



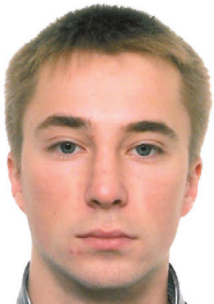
АВТОРИ



ГАЙДАЙЧУК В.В.
Доктор технічних наук, завідувач кафедри Київського національного університету будівництва та архітектури



КОТЕНКО К.Е.
Завідувач кафедри Київського національного університету будівництва та архітектури



ТКАЧЕНКО І.А.
Заступник генерального директора ТОВ «Міжнародний виставковий центр»



КЕДИК І.В.
Провідний інженер, ТОВ «СОЛДАТА УКРАЇНА»

СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНОЇ СПОРУДИ МІЖНАРОДНОГО ВИСТАВКОВОГО ЦЕНТРУ

УДК 539.3; 624. 042.8

АНОТАЦІЯ

Приведено результати обладнання споруди МВЦ комплексною системою моніторингу технічного стану. Сформульовані характерні особливості діючих систем. Відмічені напрямки удосконалення запровадженої системи моніторингу.

The results of IEC building equipment with a complex system of technical condition monitoring are presented. The characteristic features of the existing systems are formulated. The directions for the improvements of the implemented monitoring system are outlined.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

статичний моніторинг, динамічний моніторинг, частоти і форми коливань, скінчено-елементна модель

Будівля Міжнародного виставкового центру (МВЦ) збудована за проектом інституту ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій» ім. В. М. Шимановського і друга черга її будівництва була завершена у 2006 р. Основним призначенням споруди являється демонстрація промислових та наукових досягнень вітчизняних та закордонних підприємств, проведення самітів, конференцій, з'їздів, культурно-масових заходів та інше. Загальна площа споруди (57477 м²) та сервісне обладнання дозволяють одночасному перебуванню в ній понад 15 тис. відвідувачів. В цьому відношенні будівельна споруда є найбільшим об'єктом відповідного призначення в Україні.

Виконуються роботи щодо подальшого вдосконалення і розвитку інфраструктури центру. Розроблена документація третьої черги будівництва об'єктів комплексу. Удосконалюється і сервісне обладнання відповідно до сучасних європейських



вимог.

МВЦ – великорозмірна інженерна споруда 5 категорії складності, класу відповідальності ССЗ. В архітектурно-конструктивному відношенні представляє собою три поєднані блоки (А, Б, В), покриття блоків Б та В об'єднанні «Хвилею». Каркас будівлі металевий, виконаний з профільного сталевого прокату. Фундаменти монолітні залізобетонні. Покрівля – класичний піриг: профнастил, паробар'єр, утеплювач PAROC-AKL, EPDM та ПВХ покрівельна мембрана. Стіни – тришарові панелі типу «сэндвіч» з мінераловатним утеплювачем «ROCKWOOL».

Згідно вимогам безпеки будівлі і споруди класу відповідальності ССЗ, до якого відноситься споруда МВЦ, підлягають обов'язковому системному контролю і повинні бути обладнані автоматизованими системами моніторингу і управління [1, 2]. В 2012 р. згідно з розпорядженням державних служб [3] споруда МВЦ була обладнана автоматизованою системою статичного моніторингу металевих конструкцій і фундаментів (АСМ). Основою впровадженої системи є методика, що розроблена французькою компанією SOLDATA та Національним географічним інститутом Франції (IGN).

Принцип роботи системи ґрунтується на визначенні просторових положень контрольних точок спостереження з використанням технології лазерного наведення, що здійснюється за допомогою відповідного високоточного геодезичного обладнання та пакету спеціального програмного забезпечення.

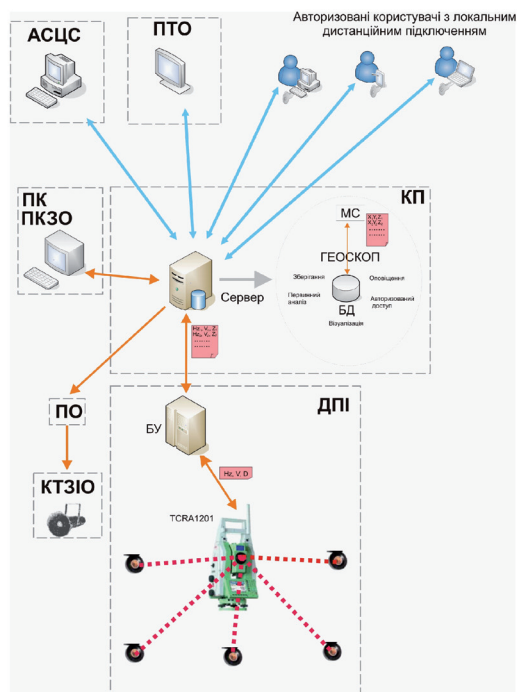


Рис.1. Структура та взаємодія складових частин АСМ : АСЦС – автоматизована система центрального спостереження, ПТО – пульт технічного обслуговування, ТАСЦО – територіальна автоматизована система централізованого оповіщення, ПО – пристрій оповіщення, КТЗІО – кінцеві технічні засоби, ДПІ – джерела первинної інформації.

Структура та взаємодія складових частин системи і комунікація її з іншими системами представлена на рис. 1.

Для дистанційного вимірювання положень контрольної точки використовуються мішені-відбивачі спеціальної конструкції (еталонні та спостереження). Еталонні розміщуються поза зоною впливу можливих деформацій конструкцій, а мішені спостереження кріпляться на елементах конструкцій. Величини переміщень фіксуються геодезичними високоточними тахеометрами TCRA, виробництва Leica. Дані вимірювань зберігаються в міні комп'ютері блоку управління та передаються каналами локальної комп'ютерної мережі на сервер АСМ для подальших розрахунків, а самі розрахунки положень контрольних точок виконуються за допомогою програмного забезпечення АСМ.

Впроваджена АСМ дозволяє здійснювати спостереження за можливими просторовими переміщеннями та деформаціями різних конструктивних елементів споруди і візуалізувати результати вимірювань в тримірній системі координат. Контроль виконується по 85 точкам спостереження. АСМ працює у постійному режимі і забезпечує вимірювання вертикальних прогинів та горизонтальних переміщень з точністю ± 1 мм. З моменту впровадження системи не було виявлено порушень в її роботі, а результати спостережень вказують на задовільний в цілому стан конструкцій, що спостерігаються. Виявлені однак і окремі недоліки в конструкціях будівлі, пов'язані з неякісним виконанням монтажних робіт при будівництві. Наприклад, 2012 р. при значному сніговому навантаженні нижній пояс підкровоквяної ферми ПФ-6 пружно здеформувався в горизонтальній площині, як показав аналіз, через відсутність компенсаторів деформації в формі овальних отворів болтового з'єднання, що було оперативно виправлено.

Але вказана система відображає напружено-деформований стан окремих конструкцій, що спостерігаються, при дії на них статичного навантаження і, не дивлячись на вагому значимість цих конструкцій в споруді, характеризує лише її локальний стан. Показники системи не надають інформацію відносно динамічних впливів на споруду таких, наприклад, як мікросейсмічні коливання земної поверхні, вітрові імпульси, фонові впливи, пов'язані з рухом метрополітену та інших транспортних засобів, що робить діагностику споруди недостатньо ефективною.

Тому, враховуючи конструкційну наповненість споруди (більш 200 груп конструктивних елементів) і динамічний фоновий вплив на неї, пошук способів підвищення ефективності контролю був спрямований на його глобалізацію. Передбачалась доцільність створення розрахункової моделі споруди та використання динамічних характеристик в системі моніторингу.



Існує точка зору згідно якої, інструментальний моніторинг без опори та співставлення з набором адекватних математичних моделей об'єктів має випадково-беззмістовний характер, не представляє практичного значення і не відображає реальність проблеми [4], а математична модель реалізує фактичні фізико-механічні властивості матеріалу, геометричні форми елементів конструкції та реально характеризує роботу вузлів і з'єднань, і таким чином, являється ефективним інструментом діагностики технічного стану споруди.

Базуючись на такому підході, фахівцями Київського університету будівництва і архітектури, Національного транспортного університету та МВЦ була виконана препроцесорна підготовка і створена скінчено-елементна модель будівельної споруди МВЦ, що враховує її конструктивні та експлуатаційні особливості.

Використовувались програмні комплекси NASTRAN та SCAD. В подальшому передбачалось використання в основному скінчено-елементної моделі NASTRAN, що витримала перевірку на адекватність і була доопрацьована для можливо виконання розрахунків динамічних характеристик, у тому числі з приєднанням неконструкційних мас. Створена модель має універсальний характер і глобально відображає напружено-деформований стан конструкцій споруди. Надає інформацію відповідно статичних і динамічних характеристик, у тому числі осьових зусиль, згинальних моментів, поперечних сил, переміщень, стійкості, частот і форм власних коливань, при різних сполученнях діючих навантажень.

Однак, об'єктивність інформації може виявитися неадекватною в зв'язку з можливими змінами в технічному стані споруди пов'язаними, наприклад, зі зміною шарнірності в місцях з'єднань (зрізка болтів, поява пластичних шарнірів), просіданням ґрунтової основи під фундаментами несучих елементів конструкцій, вібрацією від працюючого технологічного устаткування та інше. Тому необхідною умовою стає попередня оцінка цілісності споруди. Ефективним в цьому відношенні представляється використання інструментального динамічного моніторингу, що характеризує загальний (цілісний) стан споруди за допомогою показників динамічних характеристик (власних частот і форм коливань). Попередній аналіз надає перевагу та орієнтує на першочерговість оцінки цілісності споруди, при позитивних результатах якої залишається ефективним використання розрахункової скінчено-елементної моделі, а при появі негативних сигналів – своєчасно інформуються служби, що відповідають за без-

пеку будівлі.

Цей підхід був використаний при розробці методики динамічного моніторингу споруди МВЦ. Аналізувались та доопрацьовувались відомі положення вказаного методу відповідно до конструктивних та експлуатаційних особливостей даної споруди. Використовувались показники динамічних характеристик: величини частот, форм власних коливань і параметрів затухання, що характеризують низькочастотний діапазон коливань (три перші частоти основного тону). Форми коливань відображались напрямками і величинами амплітуд, що відповідають вказаному частотному діапазону. Діапазон частот власних коливань приймався з врахуванням дії постійних неконструкційних навантажень: технологічного та огорожувальних конструкцій. Розрахунки виконувались в програмних комплексах SCAD і NASTRAN, а натурні величини частот вимірювались інструментальним методом за методикою Київського національного університету будівництва і архітектури з використанням сейсмографа ZET-048C (табл. 1). Експериментально вимірювались віброприскорення несучих конструкцій в реальному часі з подальшою їх обробкою та визначенням даних власних частот коливань споруди. Зареєстровані віброграми

Таблиця 1. Технічні характеристики сейсмографа 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, °С	від -30 до +50

коливань оброблялись програмним забезпеченням ZETLAB SEISMO за допомогою спектрального аналізу методом дискретного перетворювання Фур'є.

Отримані спектри (рис. 2) аналізувались з метою визначення значень частот власних коливань, що відповідають основним пікам на спектрогра-

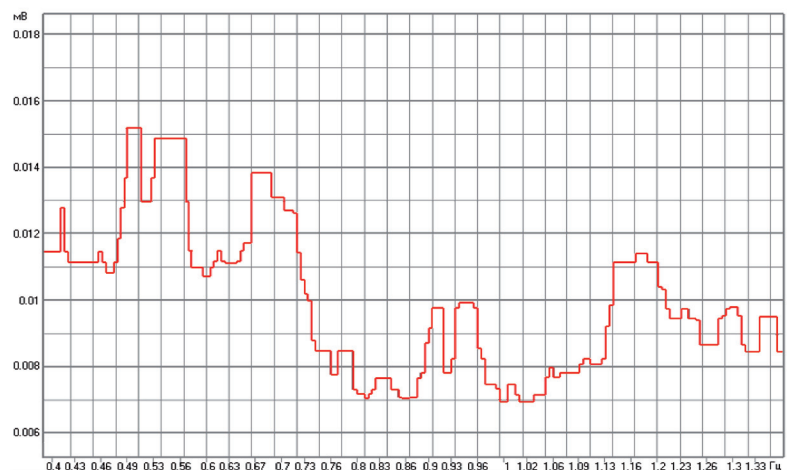


Рис.2. Спектр власних коливань споруди МВЦ.



мах та є наслідком відгуку конструкції на зовнішні джерела динамічної дії.

Спектральний аналіз дозволяє відфільтрувати власні частоти споруди від інших фонових впливів і є необхідним, особливо в системі динамічного моніторингу великорозмірних споруд. Але використання власних частот може виявитися неефективним, якщо дефекти споруди не порушують її цілісність. Наприклад, просідання ґрунтової основи під фундаментами конструкцій, що не викликало появу тріщин та інших порушень, локальна втрата стійкості окремих елементів, боковий нахил каркасу та інше. В цьому випадку доцільним стає використання форм власних коливань.

Розрахована за допомогою скінчено-елементної моделі форма і напрямки власних коливань споруди з першою нижчою частотою (0,492079 Гц) (рис. 3) свідчить, що «Хвиля» та знижена частина блоку Б рухаються поступально в одному напрямку вздовж осі X.

При коливаннях з другою частотою (0,53825 Гц) «Хвиля» та знижена частина блоку Б рухаються вздовж осі X у протилежних напрямках. Коливання з третьою частотою (0,66865 Гц) супроводжується накладанням поворотних рухів «Хвилі» по центру, вздовж її повздовжньої осі.

Величини амплітуд власних коливань в елементах металевого каркасу представлені на рис. 3 та вважаються якісними показниками, потребуючими коригування відповідно до експериментальної перевірки з врахуванням розрізнявальних характеристик апаратно-інструментального обладнання. Згідно теоремі Котельникова, спектр сигналу, що обмежений частотою, мусить бути в два рази вищим цієї частоти для того, щоб сигнал можна було відновити без втрати інформації. В цьому відношенні для моніторингу споруди МВЦ обґрунтованим може бути використання велосіметрів С-5-С, СМ-3, КМ-В російського вироб-

ництва та СМГ-3ES33 фірми Guralp та аксельометрів ИФЗ РАН та Guralp GMG-5T.

При частотах більше 1Гц перспективним представляється використання сейсмостанції SYSCOM (Швейцарія) в поєднанні з програмним комплексом «GEOSCOPE». Сейсмостанції дозволяють в режимі реального часу виявляти акусто-сейсмічну вібрацію об'єкту спостереження, вимірювати та аналізувати параметри виявлених вібрацій з амплітудою від 1 мм/с до 200 мм/с (або в одиницях прискорення від 0 до 50 м/с²). Сейсмостанція складається з тривісного геофону (сейсмоприймач), що монтується безпосередньо на поверхню об'єкту спостереження, та пристрою управління. Залежно від потреб, сейсмоприймач може бути змонтований як в одному корпусі з пристроєм управління, так і окремо. В залежності від конструкції (одновісний чи тривісний) та частотного інтервалу чутливості, сейсмоприймач детектує сейсмічні коливання чи вібрацію різного походження. При цьому, пристрій управління забезпечує обробку, аналіз, збереження та передачу звіту за результатами детектування.

Після встановлення кожної сейсмостанції проходить її тестування, під час якого виконується калібрування для визначення рівня шумового фону вібрації. За результатом калібрування визначається пороговий рівень (або декілька рівнів) амплітуди вібрації, при досягненні якого сейсмостанція автоматично генеруватиме відповідні повідомлення. Сейсмостанція може працювати в неперервному режимі запису та в режимі відслідковування. В першому випадку станція записує сигнали, що поступають від сейсмоприймача протягом визначеного оператором часу (від 15 секунд до 5 хвилин). Отримані дані обробляються за допомогою спеціального програмного забезпечення для визначення амплітудно-частотних характеристик власних коливань об'єкту спостереження. Більш детальну інформацію передбачається представити в наступних публікаціях.

Обов'язковою умовою є достатня кількість датчиків, правильність їх розташування та синхронність роботи. Тому для визначення величин власних частот і форм коливань споруди МВЦ в системі її динамічного моніторингу необхідно використати мінімум три однотипних датчики, розмістив їх в моніторингових точках споруди.

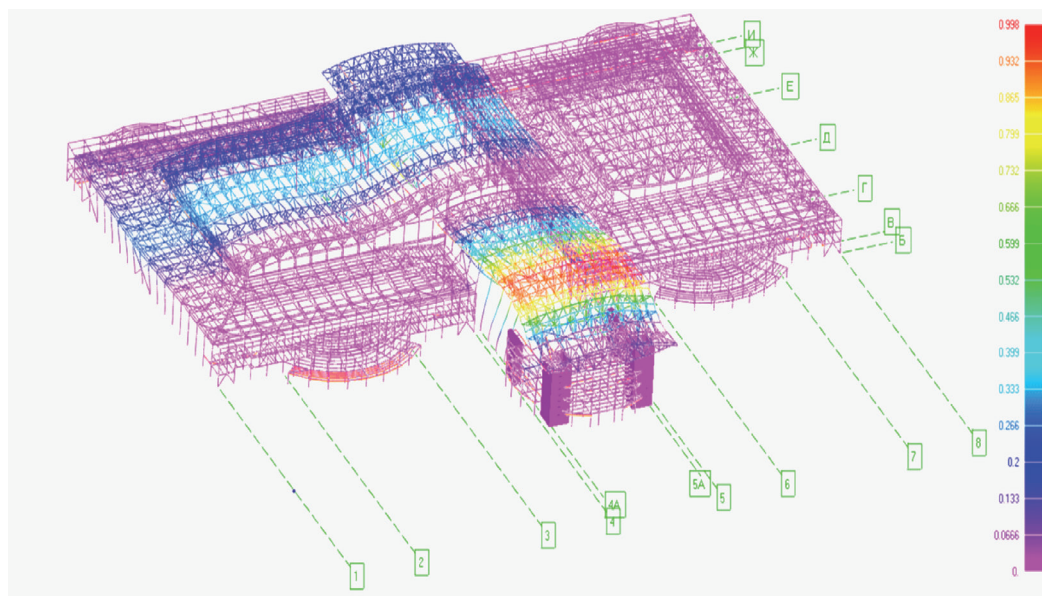


Рис.3. Коливання за першою власною частотою.



ВИСНОВКИ

1. Досить суттєвим елементом діагностики технічного стану будівельної споруди є динамічний моніторинг загального (цілісного) стану з використанням показників частот, форм власних коливань і параметрів затухання.
2. Найбільш інформативними є величини трьох перших частот основного тону коливань і відповідні форми власних коливань.
3. Розрахунковим методом, за допомогою створеної адекватної скінчено-елементної моделі та експериментальною перевіркою встановлені базові величини власних частот і напрямки коливань споруди.
4. Вивчається можливість використання діючої на МВЦ системи моніторингу та програмного забезпечення «GEOSCOPE» для діагностики технічного стану споруди з використанням показників динамічних характеристик.

ЛІТЕРАТУРА

1. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – [Чинні від 2009-12-01]. – К.: Мінрегіон України, 2009. – 43 с. – (Будівельні норми України).
2. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинні від 2007-01-01]. – К.: Мінрегіон України, 2006. – 78 с. – (Будівельні норми України).
3. Автоматизовані системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення: ДБН В.2.5-76:2014. – [Чинні від 2014-06-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 38 с. – (Будівельні норми України).
4. Белостоцкий А.М. Адаптируемые конечно-элементные модели на основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 1: Основа разработанной расчетно-экспериментальной методики / Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2012. – № 8(4). – С. 19-27.
5. Савин С.Н. Динамический мониторинг строительных конструкций на примере пандуса концертного зала «Пушкинский» в г. Москве / Савин С.Н // Инженерно-строительный журнал, 2012. – №7.

REFERENCES

1. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnnykh konstrukttsii ta osnov [System for ensuring the reliability and safety of construction projects. General principles of reliability and structural safety ensuring for buildings, constructions, civil structures and bases]. (2009). DBN V.1.2-14-2009 from 01st Desember 2009. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
2. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Navantazhennia ta vplyvy. Normy proektuvannia [System for ensuring the reliability and safety of construction projects. Loads and effects. Design norms]. (2006). DBN V. 1.2-2:2006 from 01st January 2007. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
3. Avtomatyzovani systemy rannioho vyavlennia zahrozy vynykennia nadzvychainykh situatsii ta opovishchennia naselennia [Automated systems of emergency hazards early identification and emergency-broadcast]. (2014). DBN V.2.5-76:2014 from 01st June 2014. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
4. Belostotsky A.M. & Kalichava D.K. (2012). Adaptiruiemyie konechno-elementnyie modeli na osnovie dinamicheskogo monitoringa nesushchikh konstrukttsyi vysotnykh zdanii. Chast 1: Osnova razrobotannoi raschetno-eksperimentalnoi metodiki [Adaptive finite element models based on the dynamic monitoring of high-rise building load-bearing structures. Part 1: Theoretical basis of the developed computational and experimental technique]. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering 8, 4, 19-27 [in Russian].
5. Savin S.N. (2012). Dinamicheskii monitoring stroitelnykh konstrukttsyi na primere kontsertnogo zala «Pushkinskii» v g. Moskve [Civil structures dynamic monitoring by an example of the ramp of the «Pushkinskii» Concert Hall in the city of Moscow]. Inzhenerno-stroitelnyi zhurnal – The Engineering and Construction Journal, 7 [in Russian].