

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРАХУНКОВОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВЕЛИКОЇ ЛАВРСЬКОЇ ДЗВІНИЦІ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОГО ЗАПОВІДНИКА

О.В. Кендзера¹, І.Д. Белов², С.В. Щербіна¹, Ю.В. Лісовий¹, В.А. Ільєнко¹, В.В. Гайдайчук², О.П. Дєдов²,
І.А. Черевко³

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Палладіна, 32, Київ 03680, Україна,
e-mail: kenzera@igph.kiev.ua, pohup@ukr.net, lisovyi@ukr.net, hgy@yandex.ua

²Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітрофлотський, 31, Київ-037,
03680, Україна, e-mail: vcbk@ukr.net

³Національний Києво-Печерський історико-культурний заповідник, вул. Лаврська, 9, Київ 01015, Україна,
e-mail: ira071165@yahoo.com

Розглянуто дослідні роботи з вивчення сейсмостійкості Великої лаврської дзвіниці Києво-Печерського заповідника, дослідження її реакції на зовнішні сейсмічні впливи різного походження. Наведено результати спектрального аналізу записів сейсмічних коливань. Визначено власні частоти коливань дзвіниці. Проведено аналіз експериментальних даних сейсмічних спостережень і виконано порівняння з теоретичною моделлю коливань дзвіниці. Сейсмічні коливання виміряно за допомогою акселерометра ZET 048C і велосиметра GURALP CMG-40T на чотирьох рівнях дзвіниці та на відстані 10 м від неї. Точки спостережень розташовано у прорізах зовнішніх несівних стін для виключення фонових впливів від коливань другорядних елементів конструкції дзвіниці. Отримано трикомпонентні записи реакції дзвіниці на зовнішній мікросейсмічний шум. Визначено амплітуди спостережених коливань і проведено спектральний аналіз швидкості та прискорення їх поширення. Результати натурних спостережень збіглися в інженерному діапазоні частот із значеннями параметрів коливань, розрахованих для математичної моделі дзвіниці. Встановлено, що за збільшення висоти встановлення пунктів спостережень над землею поверхнею значення усереднених амплітуд прискорення не підвищуються, а усереднених амплітуд швидкості зростають за експоненціальним законом. Розроблено методику періодичного дослідження технічного стану дзвіниці шляхом перевірки стабільності частотного складу і амплітуд коливань, зареєстрованих у визначених точках дзвіниці. Методика не потребує проведення довготривалих технічних обстежень споруди.

Ключові слова: спектральний аналіз, спектрограми, вібраційна діагностика, власні коливання, віброприскорення, віброшвидкість.

Вступ. У статті розглянуто питання використання методів вібраційного діагностування і оброблення експериментальних даних вимірювань на унікальних і відповідальних об'єктах будівництва, для яких є актуальним швидко та ефективно оцінювання поточного технічного стану.

В межах досліджень Великої лаврської дзвіниці проведено експериментальні геофізичні роботи щодо уточнення теоретичної спектральної моделі дзвіниці та розроблення методичної бази для створення оптимального алгоритму періодичного контролю об'єкта.

Мета — дослідження сейсмостійкості Великої лаврської дзвіниці шляхом експериментального вивчення її реакції на впливи різного типу з використанням спектрального аналізу записів сейсмічних коливань.

Завдання дослідження:

- розроблення методики виконання робіт;
- експериментальне визначення власних частот за основними формами коливань;
- аналіз експериментальних даних і зіставлення з теоретичною моделлю;

- створення алгоритму системного контролю дзвіниці.

Геологія. Морфологічно дзвіниця знаходиться на правому березі р. Дніпро в межах останця річкового плато, обмеженого долинами річок Дніпро, Либідь і Хрещатим ярком. Висота плато на рівні дзвіниці — 190 м над рівнем моря (н.р.м.) На схід від дзвіниці, в напрямку до р. Дніпро, плато обривається майже прямою.

Глибина залягання кристалічного фундаменту — 500 м. Найдавніші породи розрізу осадового чохла представлені піщано-глинистими відкладами пермського й тріасового періодів, які незгідно перекривають кристалічний фундамент. Вище залягають юрські та крейдяні відклади, останні — на глибині 30–40 м н.р.м. Палеогенові відклади представлені канівською та бучацькою світами з чорними глинами, їх змінюють темно-сірі піски бучацького ярусу.

Вище залягає київська світа, потужністю до 50 м, — зеленувато-сірі карбонатні піски та безкарбонатні глини, перекриті пісками харківської світи. На харківській світі залягає полтавський

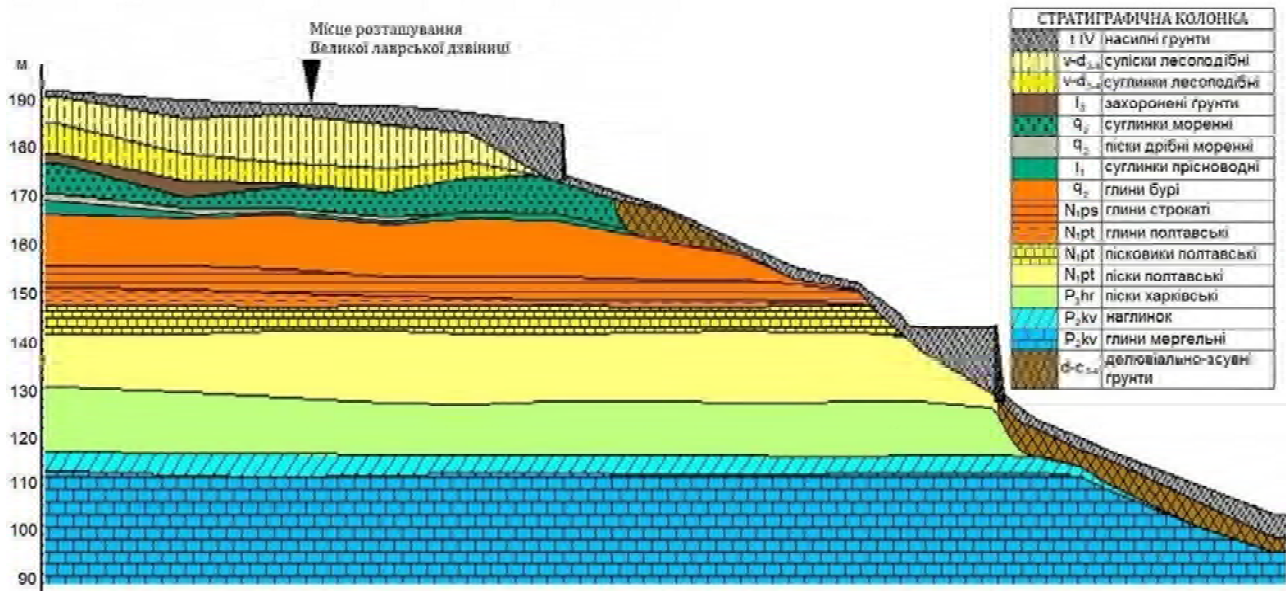


Рис. 1. Геологічний розріз схилу р. Дніпро під Національним Києво-Печерським історико-культурним заповідником [4]
 Fig. 1. Geological section of the slope Dnieper river under the National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve [4]

ярус, представлений пісками, пісковиками та глинами, загальною потужністю до 20 м (рис. 1).

Вище за розрізом на бурих і строкатих глинах поширені відклади моренного, льодовикового, прісноводного та флювіогляціального походження та захоронені ґрунти – суглинки прісноводні, суглинки та піски моренні, лесові суглинки та супіски. Загальна потужність сягає 20 м (рис. 1).

Потужність насипних ґрунтів під дзвіницею становить 3,5–4,5 м. Геологічна будова на глибину до 40 м сформована комплексом еолово-делювіальних відкладів третього і четвертого відділів четвертинної системи. Гідрогеологічні умови ділянки характеризуються наявністю водоносного горизонту, приуроченого до лесоподібних моренних і прісноводних відкладів. Сталі рівні підземних вод зафіксовано на глибинах 15,4–15,6 м. Водоносний горизонт проявляє незначний напір у межах 1 м. Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок втрат водонесучих мереж та інфільтрації атмосферних опадів [6].

Методи діагностики стану та конструктивне рішення дзвіниці. Обстеження будівельних об'єктів шляхом експериментального визначення власних параметрів є ефективним методом досягнення безпеки і довговічності цих об'єктів, особливо складних, коли постає питання безпеки і надійності будівельних конструкцій. Як правило, такі будівлі й споруди відзначаються різноманітністю форм і об'ємів, великими прольотами і висотою, соціальним і культурним значенням, історичною цінністю тощо. Об'ємні об'єкти достатньо складно контролювати стандартними статичними інструментальними обстеженнями внаслідок їх значної трудомісткості й тривалості. Тому на сьогодні актуальними є технології, за якими можна

отримати потрібну інформацію з мінімальними часовими і трудовими затратами. Одна з таких технологій – вібраційна діагностика будівель і споруд як ефективний інструмент визначення їх технічного стану шляхом вимірювань і оцінювання динамічних параметрів їх коливань.

Кожен будівельний об'єкт має індивідуальний комплекс власних динамічних характеристик, зміна яких унаслідок зміни властивостей навколишнього середовища і зовнішніх вібраційних впливів (мікросейсмічний фон) відповідно відображається у його відгуках і реакціях. Методичні вимірювання реакції Великої лаврської дзвіниці на вплив мікросейсмічного фону протягом тривалого часу дають змогу отримати деякі діагностичні ознаки, а саме: зміну власних частот і форми коливань об'єкта, а також спектрального розподілу величини вібропереміщень, віброшвидкостей і віброприскорень, зареєстрованих в окремих точках об'єкта, логарифмічні декременти затухання коливань тощо. На підставі аналізу вимірних параметрів сейсмічних коливань можливе ефективне і достатньо швидке діагностування глобального технічного стану об'єкта та основних його елементів.

Методику вібродіагностики формують у такий спосіб: проводять первинне візуально-інструментальне обстеження об'єкта і визначають відповідність прийнятих конструктивних рішень проектним. За отриманими результатами будують математичну модель очікуваних коливань і визначають їх контрольні параметри, які у подальшому перевіряють і уточнюють в процесі проведення діагностичних замірів мікросейсмічних вібрацій в заданих точках об'єкта. За загальноприйнятою практикою перевірку параметрів

здійснюють з періодичністю 2 роки. В разі відхилення параметрів поточних вимірювань більш як на 10 % об'єкт підлягає обов'язковому інструментальному обстеженню для визначення причини змінень. Якщо власні динамічні параметри спостережених коливань не змінилися – експлуатацію продовжують. Розглянута методика є особливо актуальною для висотних, великопрогінних і архітектурно складних споруд, в яких ускладнено доступ до окремих вузлів і конструкцій.

Велика дзвіниця Успенського собору є історичним пам'ятником архітектури, пам'яткою національного значення і визначною спорудою Києво-Печерської лаври. Дзвіницю збудовано в 1731–1744 рр. за проектом архітектора Й.Г. Шеделя. Це цегляна восьмигранна в плані, чотири-ярусна башта заввишки 96,87 м, яка завершується куполом і маківкою з хрестом. Кожен вищий ярус у діаметрі вужчий за попередній. На третьому і четвертому ярусах улаштовано кільцеві оглядові майданчики.

Правильний восьмигранник стін першого ярусу утворює конструктивно жорстку просторову систему. Його діаметр в основі дзвіниці – 28,8 м, товщина стін – близько 8 м, однак кожна грань полегшена шестикутним невеликим приміщенням, перекритим зімкненим склепінням. Висота першого ярусу – 12,4 м.

На другому ярусі встановлено 32 колони, розташовані групами між восьми вікнами. Товщина стін ярусу – 5,5 м, висота – 16,15 м. У центральній його частині є велика кругла в плані зала, від якої радіально розташовано відкриті приміщення у вигляді глибоких ніш, освітлених за рахунок віконних прорізів у зовнішній стіні.

Товщина стін третього ярусу – 3 м, висота – 17,3 м. Основи третього і четвертого ярусів відповідно менші за основу кожного попереднього. На третьому і четвертому ярусах є круглі в плані приміщення з відкритими назовні арковими отворами. В 1950-х роках на цьому рівні було влаштовано нове перекриття у вигляді залізобетонної плити. Під час ремонтних робіт у 2005 р. перекриття на позначці 47,1 м було замінено на залізобетонне через його аварійний стан.

Фундамент дзвіниці, виконаний з цегли та буту на вапняному розчині, має кільцеву форму із зовнішнім діаметром приблизно 30 м, завширшки 10 м. Заглиблення фундаменту нерівномірне: 4,17–5,39 м. Основою слугує ущільнений лесоподібний супісок. Засипку (супісок темно-сірий з кусками цегли) із зовнішнього боку здійснено на глибину 3,9 м, а всередині дзвіниці – на глибину 0,5 м. Сейсмічність ділянки – 5 балів для періоду повторюваності землетрусів 500 років, ґрунти – 5-ї категорії складності [5].

Методика визначення динамічних параметрів. Динамічні параметри досліджуваного об'єкта ви-

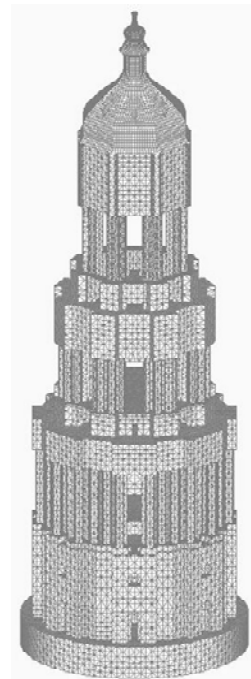


Рис. 2. Розрахункова модель

Fig. 2. The calculated model

значено на підставі математичної розрахункової моделі, побудованої за результатами геометричних обмірів дзвіниці, натурних обстежень і геологічних вишукувань (рис. 2).

У рамках проведення технічного обстеження виконано просторовий розрахунок додаткових сейсмічних навантажень на споруду методом скінченних елементів з використанням програмного комплексу “Nastran”.

Розрахунковою схемою є скінченно-елементна модель, яку створено за допомогою пірамідальних скінченних елементів із заданими фізико-механічними характеристиками, що відповідають характеристикам цегляної кладки дзвіниці, отриманим за результатами експериментальних досліджень.

Виконано статичні розрахунки додаткових навантажень для всієї дзвіниці на вплив власної ваги і зовнішніх навантажень. Враховано початковий ексцентриситет (0,6 м) від нахилу споруди. Отримано параметри напружено-деформованого стану моделі та величини переміщень. Розраховано також динамічні додаткові навантаження з визначенням частот трьох перших форм коливань (рис. 3) [5].

Методика вимірювань. Експериментальні дослідження виконували в умовах експлуатації об'єкта. Реальні значення спостережуваних коливань різних точок дзвіниці вимірювали за допомогою сейсмометричних пристроїв: російського сертифікованого акселерометра ZET 048C; англійського сертифікованого трикомпонентного вимірювача швидкості коливань GURALP CMG-40T [11]; однокомпонентного вертикального лазерного

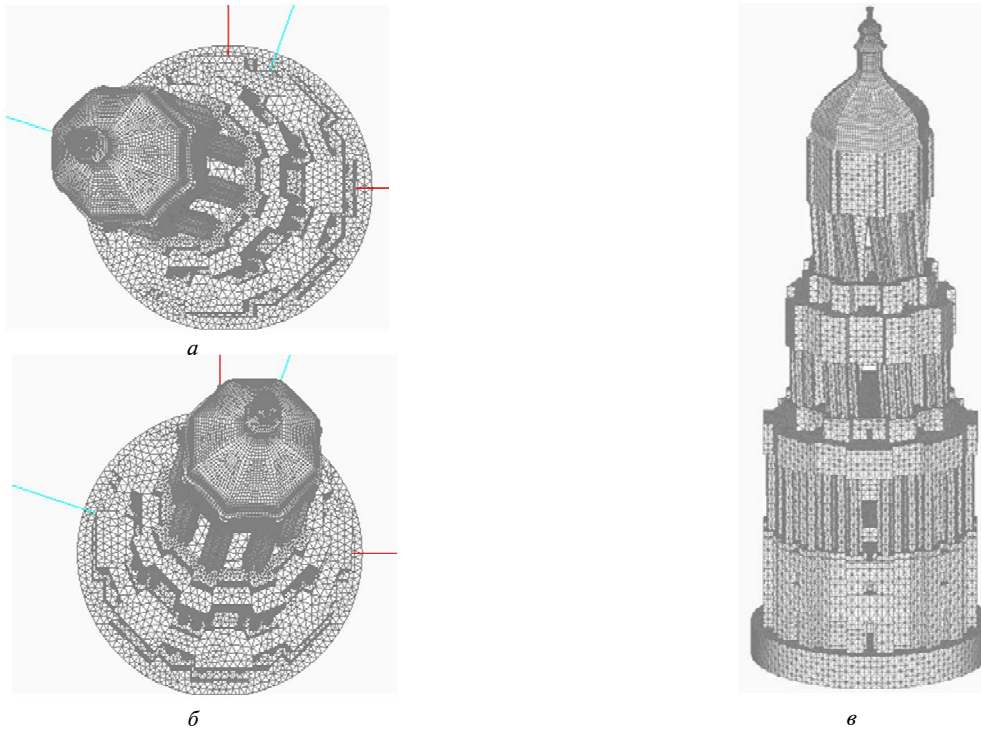


Рис. 3. Перші три форми (а–в) власних коливань дзвіниці, розраховані за математичним моделюванням. Частота, Гц: а – 2,2342, б – 2,2366, в – 3,8958

Fig. 3. The first three forms (a–v) natural vibrations of the bell tower, calculated by mathematical modeling. Frequency, Hz: a – 2,2342, б – 2,2366, в – 3,8958

сейсмометра, який випробували у польових тестових умовах як робочу лабораторну модель (результати вимірювань лазерним сейсмометром в статті не наведено).

Завдяки використанню для вимірювання параметрів вібрацій комплексу сейсмометричних приладів різного призначення вдалося отримати достатньо великий обсяг нової важливої первинної інформації про рівень амплітуди вібрацій, спостережених на різних поверхнях дзвіниці.

Перед реєстрацією даних обидва прилади синхронізували у часі та в просторі по трьох осях вимірювання (X та Y – горизонтальні, Z – вертикальна). Горизонтальні осі орієнтовано за напрямками сторін світу.

Одночасна реєстрація динамічних параметрів різними приладами дала змогу перевірити якість отриманих даних і підвищити їх достовірність.

Для визначення мікросейсмічного фону довкілля вимірювання виконували на чотирьох рівнях та поблизу дзвіниці, на відстані 10 м. Точки спостережень було розташовано у прорізах зовнішніх несівних стін (рис. 4, 5) з метою виключення фонових впливів від другорядних елементів [1, 3].

Зважаючи на детальність результатів розрахунків і значення трьох перших форм власних коливань споруди, частота дискретизації цифрових записів приладів була прийнята 100 Гц.

Перед початком вимірювань всі прилади були таровані на лабораторному стенді в Інституті гео-

фізики ім. С.І. Суботіна НАН України. В цій статті розглянуто результати вимірювань на 2 типах сейсμοприймачів, які вимірювали прискорення та швидкості поширення коливань [8, 9].

Аналіз експериментальних результатів. Для кожного рівня (див. рис. 5) отримано осцилограми мікроколивань дзвіниці. На підставі цих записів визначено амплітуди та значення частот для трьох перших форм власних коливань дзвіниці.

Мікросейсмічний фон, зареєстрований на ґрунті біля об'єкта дослідження, свідчить про наявність зовнішніх впливів природного і техноген-



Рис. 4. Зовнішній вигляд сейсμοприймачів для вимірювання зміщення, швидкості та прискорення поширення коливань: А – акселерометр; В – велосиметр; С – лазерний вимірювач вертикальних зміщень

Fig. 4. Appearance seismometers to measure displacement, velocity and acceleration of the propagation of oscillation: A – accelerometer; B – velosymetr; C – laser measuring vertical displacements

Таблиця 1. Порівняння теоретичних та експериментальних (прискорення) власних частот коливань дзвіниці
 Table 1. Comparison of theoretical and experimental (acceleration) natural vibration frequencies of the bell tower

Власні коливання, теоретична частота, Гц	Експериментальна частота, Гц				
	Рівень вимірювання – позначка, м				
	1 – 0,000	2 – 11,5	3 – 30,8	4 – 33,6	5 – 50,9
Перша форма, 2,2342	2,1997	2,2432	2,2299	2,2086	2,229998
Друга форма, 2,2366	2,5516	2,5864	2,569997	2,557	2,5675
Третя форма, 3,8958	–	3,6236	3,659996	3,6791	3,6992

ного походження, що мають достатньо рівномірний в часовому діапазоні характер амплітуд (див. спектрограму прискорення на позначці $-0,5$ м (рис. 5, точка контролю б), хоча і на ній вже можна виділити виражений пік, близький до другої власної частоти об'єкта). З другого рівня (позначка $+11,5$ м) всі спектрограми мають виражені піки, які відповідають першим трьом власним частотам (рис. 6, табл. 1).

Аналізуючи графіки записів вимірювань, можна виділити три основні піки, які збігаються із значеннями власних частот споруди і мають максимальні рівні сигналів на різних висотах споруди (рис. 6).

Слід відзначити близькість експериментальних і теоретично розрахованих власних частот коливань дзвіниці (табл. 1), що свідчить про адекватність математичної моделі та задовільний технічний стан об'єкта. Амплітуди коливань поступово зростають за висотою до позначки $30,08$ м. На висоті $33,58$ м амплітуда коливань дещо зменшується, що є наслідком зміни поперечних розмірів дзвіниці і відповідної зміни радіуса розташування точки вимірювання [2, 7].

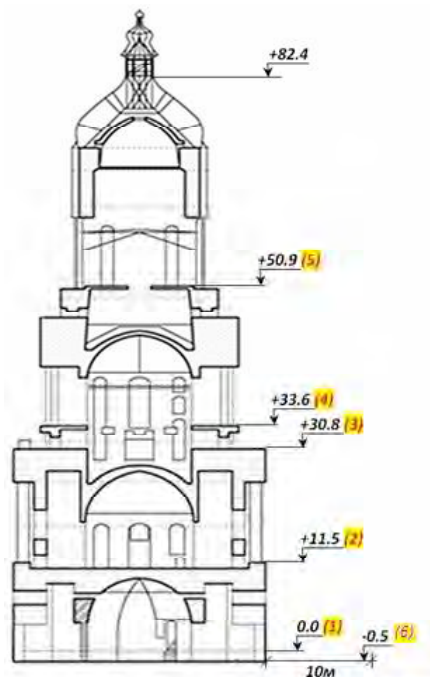


Рис. 5. Схема розміщення сейсмоприймачів за висотою дзвіниці

Fig. 5. Layout of seismometers height of the bell tower

Порівняльний спектральний аналіз записів швидкості та прискорення поширення коливань, за-реєстрованих на різних поверхах дзвіниці. Під час аналізу трикомпонентних записів швидкості та прискорення було знайдено, що деякі частини цих записів мають значні зовнішні шумові спотворення, спричинені рухом зовнішніх об'єктів різної природи відносно дзвіниці. Для нівелювання впливу цих завад на результати аналізу було відібрано тільки ті частини записів швидкості та прискорення, які мали найменш яскраво виражені значні відхилення (з різними знаками) від середнього значення їх амплітуд. Використання таких "чистих" частин записів швидкості та прискорення коливань дало змогу отримати точніші значення амплітудних спектрів і частотного розподілу коливань за спектрального аналізу.

На рис. 7 показано зразок трикомпонентних записів швидкості і прискорення в точці 5 на четвертому поверсі дзвіниці, на яких не було чітко виражених перешкод від транспортного шуму та інших зовнішніх впливів від рухомих об'єктів.

Порівняльний аналіз було виконано для синхронних записів швидкості та прискорення, за-реєстрованих у точці 5 (табл. 2), із записами в саду на відстані 10 м від дзвіниці в точці 6 (табл. 2) (рис. 8).

Таблиця 2. Значення висоти точок вимірювання та часовий інтервал проведення спостережень за київським часом

Table 2. The value of the height measurement points and the time interval of observation Kyiv time

№ п/п	Точка вимірювання	Висота, м	Період часу вимірювань (GMT+2)
1	1-й поверх	0	10:59–11:14
2	2-й поверх	12,68	12:03–12:28
3	Балкон, 3-й поверх	29,20	13:07–13:26
4	Дзвонарня, 3-й поверх	32,66	13:40–14:03
5	4-й поверх	51,96	14:25–14:46
6	Сад, 10 м від дзвіниці	0	15:04–15:34

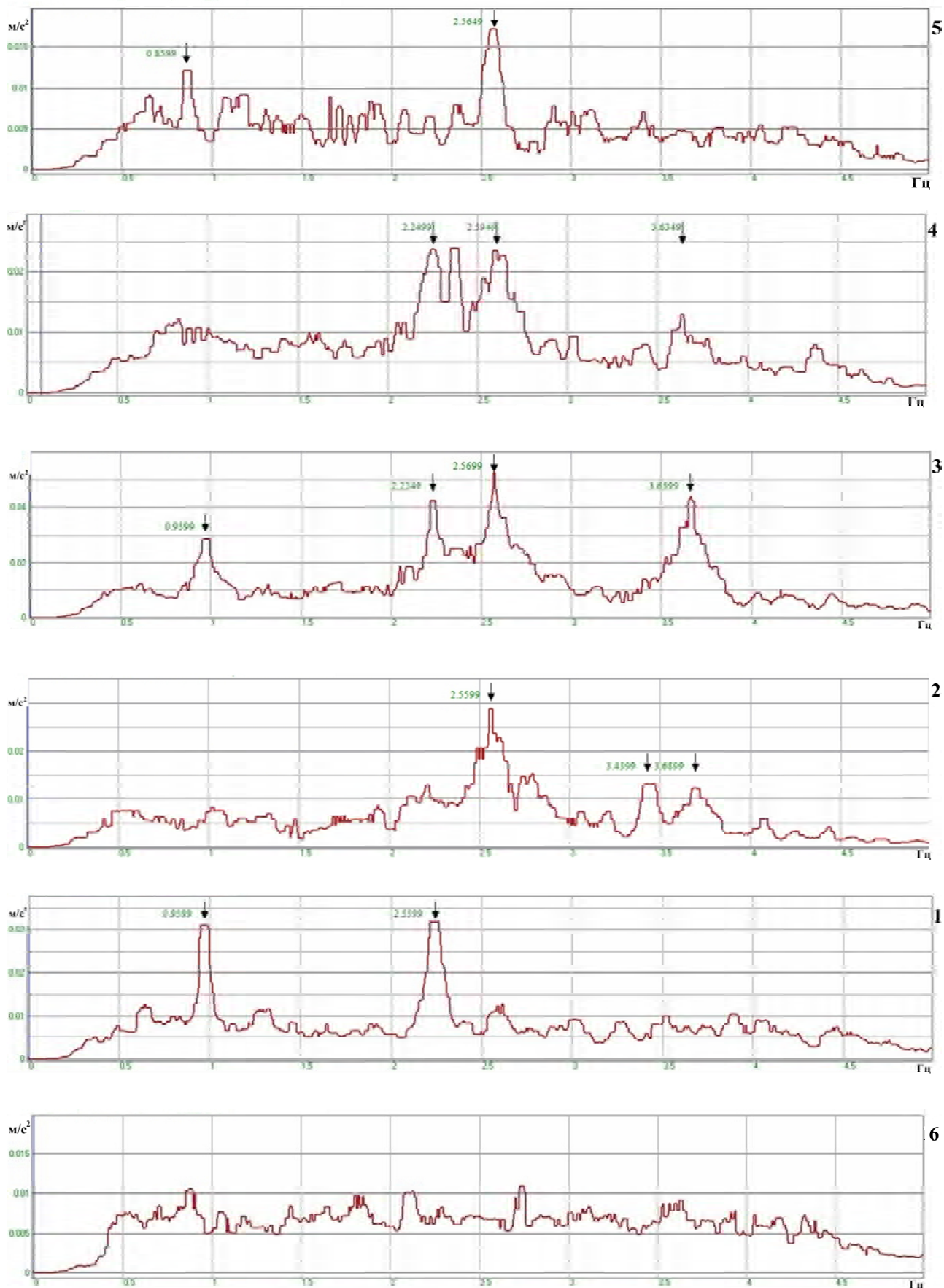


Рис. 6. Розподіл піків основних частот за їх максимальним значенням для N-компоненти (північ–південь) прискорення мікросейсмічних коливань залежно від висоти точки вимірювання (відповідно до рис. 5, зверху вниз точки 5–6)

Fig. 6. The distribution of basic frequencies pass their maximum value for the N-components (north–south) acceleration macroseismic fluctuations depending on the height measurement points (according to Fig. 5 top down point 5–6)

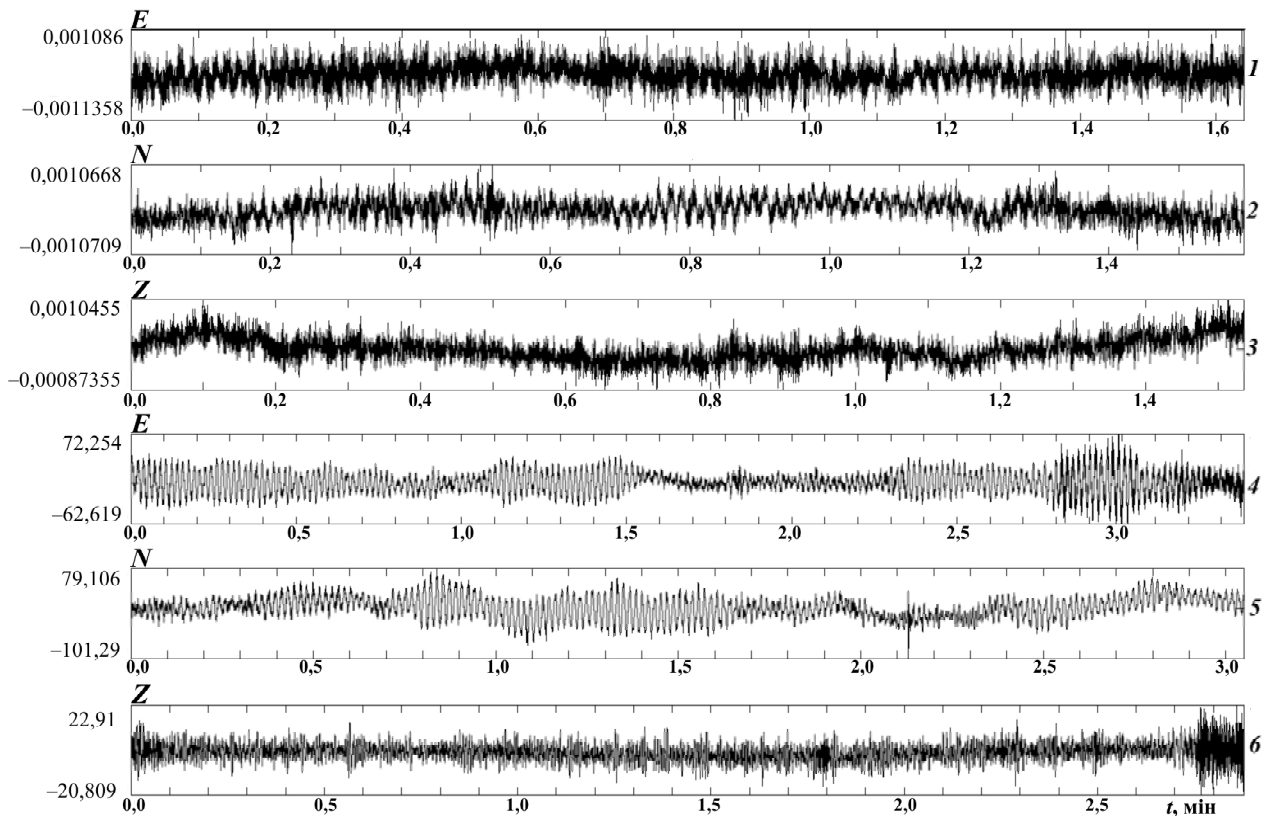


Рис. 7. Покомпонентні записи прискорення (1–3) та швидкості (4–6) на четвертому поверсі дзвіниці (точка 5, табл. 2), використані для розрахунку середніх значень цих параметрів

Fig. 7. Component-wise acceleration records (1–3) and speed (4–6) on the fourth floor of the bell tower (point 5, Tab. 2) used to calculate the average values of these parameters

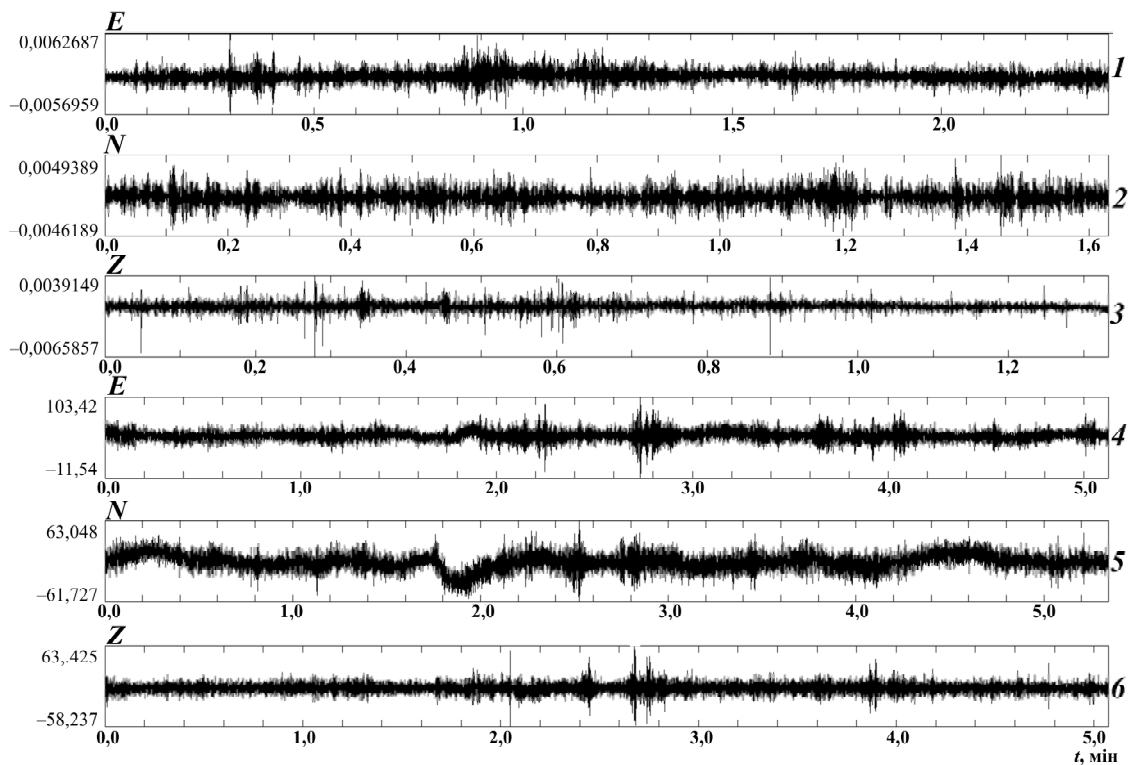


Рис. 8. Покомпонентні записи прискорення (1–3) та швидкості (4–6) в саду, на відстані 10 м від дзвіниці (точка 6, табл. 2), використані для розрахунку середніх значень цих параметрів

Fig. 8. Component-wise records acceleration (1–3) and speed (4–6) in the garden, on distances 10 meters from the bell tower (point 6, Tab. 2) used to calculate the average values of these parameters

Таблиця 3. Усереднені значення прискорення та швидкості поширення коливань у різних точках вимірювання

Table 3. The average value of acceleration and propagation velocity fluctuations at different measurement points

Номер точки та її висота, м	Прискорення, м/с ²			Швидкість, м/с		
	Канал E	Канал N	Канал Z	Канал E	Канал N	Канал Z
1 – 0	0,00023776	0,00024863	0,00029542	0,00267549	0,00365097	0,00267549
2 – 12,68	0,00014717	0,00014057	0,00010250	0,00407567	0,00466204	0,00279637
3 – 29,20	0,00016066	0,00021173	0,00025419	0,01175844	0,01487756	0,00388700
4 – 32,66	0,00018572	0,00018915	0,00017535	0,01396989	0,01868102	0,00366322
5 – 51,96	0,00022753	0,00020027	0,00020906	0,01283471	0,01771011	0,00328214
6 – 0	0,00073436	0,00080098	0,00045920	0,01032887	0,00984910	0,00519490

Аналіз записів швидкості та прискорення на максимальній висоті вимірювань (51,96 м, 4-й поверх) і на території саду поблизу дзвіниці (сад, 0,0 м) показав, що значення амплітуд і частоти цих коливань суттєво різняться. Для параметризації відхилень амплітуд коливань на різних точках спостережень можна використати дві оцінки: а) середнього значення параметрів зареєстрованих коливань; б) їх сумарної спектральної густини у деякому діапазоні частот. Такі оцінки є оптимальними за своїми властивостям для вимірювання як швидкості, так і прискорення.

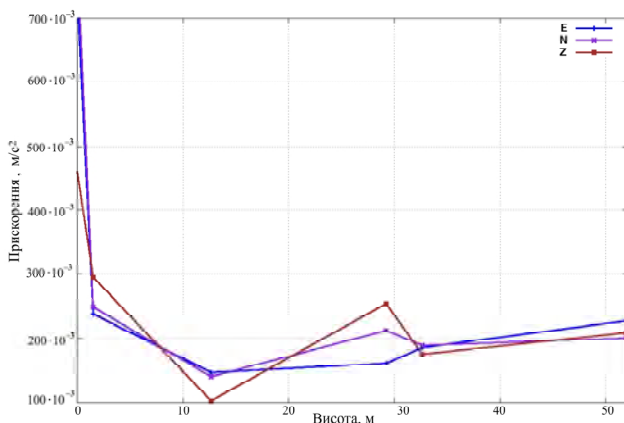
В табл. 3 наведено числові значення усереднених покомпонентних швидкостей та прискорення коливань. Середні значення результатів вимірювань швидкості та прискорення розраховано за допомогою спеціального програмного забезпечення, розробленого в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України на мові програмування C++. Основні функції алгоритму взято з міжнародної системи програмного забезпечення GNU GSL [10].

Результати розрахунку усереднених покомпонентних значень швидкості та прискорення показано на рис. 9. Значні та несуттєві відхилення розрахованих середніх значень цих величин зу-

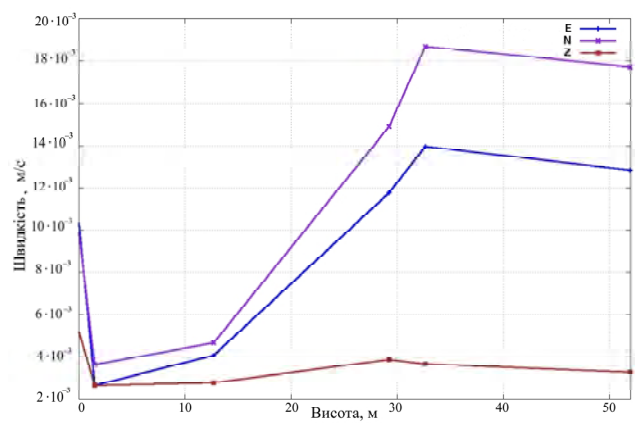
мовлені будівельними властивостями конструкції дзвіниці. Усереднені значення прискорень практично не зростають за висотою дзвіниці. Амплітуда швидкості коливань дзвіниці пов'язана зі значеннями висоти пунктів вимірювань практично за експоненціальним законом.

Для ілюстрації результатів спектрального аналізу записів швидкості на різних поверхах дзвіниці використано N-компоненти записів. Це зумовлено максимальними значеннями середньої амплітуди швидкості поширення коливань на цій компоненті порівняно з швидкістю коливань на E- та Z-компонентах.

Аналіз спектрів N-компоненти швидкості поширення коливань (рис. 10) показав, що на різних рівнях установки пунктів реєстрації цих вимірювань домінують коливання з різними значеннями частот. Наприклад, на першому поверсі переважають коливання з частотою 0,976 562 Гц і мікросейсмічні шумові коливання у достатньо широкому діапазоні – від 1,5 до 2,7 Гц. Із збільшенням висоти встановлення пунктів вимірювань від першого поверху до першої точки на третьому поверсі значно зменшилася ширина діапазону частот мікросейсмічного шуму, але зросли рівні коливань, пов'язані з архітектурною особливістю



а



б

Рис. 9. Залежність усереднених значень компонент E, N, Z векторів прискорень (а) та швидкості поширення коливань (б) від висоти точок вимірювання цих параметрів

Fig. 9. The dependence of the average values of component E, N, Z vector acceleration (а) and propagation velocity oscillations (б) the height of these parameters measuring points

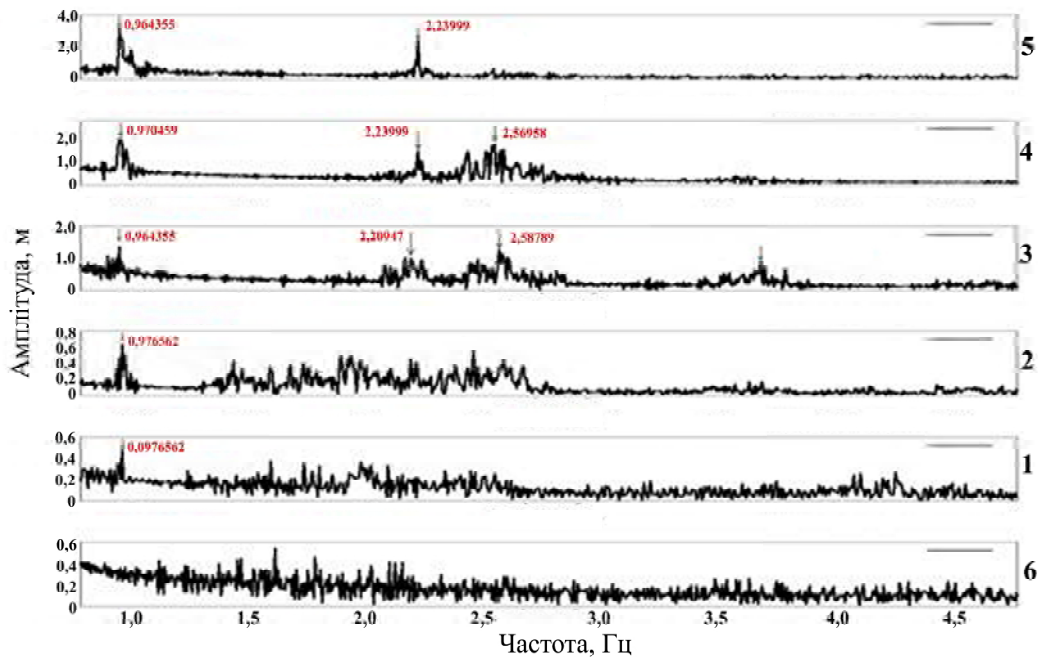


Рис. 10. Розподіл піків основних частот за їх максимальними значеннями, залежно від висоти точки вимірювання швидкості поширення мікросейсмічних коливань на компоненті N

Fig. 10. The distribution of basic frequencies pass their maximum value, depending on the height measurement points propagation macroseismic rate fluctuations in component N

споруди, які відповідають частотам 2,209 47 і 2,587 89 Гц. Найчіткішою є частота власних коливань 2,239 99 Гц на спектрі коливань у пункті вимірювань на 4-му поверсі дзвіниці.

Висновки.

1. За результатами натурних технічних обстежень з обмірами і визначеннями характеристик матеріалів, використанням матеріалів інженерно-геологічних вишукувань побудовано теоретичну модель дзвіниці Успенського собору Києво-Печерської лаври. Адекватність моделі обстежуваному об'єкту підтверджено результатами сейсмологічних спостережень за мікросейсмічним шумом, що відкриває можливість використання моделі для контролю технічного стану споруди.
2. Проведено роботи з вимірювання амплітуд швидкості та прискорення поширення коливань, зареєстрованих на різних поверхах дзвіниці. Отримано трикомпонентні записи реакції споруди на зовнішній мікросейсмічний шум техногенного та природного походження.
3. За результатами спектрального аналізу записів коливань на різних рівнях досліджуваного архітектурного об'єкта чітко виражено збільшення амплітуд на частотах основних мод власних коливань. Амплітуди коливань зростають із збільшенням висоти розташування пунктів сейсмічних спостережень. Результати спостережень збігаються з даними теоретичних розрахунків в інженерному діапазоні частот.
4. Амплітуди усереднених значень прискорення коливань не збільшуються з висотою встановлення пунктів спостереження (рис. 9, а), що свідчить про раціональність геометричної форми дзвіниці і її неуразливість до зовнішніх сейсмічних впливів техногенного та природного походження.
5. Ріст усереднених амплітуд швидкості на різних компонентах коливань (рис. 9, б) з висотою розміщення точок вимірювання відбувається за експоненціальним законом.
6. Розроблено методику періодичного контролювання технічного стану дзвіниці перевіркою стабільності власних частот споруди і амплітудних спектрів коливань, спостережених у її визначених місцях. Методика створює альтернативу проведенню тривалих технічних обстежень.
7. На сьогодні в Україні практично відсутні досвід, а також нормативна і методична документація щодо використання вібраційної діагностики для обстеження будівельних конструкцій і споруд на предмет їх уразливості до сейсмічних впливів. Розроблення відповідних нормативних документів є нагальною потребою у зв'язку із збільшенням кількості унікальних будівель і споруд 4–5-ї категорій складності з класом наслідків СС-3.

1. Белов І.Д. Науково-технічний моніторинг будівель і споруд / І.Д. Белов, В.В. Гайдайчук, О.П. Седов, Н.С. Матіаш // Наука та будівництво. – 2015. – № 3. – С. 17–20.
2. Бугаевский Г.Н. Настенные трехкомпонентные сейсмометрические комплексы для динамической паспортизации зданий / Г.Н. Бугаевский, А.В. Багмут // Стро-

- ительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 65. – С. 98–103.
3. *Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва: ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013 [Чинний з 2013-09-01].* – К.: Мінрегіон України, 2013. – 40 с. – (Національний стандарт України).
 4. *Демчишин М.Г.* Геологічне середовище території центральної історичної частини м. Києва (інженерно-геологічні аспекти): Звіт про НДР / М.Г. Демчишин, В.Ф. Рибін, Г.І. Рудько, І.А. Черевко. – К., 2006.
 5. *Звіт про обстеження технічного стану несучих конструкцій III ярусу пам'ятки архітектури “Дзвіниця Успенського собору”:* ох. № 2 Києво-Печерської лавр. – ВЦБК. – К., 2011.
 6. *Звіт про інженерно-геологічні вишукування ДП Інститут “Київгео” / ВАТ “Київпроект”.* – К., 2010.
 7. *Савин С.Н.* Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010 / С.Н. Савин, С.В. Демишин, И.В. Ситников // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7. – С. 33–39.
 8. *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.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Будівельні норми України).
 9. *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів.* Науково-технічний супровід будівельних об'єктів: ДБН В.1.2-5:2007 [Чинні від 2008-01-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 14 с. – (Будівельні норми України).
 10. *GNU Scientific Library [Електронний ресурс].* – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/GNU_Scientific_Library (дата звернення: 21.01.2016).
 11. *CMG-40T Triaxial Broadband Seismometer. Operator's guide [Електронний ресурс].* – Режим доступу: <https://www.guralp.com/documents/MAN-040-0001.pdf> (дата звернення: 21.01.2016).

Надійшла до редакції 29.02.2016 р.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЕТНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ БОЛЬШОЙ ЛАВРСКОЙ КОЛОКОЛЬНИ КИЕВО-ПЕЧЕРСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

А.В. Кендзера¹, И.Д. Белов², С.В. Щербина¹, Ю.В. Лесовой¹, В.А. Ильенко¹, В.В. Гайдайчук², О.П. Дедов², И.А. Черевко³

¹*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Палладина, 32, Киев 03680, Украина, e-mail: kenzera@ighf.kiev.ua, pohup@ukr.net, lisovyi@ukr.net, hgy@yandex.ua*

²*Киевский национальный университет строительства и архитектуры, просп. Воздухофлотский, 31, Киев-037, 03680, Украина, e-mail: vcbk@ukr.net*

³*Национальный Киево-Печерский историко-культурный заповедник, ул. Лаврская, 9, Киев 01015, Украина, e-mail: ira071165@yahoo.com*

Рассмотрены результаты исследовательских работ по изучению сейсмостойкости Большой лаврской колокольни, исследована ее реакция на внешние сейсмические воздействия разного происхождения. Приведены результаты спектрального анализа наблюдаемых записей сейсмических колебаний. Определены собственные частоты колебаний колокольни. Проведен анализ экспериментальных данных сейсмических наблюдений и выполнено сравнение с теоретической моделью колебаний колокольни. Большая лаврская колокольня является историческим памятником архитектуры национального значения. Она построена в 1731–1744 гг. и представляет собой кирпичную восьмигранную в плане четырехъярусную башню высотой 96,87 м, завершающуюся большим куполом и малым куполом с крестом. Измерение сейсмических колебаний проводилось с помощью акселерометра ZET 048C и велосиметра GURALP CMG-40T на четырех уровнях колокольни и на расстоянии 10 м от нее. Точки наблюдений располагались в проемах наружных несущих стен для исключения фоновых воздействий от колебаний второстепенных элементов конструкции колокольни. В результате получены трехкомпонентные записи реакции колокольни на внешний микросейсмический шум. Определены амплитуды наблюдаемых колебаний и выполнен спектральный анализ их скорости и ускорения. Результаты натуральных наблюдений совпали в инженерном диапазоне частот со значениями параметров колебаний, рассчитанных для математической модели колокольни. Установлено, что усредненные амплитуды ускорения не увеличиваются с высотой точек наблюдений над земной поверхностью. Усредненные амплитуды скорости изменяются с высотой установки точек наблюдения по экспоненциальному закону. Разработана методика периодического исследования технического состояния колокольни путем проверки стабильности собственных ее частот и амплитуд зарегистрированных колебаний в определенных точках колокольни. Методика не требует проведения длительных технических обследований сооружения.

Ключевые слова: спектральный анализ, спектрограммы, вибрационная диагностика, собственные колебания, виброускорение, вибростойкость.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF CALCULATED VIBRATING MODELS OF GREAT LAVRA BELL TOWER IN LAVRA RESERVE

O.V. Kendzera¹, I.D. Byelov², S.V. Shcherbina¹, Yu.V. Lisoviy¹, V.A. Ilyenko¹, V.V. Haydaychuk², O.P. Dyedov², I.A. Cherevko³

¹Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, 32 Palladin Ave., Kyiv 03680, Ukraine, e-mail: kendzera@igph.kiev.ua, nohup@ukr.net, lisoviy@ukr.net, hgy@yandex.ua

²Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitroflotsky Ave., Kyiv-037 03680, Ukraine, e-mail: vcbk@ukr.net

³National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Preserve, 9 Lavrska Str., Kyiv 01015, Ukraine, e-mail: ira071165@yahoo.com

The **purpose** of the article is to investigate seismic resistance of the Great Lavra Bell Tower; to study its seismic response to external influences of various origins; to present the results of the spectral analysis of seismic oscillations records; determine the bell tower's own frequencies of vibrations; to analyse the experimental data obtained in the seismic studies; and to compare the results with the theoretical model of vibrations of the bell tower. The Great Lavra Bell Tower is a historic monument of national importance. Built in 1731–1744, it is a four-tower brick octagonal of 96,87 m high domed with a cross and crown.

Design/methodology/approach. Measurements of seismic waves were carried out using the accelerometer ZET 048C and velocimeter GURALP CMG-40T on four levels of the bell tower and 10 meters from it. Observation points were located outside the openings in the bearing walls to eliminate background effects from fluctuations of secondary structural elements of the bell tower. Based on the results of calculations and the values of the first three forms of natural oscillations of the facilities, the sample rate of the instrument digital recordings was taken as 100 Hz.

Findings. We have obtained three-component seismic recordings of the belfry's response to the influence of microseismic external noise. We have determined observable oscillation amplitudes and carried out a spectral analysis of speed and acceleration. The results of the field observations agreed in the engineering frequency range of vibrations with the calculated values of the parameters for the mathematical model of the bell tower. We have identified three main peaks that match the value of the natural frequencies of the building and have maximum signal levels at different heights of the building. We have found that the average values of acceleration amplitudes do not increase with increasing altitude of the observation points above the earth's surface.

Practical value/implications. The value of the average velocity amplitudes increases exponentially with increasing altitude of the observation points. The observations agree with theoretical calculations in the engineering frequency range. We have developed a method for periodic examination of the technical condition of the bell tower by checking the stability of the frequency and amplitude of the oscillations registered in certain points of the bell tower. The method does not require long-term technical inspections of the building. Currently Ukraine lacks experience, as well as regulatory and methodological documentation on the use of vibration diagnostics to examine building structures and facilities for their vulnerability to seismic effects. Working out of relevant regulations is urgently needed due to the increased number of unique building structures of complexity category 4–5 with effect class SS3.

Keywords: spectral analysis, spectrograms, vibration diagnostics, natural oscillations, acceleration, velocity.

References:

1. Byelov I.D., Haidaichuk V.V., Siedov O.P., Matiash N.S. Naukovo-tekhnichnyi monitorynh budivel i sporud. *Nauka ta budivnytstvo*, 2015, no. 3, pp. 17–20 (in Ukrainian).
2. Bugaevskiy G.N., Bagmut A.V. Nastennyye trekhkomponentnyye seismometricheskie komplekxy dlya dinamicheskoy pasportizatsii zdaniy. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: sbornik nauchnykh trudov*. Dnepropetrovsk, 2012, no. 65, pp. 98–103 (in Russian).
3. Vyznachennia klasu naslidkiv (vidpovidalnosti) ta katehorii skladnosti ob'ektiv budivnytstva: DSTU-N B V.1.2-16:2013 [Chynnyi z 2013-09-01]. Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2013, 40 p. (Natsionalnyi standart Ukrainy) (in Ukrainian).
4. Demchyshyn M.H., Rybin V.F., Rudko H.I., Cherevko I.A. Heolohichne seredovyshe terytorii tsentralnoi istorychnoi chastyny m. Kyieva (inzhenerno-heolohichni aspekty): Zvit pro naukovo-doslidnu robotu, 2006 (in Ukrainian).
5. Zvit pro obstezhennia tekhnichnoho stanu nesuchykh konstruksii III yarusu pamiatky arkhitektury "Dzvinysia Uspenskoho Soboru". Kyiv, Kyievo-Pecherskoi Lavr. VTsBK, 2011 (in Ukrainian).
6. Zvit pro inzhenerno-heolohichni vyshukuvannya DP "Instytut «Kyivheo»". Kyiv, VAT "Kyivproekt", 2010 (in Ukrainian).
7. Savin S.N., Demishin S.V., Sitnikov I.V. Monitoring of unique buildings with using of dynamic parameters according to GOST R 53778-2010. *Magazine of Civil Engineering*, 2011, no. 7, pp. 33–39 (in Russian).
8. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnikh ob'ektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnikh konstruksii ta osnov: DBN V.1.2-14-2009 [Chynni vid 2009-12-01]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy, 2009, 43 p. (Budivelni normy Ukrainy) (in Ukrainian).
9. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnikh ob'ektiv. Naukovo-tekhnichnyi suprovit budivelnikh ob'ektiv: DBN V.1.2-5:2007 [Chynni vid 2008-01-01]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy, 2007, 14 p. (Budivelni normy Ukrainy) (in Ukrainian).
10. GNU Scientific Library. Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/GNU_Scientific_Library (Accessed 21 January 2016).
11. CMG-40T Triaxial Broadband Seismometer. Operator's guide. Available at: <https://www.guralp.com/documents/MAN-040-0001.pdf> (Accessed 21 January 2016).

Received 29/02/2016