місць конструкційних порушень та інші аспекти проблеми. Їх вирішення потребує виконання спеціальних досліджень. Орієнтирами може бути оцінка деформованого стану конструкцій по спектрограмам [14], ультразвуковий контроль з'єднань елементів конструкцій, використання навігаційного поля глобальних супутникових систем [16] та інше.

*Opportunities.* Розроблений метод дозволяє оперативно виявити зміни технічного стану контролюємої споруди та являється відносно простим і зручним у використанні. Дозволяє, не дивлячись на значні розміри споруди, отримати необхідну інформацію при контролі лише декількох точок споруди. В цьому відношенні він є мало затратним. Крім того, дозволяє контролювати інші будівельні споруди даного класу, враховуючи їх конструктивні і технологічні особливості.

*Threats.* Негативним являється вплив факторів, що викликають вимушені коливання конструкції. Ці фактори вносять похибки в процес натурних вимірювань власних частот та вносять зміни в форми їх коливань.

У міжнародній практиці такий метод використовують в моніторингових системах контролю унікальних і висотних споруд [7, 10, 16]. На відміну від них, розроблений метод характеризує особливості специфіки великорозмірних споруд, їх технічний стан та є менш економічно затратним.

## 8. Висновки

1. Створені скінченно-елементні моделі великорозмірної будівельної споруди. Моделі дозволяють визначити величини показників динамічних і



статичних характеристик конструкцій споруди та оцінити їх зміни в процесі експлуатації.

2. Виконана верифікація створених моделей. Встановлено, що розбіжність розрахованих і натурних величин власних частот не перевищує 3 %. Зусилля в елементах конструкції підкрівляної ферми покриття розрахунковими програмними комплексами не перевищують 2,5 %.

3. Визначені точки моніторингу для розміщення вимірювальної апаратури, які знаходяться по центру нижнього поясу ферм. Визначена апаратура для моніторингової системи при виконанні експериментального моніторингу споруди. Передбачено використання трикомпонентних акселерометрів MS2002+, програмного комплексу Geoscor і операційної системи MS SERVER.

### Література

1. Laba M.-L., Hastin E. Systema sposterezhennia za peremishchenniam elementiv konstruktsii ta sporud: pat. ER 1 391 692 V1 France. MPK G01C 15/00 (2006.01); assignee: «Soldata». Appl. No. 92000; Filed 11.08.2003; Publ. 04.05.2011, Bull. No. 2011/18.

2. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical system from changes in their vibration characteristics: a literature review. Report No. LA-13070-MS / Doebling S. W. et al. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1996. 127 p. doi:[10.2172/249299](https://doi.org/10.2172/249299)

3. Shablinskii G. E., Zubkov D. A. Naturnye dinamicheskie issledovaniia stroitel'nykh konstruktsii. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov ASV, 2009. 216 p.

4. Shablinskii G. E., Zubkov D. A. Naturnye i model'nye issledovaniya dinamicheskikh yavlenii v stroitel'nykh konstruktsiyah energeticheskikh i grazhdanskikh obektov. Moscow: Izdatel'stvo MGSU, 2012. 483 p.

5. Patrikeev A. V., Salatov E. K. Osnovy metodiki dinamicheskogo monitoringa deformatsionnykh harakteristik zdaniy i sooruzhenii // Vestnik MGSU, 2013. Vol. 1. P. 133–138.

6. Lengvarsky P., Bocko J. Theoretical Basis of Modal Analysis // American Journal of Mechanical Engineering. 2013. Vol. 1, No. 7. P. 173–179.

7. Shablinskii G. E. Monitoring unikal'nykh vysotnykh zdaniy i sooruzhenii na dinamicheskie i seismicheskie vozdviizheniya. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov ASV, 2013. 328 p.

8. Patrikeev A. V. Sistema dinamicheskogo monitoringa inzhenerenogo sooruzheniya kak klyuchevoy element ego tekhnicheskoy bezopasnosti // Vestnik MGSU. 2014. Vol. 4. P. 133–140.

9. Haidaichuk V. V., Kotenko K. E. Efektyvnist i problemy monitoringu velykorozmirnykh budivelnnykh sporud // Opir materialiv i teoriia sporud. 2016. Vol. 97. P. 163–173.

10. Savin S. N. Dinamicheskiy monitoring stroitel'nykh konstruktsiy na primere kinokontsertnogo zala «Pushkinskiy» v g. Moskve // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2012. Vol. 7 (33). P. 58–62.

11. Elleithy W. Analysis of problems in elasto-plasticity via an adaptive FEM–BEM coupling method // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2008. Vol. 197, No. 45–48. P. 3687–3701. doi:[10.1016/j.cma.2008.02.018](https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.02.018)
12. Haidaichuk V. V., Kotenko K. E., Tkachenko I. A. Dynamichniy monitorynh budivelnoi sporudy Mizhnarodnoho vystavkovoho tsentru // *Nauka ta Budivnytstvo*. 2016. Vol. 9, No. 3. P. 20–25.
13. Sizov A. M. Otsenka dopustimogo urovnya kolebaniy stroitel'nykh konstruktsiy. *Spravochnik po dinamike sooruzheniy*. Moscow: Stroyizdat, 1972. 511 p.
14. Skinchenno-elementnyi monitorynh konstruktsii Mizhnarodnoho vystavkovoho tsentru / Vashchilina O. V. et al. // *Visnyk NTU*. 2015. Vol. 31. P. 43–49.
15. Belostotsky A. M., Kalychava D. K. Adaptive finite element models as the base of dynamic monitoring of tall buildings. Part 1: Theoretical basis of the developen technique: The basis of the developed computational and experimental methods // *International Journal for Computation Civil and Structural Engineering*. 2012. Vol. 8. P. 19–27.
16. Dynamic Monitoring vertical Deflection of Small Concrete Bridge Using Conventional Sensors And 100 Hz GPS Receivers – Preliminary Results / Larocca A. P. C. et al. // *IOSR Jornal of Engineering*. 2014. Vol. 4, No. 9. P. 9–20. doi:[10.9790/3021-04920920](https://doi.org/10.9790/3021-04920920)