

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
"ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА  
АРХІТЕКТУРИ"

На правах рукопису



**ЗАГІЛЬСЬКИЙ ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 624.15:624.042.7

**УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ АНАЛІЗУ  
ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ "ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ –  
СПОРУДА" ДЛЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

05.23.02 – основи і фундаменти

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник:

**СЄДІН Володимир Леонідович,**  
доктор технічних наук, професор



ДНІПРО – 2016

## ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	2
ВСТУП.....	6
<b>РОЗДІЛ 1 ПЕРЕВАЖАЮЧІ ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ ТА ІСНУЮЧІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЖОРСТКИХ МАСИВНИХ БУДІВЕЛЬ З ГРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ВПЛИВІ.....</b>	
1.1 Аналіз проблеми взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" для будівель і споруд атомних електростанцій.....	13
1.2 Аналіз нормативної документації щодо питання динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".....	16
1.3 Ефекти динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".....	18
1.3.1 Інерційна взаємодія.....	19
1.3.2 Кінематична взаємодія.....	20
1.4 Огляд моделей і методів розрахунку жорстких масивних будівель при динамічному впливі.....	21
1.5 Моделі поведінки ґрунтів при динамічному впливі в системі "основа – фундамент – споруда".....	27
1.5.1 Методики розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи.....	32
1.5.2 Прямий метод взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".....	39
1.6 Застосовність методів аналізу динамічної взаємодії жорстких масивних споруд з ґрунтовою основою в умовах інженерної практики.....	42
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	44

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ "ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – СПОРУДА" .....	45
2.1 Побудова розрахункової скінченно-елементної та динамічної моделі споруди.....	49
2.2 Розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи.....	52
2.3 Розрахунок динамічної та скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі.....	60
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	62
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ "ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – СПОРУДА" ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ВПЛИВІ.....	63
3.1 Характеристика проммайданчика та загальні відомості досліджуваної будівлі.....	65
3.2 Основні характеристики вимірювальних приладів.....	69
3.3 Встановлення вимірювальних приладів та створення динамічного впливу.....	71
3.4 Реєстрація даних та обробка інформації повномасштабних польових досліджень.....	74
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	84
РОЗДІЛ 4 АНАЛІТИЧНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ СИСТЕМИ "ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – СПОРУДА" .....	85
4.1 Обґрунтування розрахункових передумов побудови чисельних моделей.....	86
4.2 Удосконалений метод аналізу динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".....	87

4.2.1 Тривимірна скінченно-елементна модель досліджуваної будівлі.....	88
4.2.2 Розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи досліджуваної будівлі.....	89
4.2.3 Розробка та верифікація динамічної моделі досліджуваної будівлі.....	109
4.2.4 Розрахунок системи "основа – фундамент – споруда" за удосконаленим методом. Аналіз результатів.....	115
4.3 Прямий метод взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда". Аналіз результатів.....	123
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	130
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	131
5.1 Описання інтенсивності сейсмічного впливу.....	133
5.2 Розробка скінченно-елементної та динамічної моделі досліджуваної будівлі.....	133
5.3 Розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи.....	137
5.4 Розрахунок поповерхових спектрів реакції та напружено-деформованого стану досліджуваної будівлі.....	140
5.5 Порівняння методів врахування ґрунтової основи в системі "основа – фундамент – споруда".....	144
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5.....	150
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	153
ДОДАТОК А Методика розрахунку коефіцієнтів жорсткості та демпфування ґрунтової основи проф. Дж. Газетаса .....	172



ДОДАТОК Б Об'ємно-планувальне і конструктивне рішення експериментально досліджуваної будівлі.....	178
ДОДАТОК В Порівняння результатів, отриманих чисельними та натурними дослідженнями.....	184
ДОДАТОК Г Обґрунтування густоти сітки скінченно-елементної моделі.....	191
ДОДАТОК Д Довідки про впровадження.....	194
ДОДАТОК Е Сертифікат відповідності для використовуваного розрахункового програмного забезпечення.....	200

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Оскільки атомні електростанції (АЕС) виробляють більшу частину загальнонаціонального обсягу електроенергії, вони є ключовими компонентами енергетичної індустрії України. Імовірність надзвичайно великих збитків від потенційної аварії природного або техногенного походження на об'єктах, що мають потенційну екологічну небезпеку, обумовлює підвищену відповідальність до проектування та експлуатації будівель і споруд АЕС [34, 51, 80]. До таких загроз безпосередньо належать і сейсмічні явища, що можуть призводити до екологічних катастроф зі значними людськими жертвами [101, 102].

Останнім часом сейсмічність території України була уточнена, що вплинуло на її загальне підвищення. Згідно з регламентованими міжнародними та галузевими нормами встановлено, що при проектуванні та обстеженні будівель і споруд АЕС необхідно враховувати особливі впливи, зокрема, потрібен розрахунок сейсмостійкості й обчислення поповерхових спектрів реакції.

Відповідно до регламентованих міжнародних та національних норм при розрахунку поповерхових спектрів реакції, а також оцінці сейсмостійкості будівель і споруд АЕС, необхідно враховувати взаємодію елементів системи "основа – фундамент – споруда", при цьому слід проводити опис та обґрунтовувати застосування методів розрахунку.

Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) приділяє підвищену увагу врахуванню ризиків виходження з ладу систем, важливих для безпеки, при максимальній проектній аварії, проектній аварії і сейсмічній дії. У цих умовах актуальним питанням є створення надійних проектних рішень аналізу взаємодії системи "грунт – фундамент – споруда" об'єктів АЕС з метою обчислення поверхових спектрів реакції, які є вихідними даними для подальших розрахунків і кваліфікації обладнання.

Із вищесказаного випливає, що одним із важливих питань є обґрунтований вибір методу динамічного аналізу системи "основа – фундамент – споруда".

Таким чином, дослідження динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" для будівель і споруд АЕС, а також обґрунтування ідеалізованих методик на практиці є актуальною науково-прикладною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:**

Дослідження, викладені в дисертації, виконані згідно з напрямом наукової роботи кафедри "Основи і фундаменти" ДВНЗ ПДАБА, відповідно до програм науково-дослідних робіт: "Удосконалення методів статичного та динамічного розрахунку напружено-деформованого стану системи "основа – фундамент – надфундаментна будівля" (№ держреєстрації 0113U006156, рівень участі дисертанта – виконавець), "Удосконалення методів розрахунку напружено-деформованого стану основ фундаментів будівель і споруд у складних інженерно-геологічних умовах" (№ держреєстрації 0116U000776, рівень участі дисертанта – виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення методу розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі для будівель і споруд АЕС із плитним фундаментом, обґрунтування цього методу і розробка його алгоритму, виконання верифікації й обґрунтування способів моделювання ґрунтової основи при взаємодії з надземними конструкціями.

Сформульована мета дисертаційної роботи зумовила необхідність вирішення наступних задач:

– проаналізувати теоретичні та експериментальні роботи, міжнародні та вітчизняні нормативні документи з оцінки взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда";

– провести повномасштабні польові дослідження взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при динамічному впливі

й отримати записи динамічної реакції у контрольних точках на поверхні ґрунту та на відмітках будівлі;

- удосконалити метод розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі для будівель і споруд атомних електростанцій із плитним фундаментом;

- провести дослідження системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі із використанням удосконаленого методу розрахунку взаємодії ґрунтової основи з надземними конструкціями споруди;

- виконати чисельні дослідження системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі з використанням прямого методу взаємодії (моделювання ґрунту об'ємними елементами);

- порівняти результати чисельних досліджень із даними натурного експерименту.

**Об'єкт дослідження** – процеси взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі.

**Предмет дослідження** – кінематичні характеристики (переміщення, швидкості, прискорення) системи "основа – фундамент – споруда".

**Методи дослідження:**

- аналіз існуючих методів розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда";

- метод скінченних елементів (МСЕ);

- верифікаційні розрахунки для перевірки точності програмних комплексів, що використовуються;

- польові експериментальні дослідження взаємодії ґрунтової основи і споруди при динамічному впливі з подальшими чисельними розрахунками кінематичних параметрів будівлі;

- математичне моделювання задач взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при дії сейсмічного впливу з використанням удосконаленого методу.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- одержано нові експериментальні дані амплітудних і частотних характеристик будівлі з плитним фундаментом в умовах повномасштабних польових досліджень взаємодії ґрунтової основи зі спорудою при періодичних навантаженнях;
- удосконалено метод розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при динамічному впливі з урахуванням в'язко-пружних властивостей ґрунтової основи; розроблено комбінований алгоритм аналітичних та числових розв'язків, що дозволяє підвищити ефективність обчислення поповерхових спектрів реакції жорстких масивних будівель із плитним фундаментом;
- одержав подальший розвиток метод визначення власних частот коливань споруд та ґрунту шляхом використання перетворення Фур'є записів мікросейсм, що дозволяє визначити залежності зміни амплітуд коливань досліджуваної конструкції від власних частот;
- вперше доведено, що використання удосконаленого методу розрахунку взаємодії ґрунтової основи і споруди дозволяє обчислити спектри реакції будівель в зонах розташування обладнання, що має суттєве значення для кваліфікації систем, важливих для безпеки енергоблоків АЕС.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- обґрунтовано застосування удосконаленого методу розрахунку жорстких масивних будівель із плитним фундаментом на ґрунтовій основі, що дозволяє визначити сейсмічні параметри (поповерхові акселерограми та спектри реакції) при сейсмічному впливі;
- враховані при виконанні робіт із отримання поповерхових спектрів реакції та максимальних прискорень будівель і споруд Южно-Української АЕС, що містять обладнання систем, важливих для безпеки (СВБ);

- враховані при розрахунку сейсмічних параметрів та оцінці сейсмостійкості будівель і споруд, що містять устаткування СВБ енергоблоків №1, 2, 3, 4 Запорізької АЕС;
- враховані при визначенні максимальних сейсмічних навантажень, за яких зберігається сейсмостійкість елементів трубопроводів та устаткування будівель реакторних відділень № 1, 2 Запорізької АЕС з урахуванням їх фактичного технічного стану;
- впроваджені в навчальний процес ДВНЗ ПДАБА при викладанні спецкурсу на випускаючій кафедрі та виконанні магістерських робіт зі спеціальності 192 "Будівництво та цивільна інженерія".

**Особистий внесок здобувача** в наукових працях, опублікованих у співавторстві, полягає в:

- числовому моделюванні та аналізі взаємодії ґрунтової основи з залізобетонними конструкціями при статичних навантаженнях в розрахунковому комплексі Robot structural analysis professional [72];
- визначенні сейсмостійкості будівель підвищеної категорії відповідальності з урахуванням сейсмічних умов майданчика та взаємодії з ґрунтовою основою [79, 94];
- оцінюванні напружено-деформованого стану (НДС) будівель і споруд атомних електростанцій із використанням удосконаленого методу аналізу системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі [71, 77];
- проведенні експериментальних польових досліджень та обробці результатів натурної оцінки взаємодії ґрунтової основи і споруди при ударному впливі на ґрунт [74];
- обґрунтуванні основних теоретичних принципів моделювання ґрунтової основи при динамічному розрахунку системи "основа – фундамент – споруда" [137, 138];
- розробці чисельної моделі та її верифікації за допомогою власних частот, отриманих у результаті чисельних і натурних досліджень [78];

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались, обговорювались та одержали позитивну оцінку на наукових конференціях і семінарах:

- науково-практичній конференції молодих вчених "Новітні технології ХХІ сторіччя та проблеми екології" (м. Дніпропетровськ, 2013 р.);
- XII міжнародній студентській науковій конференції "Engineer of the 3rd Millenium" (м. Дніпропетровськ, 2013 р.);
- VII науковій конференції з міжнародною участю "Савиновські читання" (м. Санкт-Петербург, 2014 р.);
- науково-практичній конференції молодих вчених "Наука і техніка: перспективи ХХІ століття" (м. Дніпропетровськ, 2014 р.);
- міжнародній конференції "Проблеми геотехніки – 2015" під егідою міжнародного товариства з механіки ґрунтів та геотехніки (м. Київ, 2015 р.);
- семінарі "Будівництво будівель та споруд у сейсмічних районах України", що проходив у базовій організації Мінрегіону України з питань сейсмостійкого будівництва ДП "Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій" (м. Київ, 2015 р.);
- наукових семінарах кафедри основ і фундаментів ДВНЗ ПДАБА (2013-2016 рр.).

**Публікації.** Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи опубліковані у 10 наукових працях, у тому числі у 8 статтях (7 – у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 1 – у зарубіжному виданні) і 2 тезах доповідей.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і шести додатків. Робота містить 20 таблиць і 58 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 201 сторінка. Список використаних джерел містить 146 найменувань на 19 сторінках. Додатки наведено на 30 сторінках.

Робота виконана на кафедрі основ і фундаментів ДВНЗ ПДАБА в період навчання в аспірантурі протягом 2013...2016 рр. під керівництвом Заслуженого діяча науки и техніки України, д. т. н., проф. Сєдіна В. Л., якому здобувач висловлює щирю подяку за професійне керівництво та підтримку.

Автор також висловлює подяку:

- Завідувачу лабораторії дослідження атомних та теплових електростанцій ДВНЗ ПДАБА, с.н.с. Бауску Є. А.
- Старшому науковому співробітнику лабораторії дослідження атомних та теплових електростанцій ДВНЗ ПДАБА, к.т.н., Бауску О. Є.



# РОЗДІЛ 1

## ПЕРЕВАЖАЮЧІ ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ ТА ІСНУЮЧІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЖОРСТКИХ МАСИВНИХ БУДІВЕЛЬ З ГРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ВПЛИВІ

### 1.1 Аналіз проблеми взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" для будівель і споруд атомних електростанцій

Жорсткі вимоги щодо безпеки атомних електростанцій повинні виконуватися для всіх передбачених нормативними документами розрахункових ситуацій, у тому числі і при сейсмічних впливах. Безпека АЕС забезпечується надійністю роботи всіх систем і елементів. Для цього при проектуванні й обстеженні масивних споруд і будівель підвищеної категорії відповідальності необхідно забезпечити працездатність обладнання і систем, важливих для безпеки експлуатації енергоблоків АЕС, що потребує вирішення низки специфічних задач. Однією з таких задач є проблема взаємодії фундаменту з ґрунтовою основою. Урахування взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" сприяє отриманню більш коректних результатів, що вкрай важливо для будинків і споруд атомних електростанцій з огляду на їх підвищену відповідальність. При цьому точність одержуваних результатів забезпечується насамперед обґрунтованим вибором розрахункової моделі ґрунтової основи і визначення для неї розрахункових характеристик.

Останнім часом проблемі врахування ґрунтової основи в комп'ютерному моделюванні конструкцій приділяється значна увага. Визначення поповерхових спектрів, а також аналіз НДС будівель в системі "основа – фундамент – споруда" викликає підвищений інтерес серед вітчизняних і зарубіжних фахівців [17, 53, 84, 125]. Цій темі присвячена велика кількість публікацій [76, 100]. Однак огляд вітчизняних і зарубіжних

літературних джерел дозволяє стверджувати, що при всій важливості проблеми, існує незначна кількість експериментальних досліджень з оцінки динамічної взаємодії ґрунтових основ і споруд, а також подальше порівняння зареєстрованих даних із результатами, отриманими за методами розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".

Дослідженню проблеми взаємодії ґрунтової основи зі спорудою присвячені сучасні роботи В. А. Банаха [5], І. П. Бойка [9, 10], Ю. Л. Винникова [12], М. П. Дубровського [23], К. В. Єгупова [31], М. Л. Зоценка [25, 26], Калюха Ю. І. [27], Ю. О. Кірічека [30], В. В. Кулябка [35, 36, 37, 38, 39], Ю. І. Немчинова [41], О. А. Савицького [63], А. М. Самедова [64], В. О. Сахарова [66, 67, 68, 69], В. Л. Сєдіна [73, 75, 138], З. Г. Тер-Мартиросяна [85, 86, 87], О. М. Трофимчука [91], А. Г. Тяпкіна [92], В. Б. Швеця [81], Н. С. Швець [32].

Фундаментальні дослідження проблеми взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" викладені в роботах М. Н. Гольдштейна [14] М. І. Горбунов-Посадова [15, 16], Т. К. Дата (Т. К. Datta) [113], В. О. Ілічова [20, 57], Н. Н'юмарка [44], О. О. Савінова [61, 62], К. Терцагі [88], А. М. Уздіна [93], М. М. Філоненко-Бородіча [95, 96], В. А. Флоріна [97], Дж. Газетаса (Gazetas) [120, 121], Ж. П. Стюарта (J. P. Stewart) [136], Дж. П. Вольфа (John P. Wolf) [143, 144] та ін.

Експериментальні дослідження поведінки ґрунтової основи і споруди при динамічних впливах представлені в роботах Ю. Л. Винникова [1, 2], С. І. Головка [103], В. О. Сахарова [65], С. Тайлилиогла (Tileylioglu) [140], Дж. Н. Фіпса (Phipps) [132], для будівель і споруд АЕС в роботах [111, 118].

Дослідженням сейсмічних впливів з точки зору геофізичних процесів присвячені роботи М. М. Довбніча [4, 105], О. В. Кендзери [28, 45] та ін.

Докладний огляд методів динамічної взаємодії ґрунтової основи зі спорудами АЕС представлений в роботах А. Н. Бірбраєра [8], В. Б. Дубровського [22, 83], А. П. Кірілова [29], Дж. П. Вольфа (Wolf) [143]. Загальні поняття і теорія, що стосуються деяких особливостей динамічної

взаємодії будівель та споруд з ґрунтовою основою, описані в роботах Д. Д. Баркана [6], М. Ф. Барштейна [20], Б. А. Гарагаша [13], Ю. І. Немчинова [42, 56], Л. Р. Ставніцера [82].

У літературних джерелах [7, 8, 20, 21, 93, 96, 109] описані різні моделі ґрунтової основи, які застосовуються при аналізі системи "основа – фундамент – споруда", від спрощених: моделі з безліччю ступенів свободи з зосередженими масами, моделі з пружинами і демпферами; до складних, таких як тривимірні скінченно-елементні моделі. Процедури і методи, що враховують взаємодію ґрунтової основи і споруди при сейсмічній дії, представлені авторами С. Ц. Дутта (Dutta) та Р. Рой (Roy) [116] з вичерпним оглядом літературних джерел. Підхід моделювання ґрунту еквівалентними динамічними характеристиками ґрунтової основи широко використовується інженерами на практиці. У цьому методі поведінка ґрунту представляється простими механічними елементами, такими як пружини і демпфери з частотно-залежними або частотно-незалежними коефіцієнтами жорсткості і демпфування. Розробкою методу розрахунку еквівалентних динамічних характеристик ґрунтової основи (коефіцієнтів жорсткості та демпфування) при сейсмічній дії займалися такі вчені, як Д. Д. Баркан [6], А. Н. Бірбраєр [7, 8], А. С. Велетсос (Veletsos) [142], Дж. П. Вольф (Wolf) [143], Дж. Газетас (Gazetas) [119, 121], Дж. Л. Тазоулас (Tassoulas) [139] та ін.

У своїх наукових роботах Дж. Газетас (Gazetas) запропонував вираження закритого виду (вираз, який можна вирішити в кінцеве число операцій) для обчислення коефіцієнтів жорсткості і демпфування фундаментів довільної форми [121], у той час як А. Н. Бірбраєр розробив коефіцієнти для прямокутних і кільцевих фундаментів. Роботи Дж. Газетаса вважаються еталонними в галузі динамічної взаємодії ґрунтової основи і споруди, при моделюванні основи коефіцієнтами жорсткості і демпфування. Більш складні моделі вирішення проблеми взаємодії ґрунтової основи і споруди використовують метод скінченних елементів. Моделювання ґрунту методом скінченних елементів вимагає реалізації штучних меж, що

характеризують поведінку необмеженого середовища ґрунту або віддалення границь моделювання на значну відстань, щоб хвилі, які виникають при сейсмічному впливі, згасали та не відбивалися від меж моделювання, утворюючи так званий "ефект коробки".

## **1.2 Аналіз нормативної документації щодо питання динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда"**

Відповідно до нормативної документації МАГАТЕ, а саме [123, 134], при обчисленні поповерхових спектрів реакції, а також оцінці сейсмостійкості будівель і споруд АЕС, спорудження та його основу необхідно розглядати разом, тобто враховувати взаємодію елементів системи "основа – фундамент – споруда". Згідно з [123] метою аналізу динамічної взаємодії елементів системи "ґрунт – конструкція" є визначення динамічної реакції споруди з урахуванням ефектів взаємодії між спорудою і середовищем ґрунтової основи, коли комплексна система піддається зовнішнім динамічним навантаженням або впливам, пов'язаних із землетрусом. У цілому аналіз взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" слід виконувати для майданчиків з умовами матеріалу основи ( $1100 \text{ м/с} > V_s > 300 \text{ м/с}$ ) або ( $300 \text{ м/с} > V_s$ ). Для аналізу сейсмічної реакції майданчиків при ( $V_s > 1100 \text{ м/с}$ ) під час моделювання конструкції атомної електростанції може бути прийнято допущення щодо наявності нерухомої основи. Згідно з [114] ефекти динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" повинні враховуватись у: конструкціях, у яких ефекти Р- $\delta$  (2-го порядку) відіграють значну роль; конструкціях з масивними фундаментами, або фундаментами, що глибоко залягають; тонких високих конструкціях, такі як вежі і димові труби, що розглядаються в [115]; конструкціях, які спираються на дуже слабкі ґрунти. У результаті динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент –

споруда" сейсмічна реакція конструкції на пружній основі, тобто конструкції, яка знаходиться на основі, що деформується, буде деякою мірою відрізнятися від реакції такої ж конструкції, що розташована на жорсткому ґрунті (нерухомій основі) і схильна до ідентичного збудження вільного поля, через такі причини [104, 114]:

1) рух фундаменту конструкції на пружній основі буде відрізнятися від руху вільного поля і може містити значну складову гойдання конструкції порівняно з нерухомою основою;

2) основний період вібрації конструкції на пружній основі буде більш тривалим, ніж період вібрації конструкції з нерухомою основою;

3) періоди власних коливань, форми коливань і модальні коефіцієнти конструкції на пружній основі будуть відрізнятися від аналогічних параметрів конструкції, що розташована на нерухомій основі;

4) загальне демпфування конструкції на пружній основі включатиме в себе демпфування ґрунту і внутрішнє демпфування, що виникає на границі системи "основа – фундамент – споруда" як доповнення до демпфування, пов'язаного з надземною частиною конструкції.

Для більшості звичайних будівельних споруд ефекти взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" є сприятливими, оскільки вони зменшують згинальні моменти і зсувні зусилля в різних елементах надземної частини конструкції, проте для конструкцій, перерахованих раніше (зокрема конструкцій із масивними фундаментами, до яких належать будівлі і споруди АЕС), ефекти взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" можуть бути руйнівними [114]. Відповідно до [46] при моделюванні ґрунтової основи її слід представляти у вигляді фрагмента напівпростору, частіше з моделюванням плоскими або просторовими скінченними елементами, або через характеристики жорсткості ґрунтової основи, які визначають із застосуванням замкнених рішень про розподіл напружень у півпросторі. Згідно з [24] коефіцієнти жорсткості і демпфування ґрунтової основи допускається визначати за методикою СНіП 2.02.05 [98]. При цьому

відносно демпфування основи слід приймати не більше 10 % від критичного затухання коливань (логарифмічний декремент коливань 0,6). Відповідно до [52] для спільного розрахунку споруди і ґрунтової основи можуть бути використані аналітичні, чисельні та інші методи (у тому числі метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод граничних елементів та ін.). Відповідно до [123] для представлення середовища ґрунтової основи в аналізі взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" застосовується чотири основні методи: метод моделі з еквівалентними динамічними характеристиками ґрунтової основи (пружини і демпфери); метод тривимірної моделі з нескінченним напівпростором і підконструкціями; метод тривимірної моделі з скінченними елементами і підконструкціями; прямий (однокроковий) метод скінченних елементів у двовимірній вісе-симетричній моделі.

У зв'язку із підвищенням надійності аналітичних процедур, які використовують апробовані закони матеріалознавства, задачу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" можливо вирішити і для дуже деталізованих моделей, однак дана задача буде вимагати чималі затрати праці з обчислювальної точки зору, тому можуть застосовуватися і спрощені методи, якщо підтверджено, що вони є консервативними [134]. Згідно з [90] слід наводити опис методів розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" та обґрунтовувати застосовність цих методів для будівель і споруд АЕС.

### **1.3 Ефекти динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда"**

При аналізі динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" оцінюється сукупна реакція споруди, фундаменту і ґрунтової основи, яка підстилає й оточує фундамент на певне вільне

коливання ґрунту. Ефекти взаємодії ґрунтової основи і споруди відсутні при теоретичній умові ідеально жорсткого фундаменту, що опирається на ідеально жорсткий ґрунт. Отже, взаємодія системи "основа – фундамент – споруда" враховує різницю між фактичною реакцією конструкції та реакцією при теоретичній умові ідеально жорсткої ґрунтової основи. При проведенні аналізу гнучких систем, які розташовані на скелі або на дуже жорсткій ґрунтовій основі, згідно з інженерною практикою можливо ігнорування ефектів динамічної взаємодії ґрунтової основи і споруди, однак для будівель, які розташовані на інших ґрунтах, ефекти взаємодії ґрунтової основи і споруди характеризуються як результат інерційної взаємодії та кінематичної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" [113, 126, 136].

### 1.3.1 Інерційна взаємодія.

Сили інерції, які виникають завдяки віброуючій будівлі, передаються на фундамент та підстиляючу ґрунтову основу, що в свою чергу призводить до збільшення переміщень на рівні відмітки фундаменту. У результаті збільшується період коливань і споруда стає більш гнучкою [113]. Цей тип взаємодії показаний на рисунку 1.1.

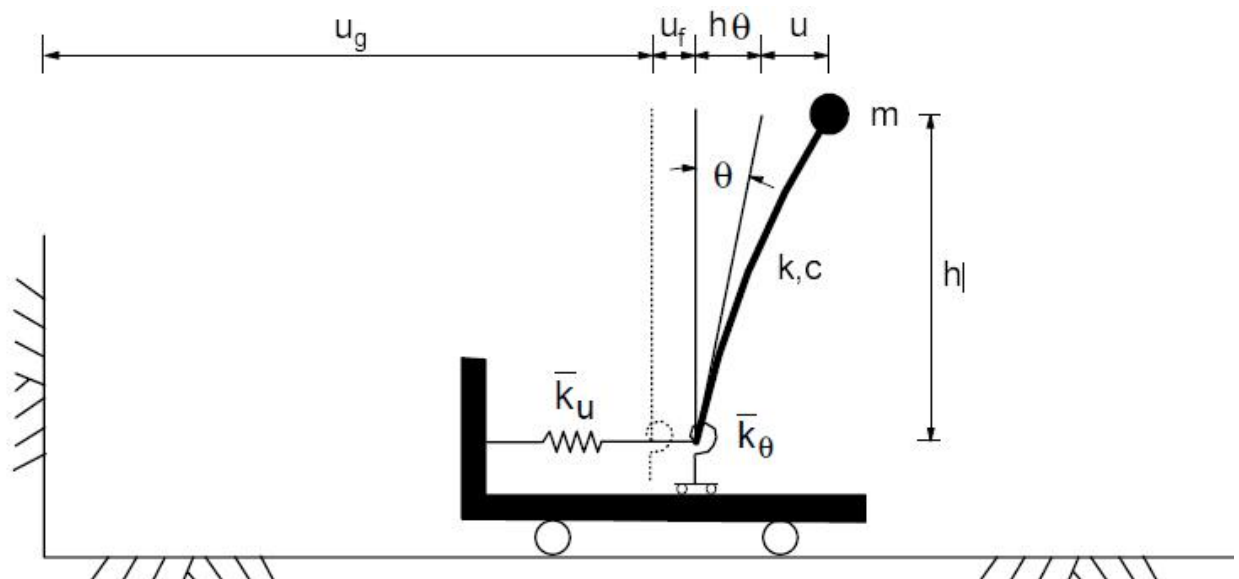


Рис. 1.1. Спрощена модель аналізу інерційної взаємодії

Спрощена модель інерційної взаємодії являє собою стрижневу модель з одним ступенем свободи, яка включає в себе поперечну жорсткість ( $k$ ), масу ( $m$ ), внутрішнє демпфування ( $c$ ) і висоту ( $h$ ) та знаходиться на гнучкому фундаменті, який представлений пружиною розтягання – стискання ( $\bar{k}_u$ ) та пружиною повороту ( $\bar{k}_\theta$ ). Символ " $\theta$ " позначає поворот фундаментної плити,  $u_g$  – переміщення вільної поверхні ґрунту,  $u_f$  – горизонтальні переміщення фундаменту відносно вільної поверхні ґрунту,  $u$  – переміщення фундаменту відносно його основи [117].

### 1.3.2 Кінематична взаємодія.

Кінематична взаємодія визначається як різниця між рухом ґрунту, який записаний на рівні фундаменту будівлі, та рухом ґрунту, що записаний на вільній поверхні [113, 136]. Рух вільної поверхні включає в себе ефекти місцевих умов експлуатації, характеристику землетрусу (у тому числі механізм джерела, місцезнаходження, магнітуду) і підземні ефекти (проходження сейсмічної хвилі), однак кінематична взаємодія не залежить від маси (або ваги) системи. Кінематична взаємодія обумовлена присутністю жорстких елементів конструкцій фундаменту на поверхні або в масиві ґрунту, у результаті чого коливання фундаменту відхиляються від коливань у вільному полі в силу ефекту усереднення і поглиблення (рис. 1.2).

Ефект усереднення взаємодії ґрунтової основи і фундаментної плити можливо виразити за допомогою уявлення, що коливання, яке в умовах відсутності конструкції сталося б у площині підшви фундаменту і в масиві ґрунту, відрізняються просторовою мінливістю. Розташування фундаментної плити поперек траєкторії цих коливальних переміщень проявляє ефект усереднення, у рамках якого коливання фундаменту менше локального максимуму переміщень, які відбулися б в умовах вільного поля. Ефект поглиблення – це зниження коливань в масиві ґрунту по глибині [136].



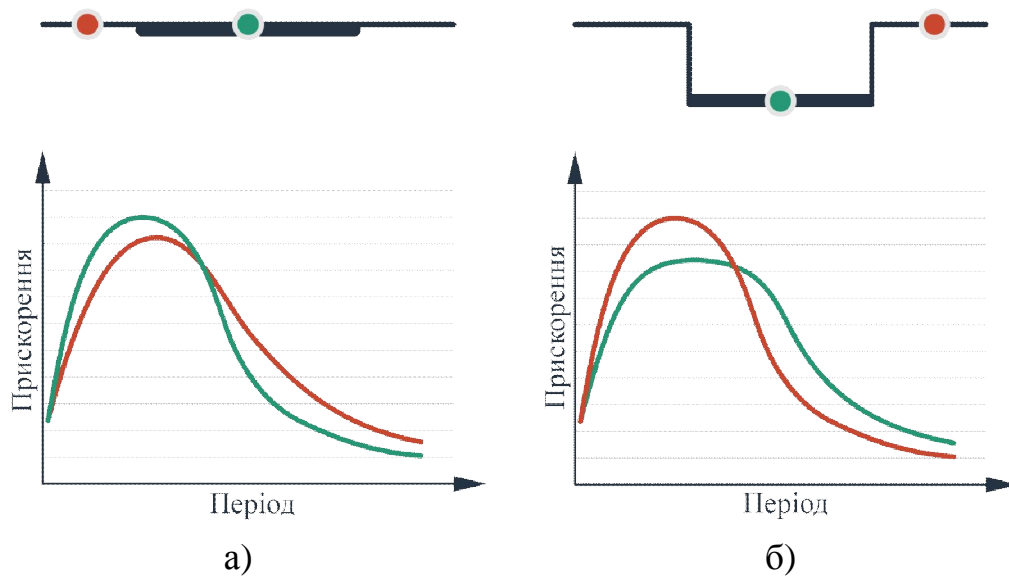


Рис. 1.2. Кінематична взаємодія:  
а) ефект усереднення; б) ефект поглиблення.

Теоретичні моделі ефекту кінематичної взаємодії виражаються у вигляді частотно-залежних відносин амплітуд Фур'є (функцій перетворення), тобто відношень коливальних переміщень фундаменту до переміщень вільного поля.

#### 1.4 Огляд моделей і методів розрахунку жорстких масивних будівель при динамічному впливі

Вибір методу сейсмічного розрахунку обумовлений різними факторами:

- складністю та відповідальністю конструкції;
- співвідношенням її власних частот і переважаючих частот впливу;
- наявністю необхідної обчислювальної техніки та програмного забезпечення;
- об'ємом вихідної інформації і т.п.

Існує кілька методів визначення кінематичних параметрів будівлі та НДС конструкцій при дії сейсмічного навантаження: статична теорія, лінійно-спектральна теорія та прямий динамічний метод.

Статичну теорію сейсмостійкості запропонували Ф. Оморі та Сано [130]. Вона передбачає, що всі власні частоти конструкції вище частот впливу, у даному випадку – спорудження та його основу розглядають як абсолютно жорсткі тіла [8]. При цьому всі точки споруди мають однакові прискорення, рівні прискоренню основи  $j_0$ . Вважається, що до кожної маси  $m_i$  споруди прикладене інерційне навантаження (сейсмічна сила)  $S_i$ :

$$S_i = m_i g A_{max} \quad (1.1)$$

де  $A$  – максимальне прискорення основи, яке виражається в частках сили тяжкості  $g$ .

Використання цієї теорії для пружних конструкцій, що вимушені коливаннями, якими при землетрусі нехтувати не можна, може призводити до істотних похибок. Навантаження на них слід визначати за допомогою динамічного розрахунку.

Ідея спектрального методу визначення сейсмічних сил уперше була запропонована М. Біот (Biot) [108]. Згодом ця ідея знайшла розвиток у роботах І. Л. Корчинського, С. В. Медведєва та ін.

На сьогодні для сейсмічних розрахунків конструкцій спектральний метод розрахунку рекомендується нормативною документацією [24] та широко застосовується на практиці [3, 20, 21, 93]. Із назви зрозуміло, що у вигляді вихідної сейсмічної дії задається спектр реакції. Інтенсивність землетрусу задається величиною пікового прискорення ґрунтової основи  $A_{max}$  (у частках  $g$ ).

Спектральний метод розрахунку, як і статичний, передбачає визначення сейсмічних інерційних навантажень (сил)  $S_i$ , прикладених у центрі ваги маси. На подальших етапах конструкція розраховується на дію

сил  $S_i$ , прикладених до конструкції статично. Динамічні властивості конструкції враховуються при визначенні навантажень  $S_j$ . Для цього рух системи розкладається за формами коливань, тобто представляється як сума деяких рухів (форм коливань) [7].

Якщо розглянути рух всієї системи за однією формою коливань, то всі точки будуть зміщуватися синхронно і форма коливань не змінюється у часі (рис. 1.3).

Сейсмічні навантаження визначаються для кожної форми коливань:

$$S_{ij} = Agm_i\beta(T_j, \gamma_j)\eta_{ij}, \quad (1.2)$$

де  $S_{ij}$  – сейсмічне навантаження за  $j$ -ї формою коливань, що діє на масу  $m_i$ ;

$\beta(T_j, \gamma_j)$  – коефіцієнт динаміки, що залежить в загальному випадку від періоду коливань по  $j$ -ї формі  $T_j$ , коефіцієнта непружного опору  $\gamma_j$  та виду впливу (розрахункової акселерограми основи  $y_0(t)$ );

$\eta_{ij}$  – коефіцієнт форми, що враховує розподіл інерційних навантажень за формами коливань.

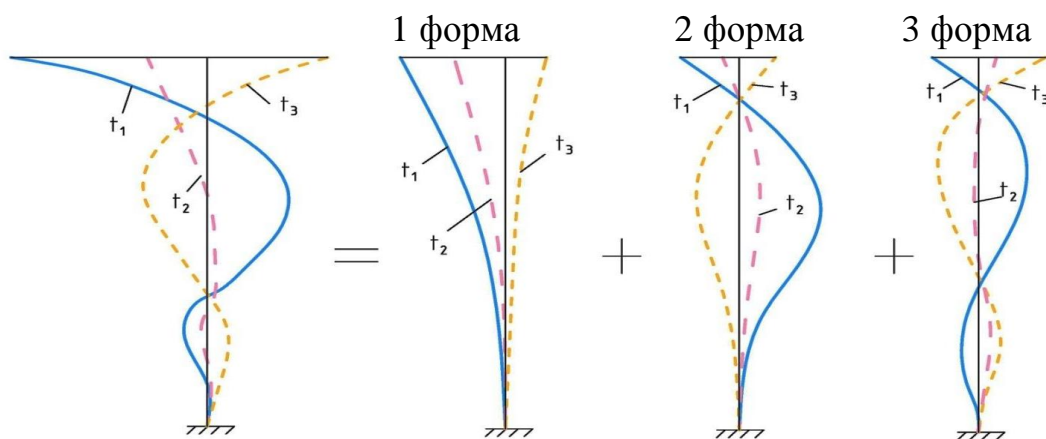


Рис. 1.3. Розкладання руху за формами

Формули розрахунку сейсмічного навантаження у відповідності зі статичним і спектральним методами відрізняються один від одного, по-

перше, наявністю коефіцієнтів динаміки  $\beta$  і форми  $\eta$ , і, по-друге, в спектральному методі розрахунків проводиться для кожної форми коливань.

Перевагою спектрального методу є насамперед те, що спектр реакції може бути побудований шляхом накладення та/або ймовірнісної обробки спектрів, отриманих за багатьма акселерограмами [99]. Тоді він буде відображати досвід багатьох землетрусів, і може коригуватись й уточнюватись при надходженні нових записів про сильні рухи ґрунту. При розрахунку обладнання спектр реакції може бути побудований також і з урахуванням варіації або неточності параметрів системи "основа – фундамент – споруда". Певною перевагою є також те, що навантаження за спектральним методом виходить як квазістатичне (тобто його величина і розподіл по споруді залежать від динамічних параметрів), але в розрахунку міцності воно фігурує як статична, що створює зручність при урахуванні його поєднань з іншими (зазвичай також статичними) навантаженнями [8].

Головним недоліком лінійно-спектральної теорії є неможливість проведення аналізу системи в часовій області для визначення за її допомогою кінематичні параметри будівлі, також неможливий розрахунок нелінійних систем. Таким чином, у рамках лінійно-спектральної теорії не можуть бути чітко враховані особливості поведінки складних конструкцій при динамічному впливі, такі як взаємодія з ґрунтовою основою.

Із кінця 70-х років завдяки розвитку обчислювальної техніки в розрахунках сейсмостійкості споруд почали застосовувати динамічні методи [20, 21, 93, 113]. У цьому методі сейсмічна дія задається записами сейсмічного руху ґрунту (найчастіше акселерограмою). Такого роду обчислення використовуються при розрахунку кінематичних характеристик будівлі та при оцінці сейсмостійкості відповідальних споруд, зокрема АЕС. Цим методом можуть розраховуватися як лінійні, так і нелінійні системи [8].

Для проведення динамічних розрахунків необхідно задати жорсткісні та пружно-демпфуючі властивості конструкції та запис сейсмічної дії.

Даний метод дозволяє обчислити кінематичні характеристики будівлі та детально оцінити сейсмостійкість конструкцій, а також отримати повну інформацію про поведінку споруди при сейсмічному впливі.

Більшість динамічних методів засновано на використанні результатів модального розрахунку. Модальний аналіз проводиться для визначення частот і форм власних коливань конструкцій. Необхідно враховувати, що методи модального розрахунку залежать від типу обраного процесору. Найпоширенішими вирішувачами в розрахункових комплексах, заснованих на методі SE, є прямий і ітераційний вирішувачі систем.

Прямий вирішувач систем використовується для реалізації таких методів: метод блокових ітерацій в підпросторах (BLSI); метод ітерацій в підпросторах (SI); метод Ланцоша; основний метод редукції. У той час, як для ітераційного вирішувача доступні наступні методи: модифікований метод Ланцоша; градієнтний метод Рітца (PCG Ritz); метод сполучених градієнтів із передобумовлювачем (PCG).

Метод Ланцоша являє собою потужний трудомісткий метод, який використовується для вирішення завдань власних значень високого порядку. Цей підхід дозволяє визначати  $n$ -ну кількість необхідних власних значень і форм із заданою точністю. Чим більшу кількість власних пар потрібно визначити, тим помітнішими виявляються переваги методу Ланцоша [124, 135, 131]. Однак застосування методу має деякі обмеження: неможливо розрахувати конструкцію, яка складається з двох або трьох незв'язаних підконструкцій. У такому випадку або кожену конструкцію слід розглядати окремо, або потрібно застосувати інший метод розрахунку, наприклад, метод блокової ітерації в підпросторах (BLSI) або основний метод редукції.

Блоковий метод ітерацій у підпросторах є більш узагальненим порівнянно з методом Ланцоша. Цей метод рекомендується використовувати при вирішенні завдань високого порядку, коли потрібно отримати велику кількість власних значень (більше 10) [143]. Метод BLSI можливо використовувати при розрахунку окремих конструкцій.

Метод ітерацій у підпросторах може використовуватися для розрахунку всіх типів матриць мас [110] і для розрахунку окремих конструкцій, проте при необхідності визначення великого числа власних форм коливання конструкцій – приблизно  $N > 10$  він вимагає великої затрати часу, особливо при вирішенні завдань високого порядку.

Основний метод редукції [110] відомий як модифікований метод Релея-Рітца. Також він представляється як дискретний варіант методу Бубнова-Гальоркіна. Цей алгоритм дозволяє отримати наближені значення декількох власних пар. Для отримання скороченої системи метод вимагає завдання основних ступенів свободи, тобто, можна контролювати процес створення скороченої моделі. Цей метод дозволяє виключити непотрібні ступені свободи зі скороченої моделі та перетворити спочатку складну вихідну задачу з великим числом ступенів свободи на редуковану з порівняно малим числом ступенів свободи. Досвід динамічного розрахунку показує, що можна вирішити цим методом деякі завдання, які при використанні автоматичних методів редукції (методи BLSI, SI і метод Ланцоша) призводять до дуже складних обчислювальних процесів.

Модифікований метод Ланцоша є видозмінним методом Ланцоша в розрахунку псевдоформ для ітераційного вирішувача. Він дозволяє уникнути зберігання, складання і факторизації матриці жорсткості високого порядку. Замість цього застосовується градієнтний метод з передобумовлювачем.

Метод сполучених градієнтів з передобумовлювачем (PCG) [133, 135] рекомендується для визначення малого числа власних форм у модальному розрахунку при використанні ітераційного вирішувача. У більшості випадків він застосовується при розрахунку на вітрове навантаження і для перевірки кількох нижчих форм, отриманих градієнтним методом Рітца (PCG Ritz).

Градієнтний метод Рітца (PCG Ritz) [133] – це швидкий метод визначення системи векторів Рітца при розрахунку псевдоформ із використанням ітераційного вирішувача. Такий підхід може бути дуже

ефективним при сейсмічному і спектральному розрахунку просторових конструкцій.

Найпоширенішими методами знаходження власних форм коливань є метод ітерацій у підпросторах (SI) і метод Ланцоша, які являють собою потужні засоби для вирішення задачі власних значень високого порядку. Вони істотно скорочують час розрахунку і вимоги до обсягу пам'яті на жорсткому диску порівняно з іншими методами. Градієнтний метод Рітца (PCG Ritz) – це оперативний підхід, що дозволяє оцінити поведінку заданої конструкції при сейсмічній дії.

### **1.5 Моделі поведінки ґрунтів при динамічному впливі в системі "основа – фундамент – споруда"**

Дослідженню спільної роботи споруд і ґрунтової основи вченими приділено багато уваги і докладено чимало зусиль в напрямку розробки насамперед загальних теоретичних рішень. Широке поширення отримали різні моделі ґрунтів при вирішенні задач про коливання жорстких фундаментів, розташованих на м'яких (стискуваних) основах. Сучасний метод розрахунку таких фундаментів вперше запропонований П. Л. Пастернаком [54] – у СРСР, Е. Раушем [60] за кордоном, також у роботах Д. Д. Баркана [6], Г. Лоренца [127] та інших авторів.

При аналізі динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" ґрунтова основа має великий вплив на динамічну реакцію будівлі, який виражається у двох основних факторах [8]:

- 1) ґрунтова основа має власну жорсткість, яка знижує власні частоти коливань динамічної системи "основа – фундамент – споруда";
- 2) хвилі, які відбиваються від фундаменту при динамічному впливі розсіюються в ґрунтовій основі та забирають деяку кількість енергії.

Дані фактори впливають на величину динамічної реакції споруд та на частотні параметри отриманих поповерхових спектрів реакції будівлі, а отже і на подальшу кваліфікацію систем, важливих для безпеки будівель підвищеної категорії відповідальності.

Згідно з вищевикладеним для розрахунку кінематичних параметрів будівлі в системі "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі для отримання коректних результатів необхідно враховувати в'язкі та пружні властивості ґрунтової основи.

Суть розроблених на даний момент математичних моделей ґрунтової основи полягає в її уявленні у вигляді деякої системи еквівалентних пружин і демпферів, жорсткість і в'язкість яких описується в числовому виді або експериментально апробованими для різних ґрунтів коефіцієнтами [65].

При визначенні розрахункових характеристик ґрунтового середовища необхідно враховувати такі важливі властивості ґрунтів, як інерційність та демпфуючі властивості, які здійснюють важливий вплив на коливання фундаментів при сейсмічному впливі. У реальних умовах спостерігаються незворотні втрати енергії в ґрунтах при коливаннях унаслідок її витрат на подолання сил внутрішнього непружного опору (в'язкості, тертя між твердими частинками, взаємодії між водою і скелетом ґрунту та ін.) і на розсіювання енергії в навколишній ґрунт за рахунок геометричної розбіжності хвиль збурень різних типів від джерела коливання.

Для наочного уявлення реологічних процесів використовуються такі два типи найпростіших одновимірних деформованих елементів [11] (табл. 1.1):

1) пружний елемент (тіло Гука), у якому сила залежить тільки від деформації  $\delta$ ;


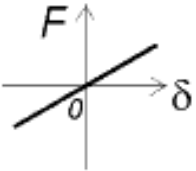

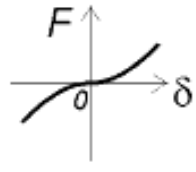
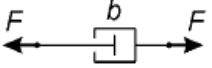
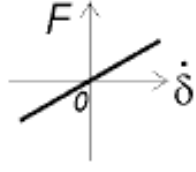
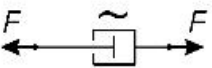
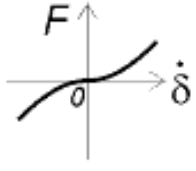
2) в'язкий елемент, демпфер (тіло Ньютона), у якому сила залежить безперервно від швидкості зміни деформації  $\delta$  і дорівнює нулю при  $\delta = 0$ ;



Ці елементи можливо з'єднувати в різних поєднаннях, що описують різні прояви пружно-в'язких властивостей ґрунту. При поєднанні цих властивостей пружний початок позначається насамперед на оборотності деформацій, в'язкий – на особливості їхнього протікання в часі.

Таблиця 1.1

### Типи одновимірних деформованих елементів

Модель елемента	Схематичне зображення елемента	Характеристика елемента	
Пружний лінійний		$F = c \cdot \delta$	
Пружний нелінійний		$F = F_u(\delta)$	
В'язкий лінійний		$F = b \cdot \dot{\delta}$	
В'язкий нелінійний		$F = F_D(\delta, \dot{\delta})$	

Для опису законів непружного опору ґрунтів і матеріалів, а також поглинання в них енергії при коливаннях, застосовуються різні гіпотези [6]. У динаміці основ і фундаментів з цією метою найбільш поширеними [6, 26, 60, 61] є модель Кельвіна-Фойгта, Модель Максвелла, модель узагальненого пружно-в'язкого тіла (рис. 1.4).

Модель Кельвіна-Фойгта представлена у вигляді двох паралельно з'єднаних елементів (пружного і в'язкого), напруження і деформації, у

простому випадку одноосного напруженого стану, що зв'язуються залежністю:

$$\sigma = Ee + \alpha \frac{de}{dt}, \quad (1.3)$$

де  $E$  – модуль пружності;

$\alpha$  – коефіцієнт непружного опору середовища;

$e$  – відносна деформація.

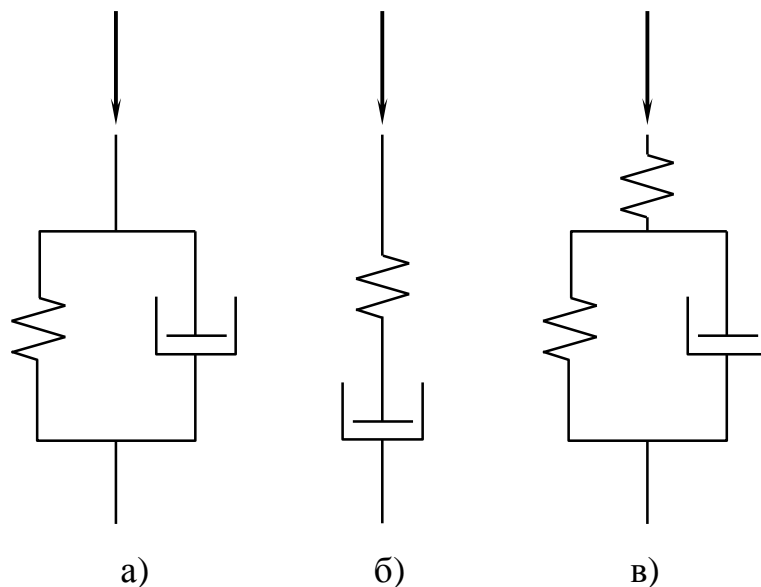


Рис. 1.4. Реологічні моделі:

а) Кельвіна-Фойгта, б) Максвелла; в) узагальненого пружно-в'язкого тіла.

При малих значеннях коефіцієнта в'язкості ( $\alpha \rightarrow 0$ ) вираз (1.3) описує властивості ідеально пружного середовища, що підкоряється закону Гука і подається одним пружним елементом. При малих значеннях модуля пружності ( $E \rightarrow 0$ ) співвідношення описує властивості ідеальної в'язкої рідини, модель якої представляється у вигляді одного в'язкого елемента.

Модель Максвелла схематично представляється на рисунку 1.4 (б) у вигляді двох послідовно з'єднаних елементів (пружного і в'язкого). У простому випадку одноосного напруженого стану зв'язок між напруженнями

і деформаціями для такого середовища виражається співвідношенням:

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{de}{dt} - \frac{\sigma}{t_p}, \quad (1.4)$$

де  $t_p$  – час релаксації;

$E$  – модуль пружності;

$a$  – коефіцієнт не пружного (в'язкого) опору середовища.

При постійному навантаженні  $\sigma = const$  із виразу можна знайти деформації у вигляді:

$$e(t) = e_0 + \frac{\sigma}{\alpha} t, \quad (1.5)$$

де  $e(t)$  та  $e_0$  – відповідно поточна і початкова деформації системи (при  $t = 0$ ).

Якщо час прикладення навантаження невеликий порівняно з часом релаксації  $t_p$ , то середовище поводить себе подібно пружному тілу, а якщо цей час великий порівняно зі значенням  $t_p$ , то середовище поводить як в'язке тіло. У разі середовища Максвелла логарифмічний декремент загасання визначається [6] співвідношенням:

$$D = \frac{\pi}{t_p \omega} = \frac{\pi E}{\alpha \omega}, \quad (1.6)$$

тобто змінюється обернено пропорційно частоті коливань  $\omega$  і в'язкості матеріалу  $\alpha$ .

Існують також інші, більш складні, моделі, що враховують властивості релаксації та пружного наслідку ґрунтів і матеріалів, наприклад узагальнена модель пружно-в'язкого тіла, яка представлена на рисунку 1.4 (в).

Модель узагальненого пружно-в'язкого тіла була розроблена з метою усунення недоліків попередніх моделей Максвелла і Кельвіна-Фойгта і

певним чином є їх поєднанням. Модель може бути представлена у вигляді паралельно з'єднаних пружного і в'язкого елементів, до яких послідовно приєднаний інший пружний елемент [40].

При миттєвому навантаженні елемента такого середовища його стиснення визначається пружністю пружини і дорівнює:

$$e_1 = \frac{\sigma}{E_1}. \quad (1.7)$$

Друга пружина, з'єднана паралельно з в'язким елементом, в момент динамічного навантаження жодних деформацій не відчуває. Якщо ж навантаження зберігає своє постійне значення, то граничне значення загальної деформації  $e$  елементом середовища при  $t \rightarrow \infty$  дорівнює сумі граничних деформацій пружного  $e_1$  і пружно-в'язкого  $e_2$  елементів:

$$e = e_1 + e_2 = \sigma \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right]. \quad (1.8)$$

Існують також інші складні моделі пружно-в'язких середовищ, що включають по чотири і більше найпростіших складових елементів. Однак ці моделі, зважаючи на їх складність, не отримали практичного застосування для вирішення задач щодо коливання систем.

На основі наведених вище моделей, які враховують демпфуючі властивості ґрунтів, існують методи визначення еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи – сукупності пружин і демпферів, що характеризують жорсткість і розсіювання енергії в ґрунті.

### **1.5.1 Методики розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи.**

Регламентований метод [24, 98] заснований на застосуванні напівемпіричних формул для визначення коефіцієнта  $C_z$  з використанням в якості вихідної характеристики деформаційних властивостей ґрунту,

нормативного модуля загальної деформації ґрунту за чинними нормами проектування природних основ.

$$C_z = bE \left( 1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}} \right), \quad (1.9)$$

де  $A$  – площа підшви фундаменту,  $\text{м}^2$ ;

$A_{10} = 10 \text{ м}^2$ ;

$E$  – модуль деформації ґрунту;

$b$  – коефіцієнт, що дорівнює 1,5 – для глин, 1,2 – для суглинків та супісків і 1,0 – для пісків.

Для фундаментів з площею підшви  $A$ , що перевищує  $200 \text{ м}^2$ , значення коефіцієнта  $C_z$  приймається як для фундаментів з площею підшви  $A = 200 \text{ м}^2$ .

Коефіцієнти  $C_\varphi$   $C_x$   $C_\psi$  приймаються рівними:

$$C_\varphi = 2C_z \quad C_x = 0,7C_z \quad C_\psi = C_z. \quad (1.10)$$

Коефіцієнти жорсткості приймаються рівними:

$$\begin{aligned} K_z &= C_z A & K_x &= C_x A \\ K_\varphi &= C_\varphi I_\varphi & K_\psi &= C_\psi I_\psi, \end{aligned} \quad (1.11)$$

де  $I_\varphi$  – момент інерції площі підшви фундаменту відносно головної осі, перпендикулярній площині руху;

$I_\psi$  – полярний момент інерції цієї площі.

Демпфуючі властивості ґрунтової основи враховуються коефіцієнтами  $\xi$ , що являють собою частку критичного затухання і визначаються за формулами:

- Для усталених (гармонійних) і випадкових коливань:

$$\xi_z = \frac{2}{\sqrt{p}} \quad (1.12)$$

- Для неусталених (імпульсних коливань):

$$\xi_z = 6 \sqrt{\frac{E}{C_z p}} \quad (1.13)$$

де  $p$  – середній статичний тиск під подошвою фундаменту.

Відносне демпфування для горизонтальних і обертальних коливань приймаються рівними:

$$\xi_x = 0,6 \xi_z \quad \xi_\varphi = 0,5 \xi_z \quad \xi_\psi = 0,3 \xi_z. \quad (1.14)$$

При розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи регламентованим методом треба мати на увазі, що вимоги норм не поширюються на проектування будівель підвищеної категорії відповідальності.

Розрахунок еквівалентних параметрів ґрунтової основи згідно з регламентованим методом має ряд недоліків. Границі розміру фундаменту обмежені, при розрахунку коефіцієнтів жорсткості та демпфування діє припущення, що для фундаментів з площею подошви, яка перевищує  $200 \text{ м}^2$ , значення коефіцієнтів приймається як для фундаментів з площею подошви  $200 \text{ м}^2$ , що може сильно вплинути на кінцевий результат розрахунку, тому як, наприклад, площа фундаменту реакторного відділення ВВЕР-1000 складає  $\approx 4350 \text{ м}^2$ . Також регламентована методика не враховує переважаючу частоту динамічного впливу.

При обстеженні та проектуванні будівель підвищеної категорії відповідальності професором Бірабраєром А. Н. була запропонована методика обчислення еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи, яка може використовуватись для будівель і споруд атомних електростанцій [8].

Дана методика представляється у вигляді шести еквівалентних пружин, які приєднуються до фундаментної плити. Вони відображають опір ґрунтової основи поступальним і кутовим переміщенням та відповідних шести демпферів. Їх параметри визначають шляхом вирішення задачі про коливання штампа на пружному однорідному півпросторі або на шаруватій основі, що підстиляється скельним ґрунтом.

Рішення виходить у вигляді комплексної функції частоти, дійсна частина якої – це еквівалентна жорсткість ґрунтової основи, а уявна – розсіювання в ньому енергії [8].

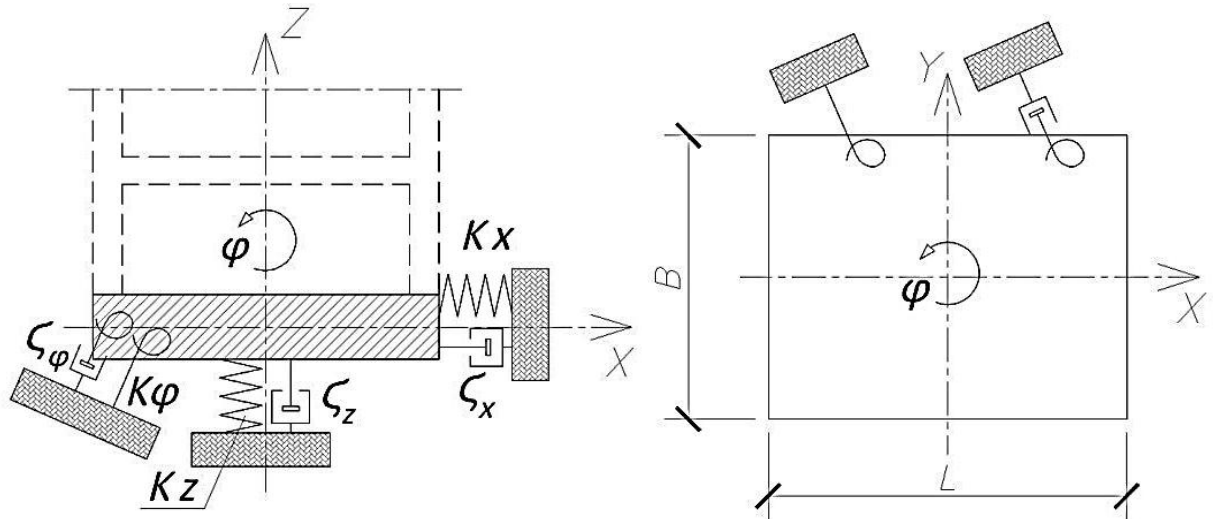


Рис. 1.5. Пружини та демпфери, що моделюють вплив ґрунтової основи

**Еквівалентні динамічні характеристики жорсткості і розсіювання енергії в ґрунтовій основі прямокутної в плані споруди**

Напрямок коливань	Прямокутний фундамент	
	Еквівалентні жорсткості	Еквівалентне демпфування
Горизонтальні	$K_x = 2(1 + \nu)G\beta_x\sqrt{BL}, \text{ Н/м}$	$b_x = 0.576K_xR\sqrt{\frac{\rho}{G}}, \text{ Нс/м}$ $\partial e R = \sqrt{BL/\pi}$
Вертикальні	$K_z = \frac{G}{1-\nu}\beta_z\sqrt{BL}, \text{ Н/м}$	$b_z = 0.85K_zR\sqrt{\frac{\rho}{G}}, \text{ Нс/м}$ $\partial e R = \sqrt{BL/\pi}$
Хитання у вертикальній площині	$K_\phi = \frac{G}{1-\nu}\beta_\phi BL^2, \text{ Нм}$	$b_\phi = \frac{0.3}{1+B_\phi}K_\phi R\sqrt{\frac{\rho}{G}}, \text{ Нс/м}$ $\partial e R = \sqrt[4]{BL^3/(3\pi)}$
Поворот в горизонтальній площині	$K_\psi = \frac{16}{3}GR^3, \text{ Нм}$ $\partial e R = \sqrt[4]{BL(B^2 + L^2)/(6\pi)}$	$b_\psi = \frac{0.3}{1+B_\psi}\sqrt{K_\psi I_\psi}, \text{ Нс/м},$

**Позначення:**  $B$  – ширина фундаменту в напрямку, перпендикулярному напрямку горизонтального сейсмічного впливу, м;  $L$  – довжина фундаменту в напрямку, паралельному горизонтальному сейсмічному впливу, м;  $I_{0m}$  – момент інерції споруди відносно горизонтальної осі хитання, що проходить через центр основи,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $I_{\psi m}$  – полярний момент інерції споруди щодо вертикальної осі симетрії,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $\beta_x$ ,  $\beta_z$ ,  $\beta_\phi$  – коефіцієнти, що залежать від співвідношення  $B/L$  (рис. 1.6).

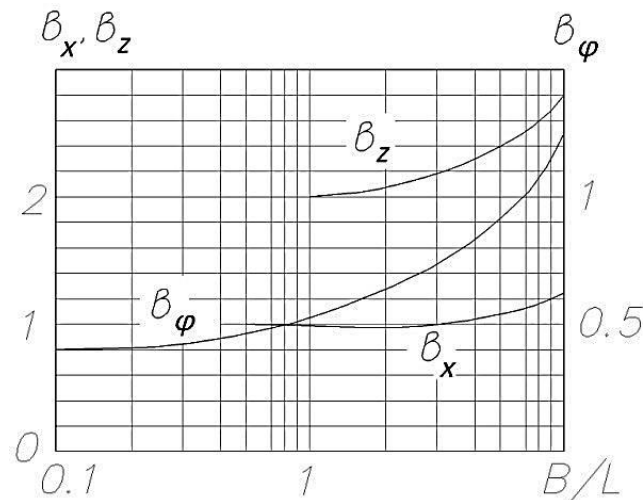


Рис. 1.6. Графічний супровід таблиці 1.2



**Еквівалентні динамічні характеристики жорсткості і розсіювання енергії в ґрунтовій основі круглої в плані споруди**

Напрямок коливань	Круглий фундамент	
	Еквівалентні жорсткості	Еквівалентне демпфування
Горизонтальні	$K_x = \frac{32(1-\nu)GR}{7-8\nu}, H/M$	$b_x = 0.576K_x R \sqrt{\frac{\rho}{G}}, Hc/M$
Вертикальні	$K_z = \frac{4GR}{1-\nu}, H/M$	$b_z = 0.85K_z R \sqrt{\frac{\rho}{G}}, Hc/M$
Хитання у вертикальній площині	$K_\phi = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)}, Hm$	$b_\phi = \frac{0.3}{1+B_\phi} K_\phi R \sqrt{\frac{\rho}{G}}, Hc/M$
Поворот в горизонтальній площині	$K_\psi = \frac{16}{3} GR^3, Hm$	$b_\psi = \frac{0.3}{1+B_\psi} \sqrt{K_\psi I_\psi}, Hc/M,$

**Позначення:**  $R$  – радіус фундаменту,  $I_{0m}$  – момент інерції споруди відносно горизонтальної осі хитання, що проходить через центр основи,  $кг \cdot м^2$ ,  $I_{\psi m}$  – полярний момент інерції споруди щодо вертикальної осі симетрії,  $кг \cdot м^2$ .

$$B_\phi = \frac{3(1-\nu)I_{0m}}{8\rho R^5}, \quad B_\psi = \frac{I_{\psi m}}{\rho R^5}. \quad (1.15)$$

Головною перевагою розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи за методикою проф. Бірбраєра А. Н. є простота обчислення, однак вона має і ряд недоліків. Рішення представлено лише для фундаментів круглих та прямокутних форм в плані. Методика розрахунку не враховує переважаючу частоту впливу, що вкрай важливо для розрахунків поповерхових спектрів реакції будівель і споруд підвищеної категорії відповідальності. Згідно з вищевикладеним методика проф. Бірбраєра А. Н. може використовуватись для врахування ґрунтової основи для будівель і споруд АЕС в якості наближеного методу розрахунку.

Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) при аналізі взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" з представленням будівлі в якості динамічної стрижневої моделі рекомендується застосовувати методика розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи проф. Дж. Газетаса [112]. Дана

методика являє собою шість "пружин", які задають жорсткості при поступальних і обертальних переміщеннях фундаменту по трьом осям (рис. 1.7), і шість відповідних "демпферів". Їх знаходять, вирішуючи завдання про коливання штампа на пружній однорідній або шаруватій основі, напівнескінченної, або яка підстиляється скелею. Для визначення еквівалентних динамічних характеристик ґрунтової основи за методикою проф. Дж. Газетаса підхід представлений у вигляді аналітичних формул і безрозмірних графіків (Додаток А). Розрахунок узагальнених характеристик ґрунтової основи проводиться з урахуванням частоти впливу, геометричних розмірів фундаменту і фізико-динамічних характеристик масиву ґрунту [121].

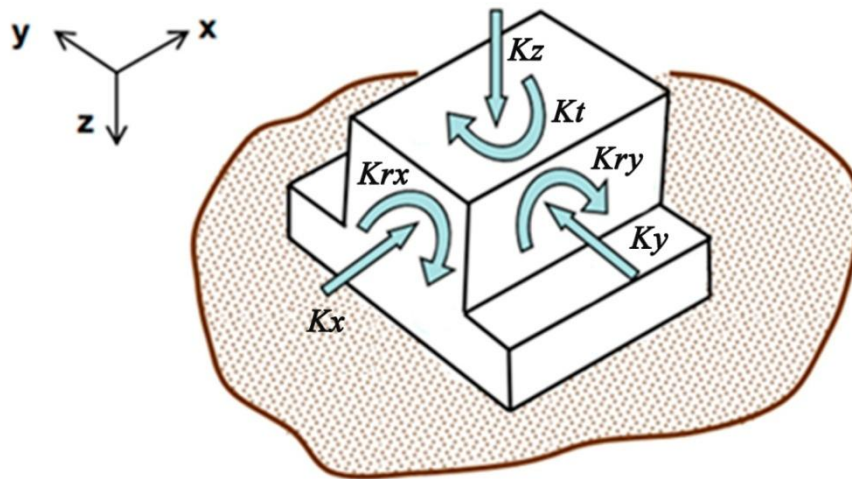


Рис. 1.7. Поступальні і обертальні переміщення фундаменту по трьох вісях

Перевагою розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи за методикою проф. Дж. Газетаса є насамперед те, що обчислення проводяться з урахуванням переважаючої частоти впливу, та розрахунок охоплює широкий спектр геометрії фундаменту.

### **1.5.2 Прямий метод взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".**

Відповідно до даного методу, коливання споруди і ґрунтової основи розглядаються разом в один крок. Для цього складається розрахункова модель, до якої входить сама споруда і деяка область ґрунтової основи. При цьому необхідно враховувати принципову відмінність у вимогах до моделі ґрунтової основи при статичних і сейсмічних розрахунках [8, 18].

У першому випадку достатньо обрати такий розмір ґрунтової області, щоб крайові ефекти на її зовнішніх границях не позначалися на напруженнях під спорудою [55].

При сейсмічних розрахунках необхідно задати таку обмежену область ґрунтової основи, щоб хвилі, які відбиваються від фундаменту, не відбивалися від меж області та, повертаючись до споруди, не спотворювали його коливання ("ефект коробки"), оскільки при реальному землетрусі ці хвилі безперешкодно йдуть у напівнескінченну основу. Щоб цього не відбувалося, слід видалити границі ґрунтової області настільки, щоб хвилі за час землетрусу не встигли дійти назад. На практиці дані границі віддаляють приблизно на 3...4 максимальні розміри фундаменту. Однак існує інший варіант представлення граничних умов, при якому на краях ґрунтової області вводять спеціальні граничні умови, що імітують безперешкодне проходження сейсмічних хвиль.

Нижня межа може бути прийнята по поверхні підстилаючої скелі або шару ґрунту, модуль пружності якого не менш ніж у 10 разів перевищує модуль ґрунту безпосередньо під фундаментом. Якщо таких шарів на досить малій глибині немає, то глибина цієї границі дорівнює приблизно потроєному максимальному розміру фундаментної плити. Дана межа може вважатися абсолютно жорсткою [8].

Бічні межі ґрунтової області повинні розташовуватись так, щоб їх вплив на коливання споруди був несуттєвим. Залежно від виду граничних умов розрізняють прості та поглинаючі границі.

Прості границі можуть бути закріпленими, вільними або їх комбінацією. Якщо використовується закріплена межа, то вид закріплення встановлюється залежно від типу розглянутих хвиль: при вертикальному поширенні зсувної хвилі – шарнірне закріплення, що обмежує переміщення по вертикалі; для поздовжньої хвилі – таке ж закріплення від переміщень по горизонталі. На такій границі розраховують кінематичні параметри (переміщення або прискорення), які мали б місце у відповідних точках вільного поля, і задають їх на границі [113].

Поглинаючі границі гасять падаючі на них сейсмічні хвилі [128]. Вони являють собою в'язкі "демпфери", встановлені по нормалі і по дотичній до кордону, і реагують на обурення, викликані наявністю споруди та динамічного впливу або на рух системи "основа – фундамент – споруда" стосовно вільного поля.

Уперше поглинаючі (в'язкі) границі були запропоновані Дж. Лисмером (Lysmer) та Л. Кухельмаером (Kuhlemeyer) [128]. Так звані в'язкі границі складаються з в'язких демпферів, які застосовуються для всіх ступенів свободи граничних умов ґрунтової основи, для того, щоб загасити хвилі, які розповсюджуються в системі "основа – фундамент – споруда". Згідно з Дж. Лисмером (Lysmer) та Л. Кухельмаером (Kuhlemeyer) аналітичне представлення граничних умов відображається у вигляді:

$$\sigma = \alpha p V_p \dot{w}, \quad (1.16)$$

$$\tau = b p V_s \dot{u}, \quad (1.17)$$

де  $\sigma$ ,  $\tau$  – нормальні та дотичні напруги, відповідно;

$\dot{w}$  та  $\dot{u}$  – нормальна та дотична швидкість, відповідно;

$p$  – щільність;

$V_s$  та  $V_p$  – швидкість S-хвилі та P-хвилі, відповідно;

$a$  та  $b$  – безрозмірні параметри.

Запропоновані граничні умови відповідають ситуації, коли границі моделювання підтримуються нескінченно-малими демпферами, які орієнтовані по нормалі і по дотичній поверхні до границь поверхні [128].

У кінцевому виді тривимірний скінченно-елементний модель динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" являє собою ґрунт разом з фундаментом і елементами будівлі, поглинаючими границями у вузлах СЕ-сітки або відділеними межами ґрунтової основи для моделювання згасання сейсмічних хвиль і плоскими елементами на гранях фундаменту (рис. 1.8).

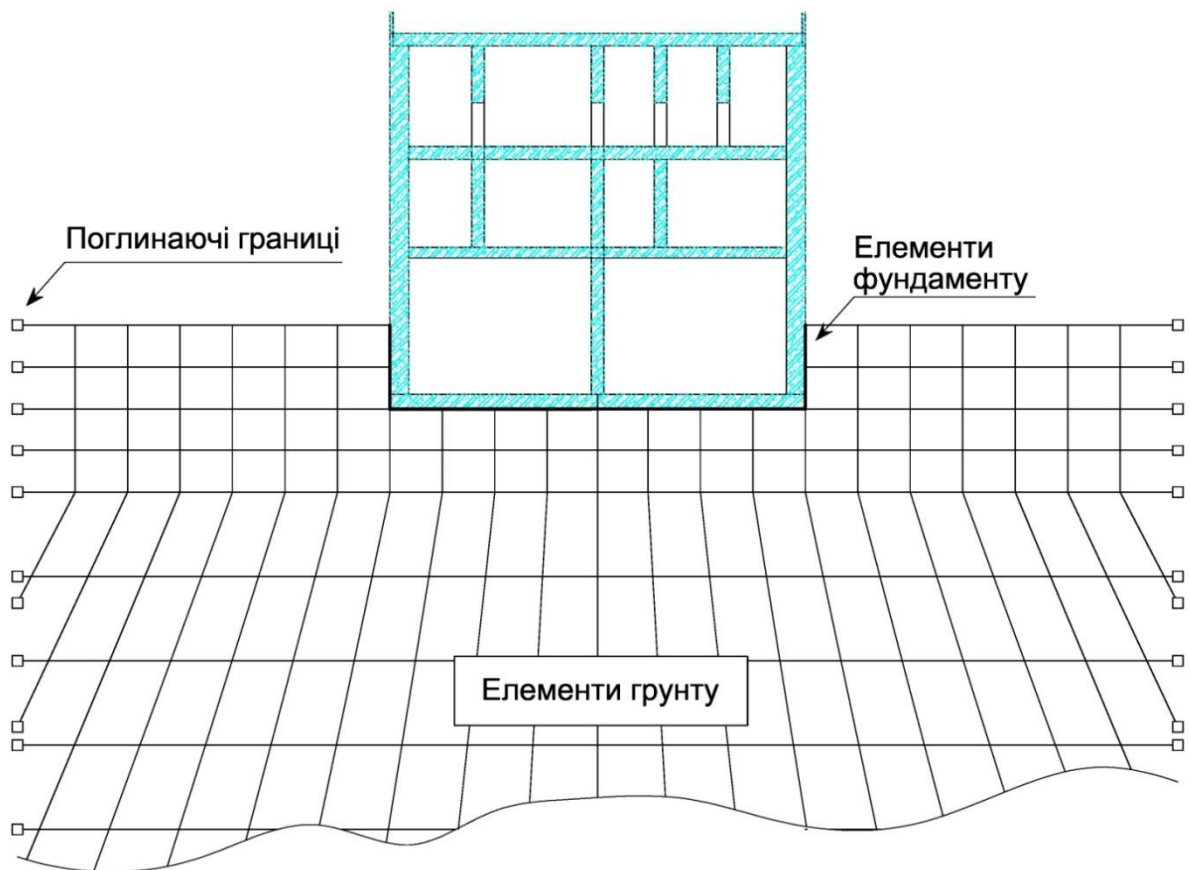


Рис. 1.8. Схематичне зображення прямого аналізу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда"

Для прямого методу дуже важливим є розрахунок реакції площадки за допомогою аналізу поширення хвилі через ґрунт. Дані розрахунки частіше

здійснюються з використанням еквівалентного лінійного представлення властивостей ґрунту в скінченному елементі, кінцевій різниці чи граничних елементів [128]. Прямі методи можуть відображати всі ефекти взаємодії ґрунтової основи і споруди, але моделювання кінематичної взаємодії є складним завданням, тому що це вимагає уточнення просторово змінних рухів вхідного впливу в трьох вимірах.

Використання прямого динамічного методу являє собою важке завдання з обчислювальної точки зору, особливо коли система геометрично складна або моделюється з урахуванням нелінійностей у ґрунті та конструкційних матеріалів.

### **1.6 Застосовність методів аналізу динамічної взаємодії жорстких масивних споруд з ґрунтовою основою в умовах інженерної практики**

Для поглибленого дослідження системи зі складною поведінкою, до яких належить динамічна взаємодія системи "основа – фундамент – споруда" при аналізі будівель і споруд АЕС, необхідно використовувати метод скінчених елементів, оскільки цей метод є універсальним та одним із найбільш ефективних чисельних методів розв'язання математичних задач, що описують стан фізичних систем складної структури. Метод скінчених елементів дозволяє аналізувати інженерні структури зі складною геометрією, а також дає можливість досліджувати тривимірні завдання.

У більшості пакетів програмного забезпечення, які найчастіше використовують фахівці при розрахунках будівель і споруд, відсутня можливість належного врахування взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" в динамічній постановці. У більшості випадків у розрахункових комплексах, які поширені серед інженерів-проектувальників, існує можливість коректно змоделювати роботу ґрунтової основи лише при статичних навантаженнях.

Достатньо коректно динамічна реакція будівлі на сейсмічний вплив може бути розрахована при використанні прямого динамічного методу. Однак моделювання масштабної складної конструктивної схеми будівлі (наприклад, реакторне відділення) разом з ґрунтовою основою методом скінчених елементів та розрахунок побудованої моделі прямим динамічним аналізом є складною комплексною задачею. До того ж безпосереднє використання такої моделі збільшує трудомісткість підготовки моделі і час розрахунків. Виходячи з зазначеного вище, класична постановка динамічної задачі взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" з використанням методу скінчених елементів потребує великих обчислювальних потужностей і вирішення ряду специфічних задач.

Згідно з нормативною документацією [123, 134] при розрахунку кінематичних параметрів й оцінці сейсмостійкості будівель і споруд необхідно враховувати взаємодію конструкцій із ґрунтовою основою, однак виконання цих вимог ускладнене тим, що в нормативних документах недостатньо відомостей для раціонального вибору процедури взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі. Дана ситуація призводить до того, що взаємодія системи "основа – фундамент – споруда" в динамічній постановці рідко розглядається на практиці, а якщо все ж застосовується, то способи моделювання взаємодії ґрунтової основи зі спорудою сильно розрізняються і не завжди відповідають дійсності.

В обставинах, що склалися, необхідно запропонувати метод взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" та розробити його алгоритм для застосування фахівцями в динамічному аналізі будівель і споруд атомних електростанцій з метою обчислення поповерхових спектрів реакції досліджуваних споруд.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1) Виявлено, що при аналізі динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" застосовуються різні моделі ґрунтової основи: від спрощених (система "маса – пружина – демпфер") до складних, таких як тривимірні скінченно-елементні моделі.

2) Встановлено, що підхід моделювання ґрунту еквівалентними параметрами ґрунтової основи простий у застосуванні та широко використовується інженерами на практиці. Моделювання ґрунту об'ємними елементами являє собою складну задачу з обчислювальної точки зору та вимагає вирішення ряду специфічних задач.

3) Виявлено, що згідно з нормативними документами при розрахунку кінематичних параметрів будівель і споруд АЕС (переміщення, швидкості, прискорення) необхідно враховувати взаємодію елементів системи "основа – фундамент – споруда", при цьому слід проводити опис методів розрахунку та обґрунтовувати застосування цих методів.

4) Виявлено, що для більшості будівельних споруд ефекти взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" є сприятливими, оскільки вони зменшують згинальні моменти і зсувні зусилля в різних елементах надземної частини конструкції, проте для конструкцій із масивними фундаментами, до яких належать будівлі і споруди АЕС, ефекти взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" можуть бути руйнівними.

5) Виявлено, що при обчисленні кінематичних параметрів будівлі, необхідно проводити розрахунки з використанням прямого динамічного аналізу.

6) Встановлено, що в нормативних документах недостатньо відомостей для раціонального вибору методу розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі для обчислення поповерхових спектрів реакції досліджуваної будівлі.



**РОЗДІЛ 2**  
**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ**  
**ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ**  
**"ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – СПОРУДА"**

Згідно з нормативними документами для будівель та споруд АЕС необхідно виконувати роботи з обстеження, оцінки технічного стану та перепризначення ресурсу будівельних конструкцій споруд, які містять системи, важливі для безпеки енергоблоків АЕС, що потребує вирішення ряду специфічних задач. Однією з таких задач є розрахунок поповерхових спектрів реакції, які є вихідними даними для подальшої кваліфікації обладнання.

Особливістю обчислення поповерхових спектрів реакції будівель і споруд АЕС є те, що їх потрібно розраховувати у конкретних точках перекриттів, на яких розташовані системи, важливі для безпеки АЕС.

Для отримання кінематичних параметрів будівель і споруд АЕС (поповерхові спектри реакції) з урахуванням взаємодії ґрунтової основи зі спорудою в більшості випадків використовуються два способи розрахунку.

Перший – розрахунок споруди, яка представляється у вигляді стрижнів із зосередженими у вузлах масами (динамічна модель будівлі). В цьому випадку моделювання ґрунтової основи відбувається за допомогою коефіцієнтів жорсткості і коефіцієнтів розсіювання енергії в ґрунтовій основі.

Розрахунок поповерхових спектрів реакції з використанням даного методу має ряд недоліків. По-перше, при зосередженні мас на вертикальних елементах враховується піддатливість лише колон та стін, яка зазвичай дуже мала. Тому розрахункова схема дозволяє обчислити сейсмічні коливання тільки в точках вертикальних елементів, а у горизонтальних прольотах вони дають прийнятні результати лише за умови, що жорсткості цих елементів достатньо великі та будівля розташовується на піддатливій основі. Отримані

при такій постановці задачі результати на горизонтальних елементах у вигляді поповерхових спектрів реакції будуть відповідати не конкретній точці розташування обладнання, а всьому поверху або відповідному прольоту, що дає істотну погрішність для подальшої кваліфікації обладнання. По-друге, для обчислення динамічної реакції в прольотах необхідно, щоб на них були зосередженні відповідні маси, і необхідно врахувати поперечну піддатливість горизонтальних елементів [8]. Однак навіть при виконанні цих умов використання динамічної моделі споруди, яка розташовується на піддатливій основі, не дає можливості достатньо коректно розрахувати поповерхові спектри реакції у конкретних точках розташування обладнання, що має великий вплив на подальшу кваліфікацію устаткування, що досліджується.

Другий – розрахунок споруди та ґрунтової основи з використанням метода скінченних елементів. У даному випадку ґрунтова основа представляється у вигляді об'ємного ґрунтового масиву.

Більш коректно в порівнянні з моделюванням споруди стрижнями з зосередженими у вузлах масами, динамічна реакція будівлі на сейсмічний вплив може бути розрахована при використанні тривимірної СЕ моделі. Однак моделювання складної конструктивної схеми будівлі разом з об'ємним ґрунтовим масивом методом скінченних елементів та розрахунок побудованої моделі прямим динамічним методом являє собою складну задачу, до того ж використання такої моделі значно збільшує трудомісткість розрахунків.

Згідно з вище наведеного динамічна модель споруди не дозволяє достатньо коректно розрахувати поповерхові спектри реакції на горизонтальних елементах, а використання тривимірної СЕ-моделі разом з об'ємним ґрунтовим масивом значно збільшує трудомісткість розрахунків. Тому в науково-дослідній роботі запропоновано удосконалений метод динамічного аналізу системи "основа –

фундамент – споруда" для отримання динамічної реакції жорстких масивних будівель.

Удосконалений метод комбінує обидва вищевикладені способи розрахунку, що дозволяє обчислити поповерхові спектри реакції будівель із плитним фундаментом у конкретних точках розташування обладнання та значно скоротити трудомісткість і час розрахунків.

У вдосконаленому методі динамічна модель використовується для врахування поведінки досліджуваної споруди при динамічному впливі, а також для отримання відкоригованих записів розрахункових впливів на рівні підшви фундаменту конструкції з урахуванням ефектів взаємодії ґрунтової основи та споруди. Для врахування взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" ґрунт представляється у вигляді еквівалентних динамічних коефіцієнтів, які моделюють жорсткість і розсіювання енергії в ґрунтовій основі. В якості вихідних даних використовується сейсмічний вплив на рівні вільної поверхні ґрунту промислового майданчику розташування досліджуваної будівлі [129]. Результатом розрахунку динамічної моделі досліджуваної будівлі є запис сейсмічного впливу на рівні підшви фундаменту конструкції з урахуванням ефектів взаємодії ґрунтової основи і споруди.

Для подальших розрахунків поповерхових спектрів реакції у конкретних точках розташування обладнання використовується деталізована скінченно-елементна модель досліджуваної споруди. Вихідними даними для неї слугує сейсмічне навантаження на рівні підшви фундаменту конструкції, яке було отримане на етапі розрахунку динамічної моделі досліджуваної будівлі з урахуванням ефектів взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".

Із зазначеного вище випливає, що вдосконалений метод включає в себе використання СЕ моделі будівлі, динамічної моделі будівлі, а також еквівалентні динамічні параметри ґрунтової основи.

Процедура розрахунку за удосконаленим методом розділена на наступні етапи:

- 1) побудова СЕ моделі досліджуваної будівлі;
- 2) розробка еквівалентної динамічної моделі досліджуваної будівлі;
- 3) розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи для врахування взаємодій в системі "основа – фундамент – споруда";
- 4) розрахунок динамічної моделі будівлі з накладеними динамічними параметрами ґрунтової основи для отримання відкорегованих записів впливів на рівні підшви фундаменту конструкції;
- 5) розрахунок скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі на сейсмічну дію, отриману на підставі попереднього етапу.

Алгоритм удосконаленого методу аналізу динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" представлена на рисунку 2.1.

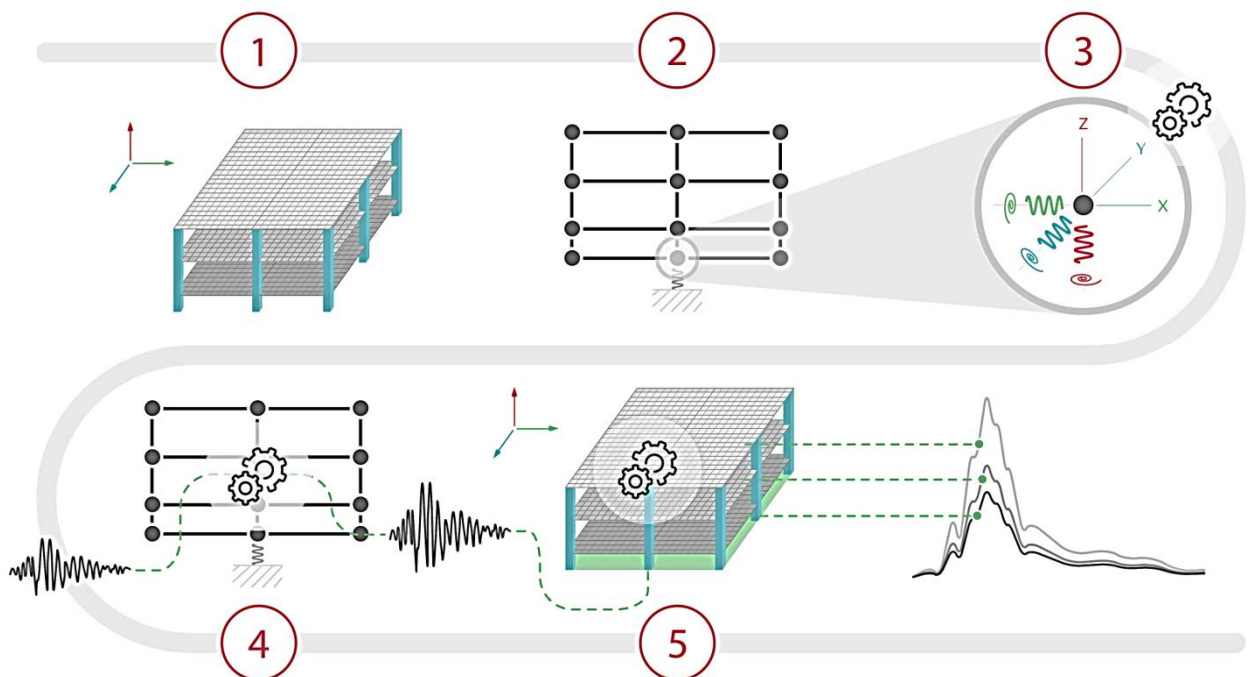


Рис. 2.1. Алгоритм методу аналізу динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда"

Удосконалений метод адаптований для обчислення поповерхових спектрів реакції будівель і споруд АЕС із плитним фундаментом у конкретних точках розташування обладнання, що має суттєве значення для подальшої кваліфікації систем, важливих для безпеки енергоблоків АЕС. Також використання удосконаленого методу значно знижує трудомісткість та час розрахунків порівняно з моделюванням ґрунтової основи у вигляді об'ємного масиву ґрунту.

## **2.1 Побудова розрахункової скінченно-елементної та динамічної моделі споруди**

Під розрахунковою схемою споруди розуміється її математична модель, яка використовується для виконання розрахунку.

Розрахункова схема повинна з достатньою точністю визначати динамічну реакцію споруди в усьому сейсмічному діапазоні частот і бути якомога простіше, оскільки занадто складна схема може виявитися неприйнятною з точки зору ресурсів комп'ютерної техніки або призводити до значного збільшення обсягу обчислень [7].

В основі розрахунку застосовується метод скінченних елементів (МСЕ) із використанням в якості основних невідомих переміщень і поворотів вузлів розрахункової схеми. У зв'язку з цим ідеалізація тривимірної СЕ-моделі досліджуваної будівлі виконується у формі, пристосованій до використання цього методу.

Розробка та валідація динамічної моделі споруди здійснюється з метою отримання розрахункових впливів на фундаменті будівлі, яка досліджується. Динамічна модель слугує для врахування динамічної взаємодії в системі "основа – фундамент – споруда" і отримання результуючих записів розрахункових впливів з урахуванням даних взаємодій.

Іноді реальне застосування може знайти найпростіша динамічна модель у вигляді лінійного осцилятора. Для будівель та споруд висотою  $H$ , яка перевищує у два і більше разів її ширину  $B_i$  довжину  $L$ , допускається приймати розрахункову схему (рис. 2.2а) у вигляді багатомасового пружно-деформованого стрижня, який несе зосереджені маси вагою  $Q_k$ , що розташовані на рівні перекриттів, і здійснює коливальний рух за одним із напрямків ( $x$  або  $y$ ) [24].

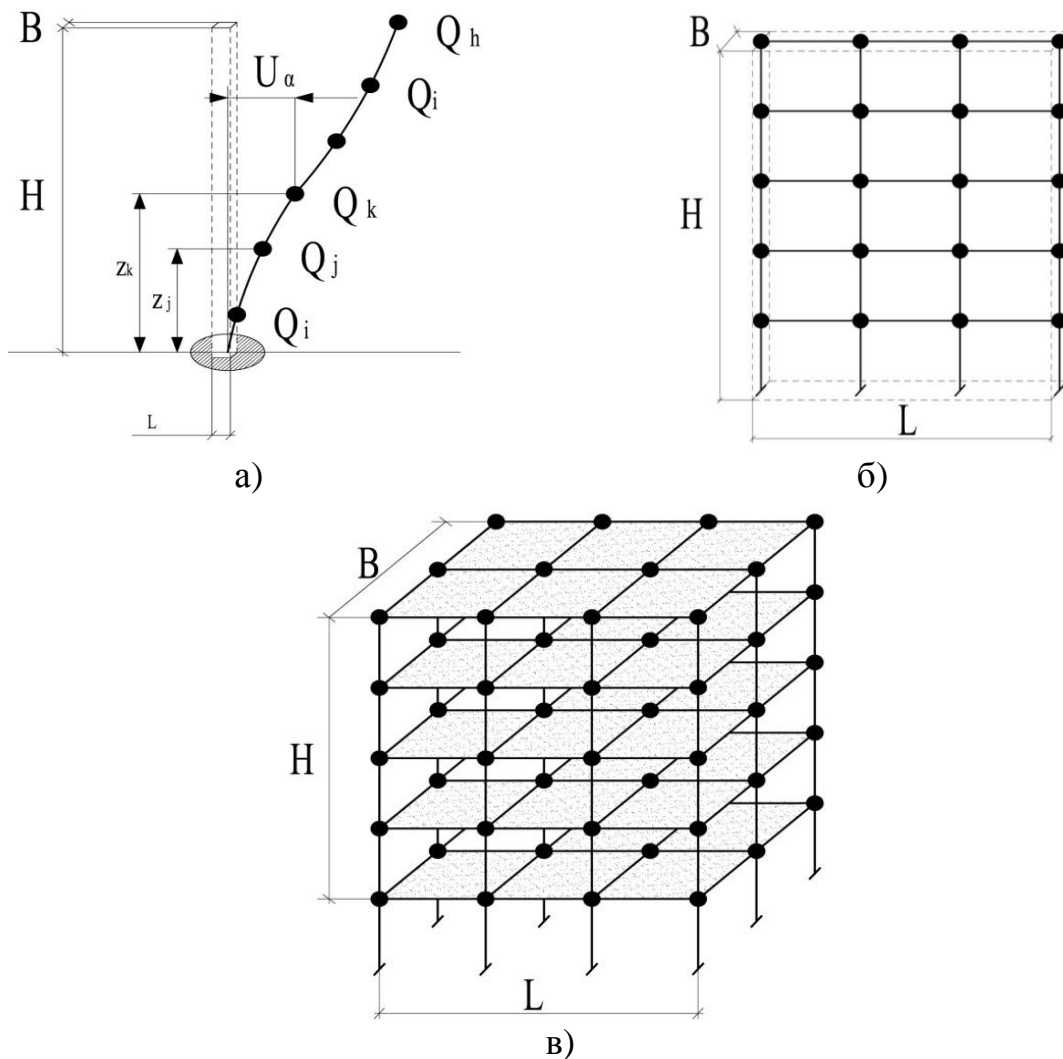


Рис. 2.2. Динамічні розрахункові схеми будівель і споруд:

а) багатомасовий пружно-деформований стрижень; б) перехресна система із зосередженими у вузлах масами; в) просторова розрахункова динамічна модель із зосередженими у вузлах масами.

Для більш детального розрахунку порівняно з розрахунковою схемою у вигляді багатомасового пружно-деформованого стрижня допускається приймати розрахункову схему у вигляді багатомасової пружно-деформованої перехресної системи (рис. 2.2б), із зосередженими у вузлах масами, що розташовані на рівні перекриттів. Як правило, рекомендується використовувати просторові розрахункові динамічні моделі із зосередженими у вузлах масами (рис. 2.2, в).

У якості зосереджених мас  $m_i$ , прикладених на рівні перекриттів, приймаються: маса самих перекриттів, маса обладнання, маса частини будівлі між горизонтальними перерізами посередині між найближчими масами зверху і знизу та вертикальні статичні навантаження (сніг, технологічні і т.п.) (рис. 2.3).

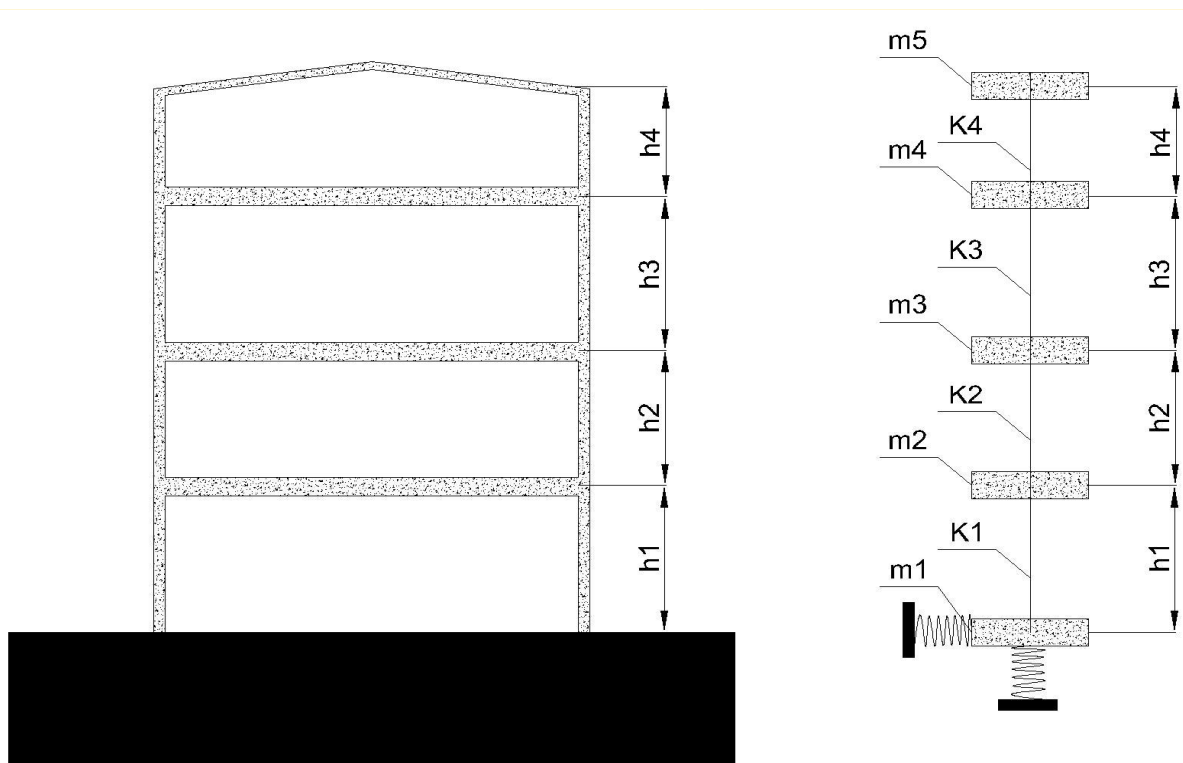


Рис. 2.3. Приведення рамної схеми до стрижневої:

$m_1, m_4$  – маси конструктивних елементів з  $1/2 H_{нов}$ ;

$m_2, m_3$  – маси елементів з  $H_{нов}$ ;  $k_1-k_4$  – жорсткості стрижнів.

Валідаційні аналізи проводяться для демонстрації здатності динамічної моделі з зосередженими у вузлах масами адекватно представляти загальні динамічні властивості конструкції. Валідація пружно-деформованої перехресної системи із зосередженими у вузлах масами складається з двох різних аналізів: із статичного аналізу, який визначає загальну масу конструкції, та модального аналізу, який визначає власні коливання конструкції з урахуванням приєднаних фіктивних мас від тривалих навантажень.

Отримані дані в подальшому порівнюються з результатами тривимірної SE-моделі будівлі, що була побудована на попередніх етапах.

## **2.2 Розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи**

При визначенні розрахункових динамічних параметрів ґрунтової основи необхідно враховувати такі важливі властивості ґрунтів, як інерційність та демпфуючі властивості, що здійснюють важливий вплив на коливання фундаментів при сейсмічному впливі.

Сутність розроблених методів моделювання ґрунтового середовища в динамічній постановці полягає в їх уявленні у вигляді еквівалентних динамічних коефіцієнтів, які моделюють жорсткість і розсіювання енергії в ґрунтовій основі. Обчислення цих коефіцієнтів описується в чисельному вигляді.

В даній роботі в якості основних методів врахування ґрунтової основи в системі "основа – фундамент – споруда" вибрані дві методики.

- 1) Методика Дж. Газетаса (Gazetas) [121], так як його роботи рекомендуються МАГАТЕ при розрахунку будівель і споруд на сейсмічний вплив у системі "основа – фундамент – споруда".



2) Методика А. Н. Бірбраєра [7] яка була запропонована для використання при розрахунку будівель і споруд АЕС на сейсмічну дію в системі "основа – фундамент – споруда".

Для обчислення еквівалентних параметрів ґрунтової основи методиками Дж. Газетаса (Gazetas) й А. Н. Бірбраєра в даній науково-дослідній роботі була описана покрокова процедура розрахунку динамічних параметрів ґрунтового середовища (коефіцієнтів пружин і демпферів) для вибраних методик врахування ґрунтової основи в системі "основа – фундамент – споруда".

Для визначення характеристик ґрунтової основи за методикою Дж. Газетаса інформація представлена у вигляді "простих" алгебраїчних формул і безрозмірних графіків, що належать до всіх (поступальних і обертальних) переміщень і охоплюють широкий спектр геометрії фундаменту. Розрахунок узагальнених характеристик ґрунтової основи проводиться з урахуванням частотної характеристики динамічного впливу та особливостей масиву ґрунту (глибина закладення фундаменту і фізико-динамічні властивості ґрунту під подошвою фундаменту). У якості вихідних даних використовується дані про фундамент, переважаюча частота діючого впливу та усереднені характеристики стисливої товщі ґрунту під подошвою фундаменту, такі як значення швидкості поперечної хвилі, фізико-механічні характеристики ґрунтової основи, коефіцієнт Пуассона [121, 129]. Нижче наведений алгоритм розрахунку коефіцієнтів жорсткості й демпфування за методикою Дж. Газетаса.

1) Розрахунок статичних коефіцієнтів жорсткості для кожного виду коливань (при поступальних і обертальних переміщеннях фундаменту за трьома осями) для незаглиблених фундаментів:

- визначити моменти інерції фундаменту щодо осей  $x$  і  $y$ ;
- обчислити допоміжний коефіцієнт  $\chi$  за формулою, наведеною в таблиці А.1, додаток А;

– визначити статичні коефіцієнти жорсткості основи для фундаментів неглибокого закладення  $K_{i, surf}$ , таблиця А.1, додаток А.

2) Розрахунок модифікаторів динамічної жорсткості й динамічних демпферних модифікаторів для незаглиблених фундаментів:

– розрахувати співвідношення довжини до ширини фундаменту  $L/B$ ;

– обчислити кругову частоту прикладеної сили,  $\omega$ ;

– визначити безрозмірну частоту  $a_0$  за формулою, представленою на рисунку А.1, додаток А;

– обчислити коефіцієнти динамічної жорсткості  $k_i$  згідно з графіками (рис. А.1) або за формулами, наведеними в таблиці А.1, використовуючи співвідношення довжини до ширини фундаменту  $L/B$ , безрозмірну частоту  $a_0$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ ;

– визначити динамічні демпферні коефіцієнти  $c_i$  згідно з графіками (рис. А.1), використовуючи співвідношення довжини до ширини фундаменту  $L/B$ , безрозмірну частоту  $a_0$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ .

3) Розрахунок динамічних коефіцієнтів жорсткості і коефіцієнтів демпфування для незаглиблених фундаментів:

– обчислити швидкість хвилі "Аналог Лісмера" [145]  $V_{LA}$ , що являє собою швидкість поширення хвилі "розтягання-стискання" під фундаментом і залежить від  $V_s$  (швидкості поперечної хвилі);

– динамічні коефіцієнти жорсткості визначаються шляхом множення статичного коефіцієнта жорсткості  $K_{i, surf}$  на коефіцієнт динамічної жорсткості  $k_i$ ;

– коефіцієнти демпфування  $C_i$  визначаються за формулами, наведеними в таблиці А.1, додаток А.

Детальна блок-схема розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи за методикою Дж. Газетаса представлена на рисунку 2.4. Вона складається з двох основних блоків розрахунків. Перший

блок присвячений обчисленню коефіцієнтів жорсткості і демпфування для незаглиблених фундаментів, другий для заглиблених фундаментів.

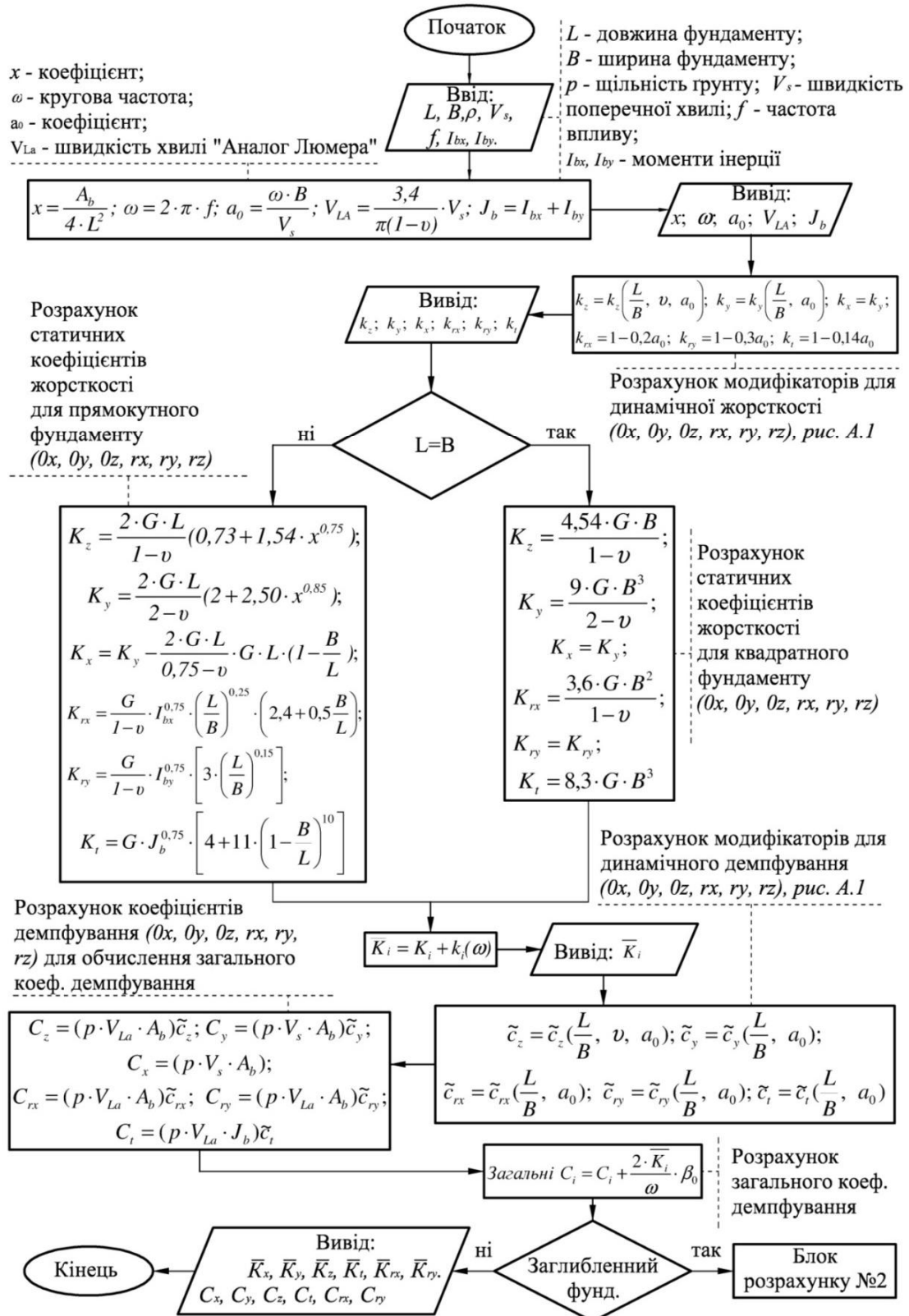


Рис. 2.4. Блок-схема розрахунку коефіцієнтів жорсткості і демпфування ґрунтової основи за методикою Газетаса

Блок розрахунку № 2 присвячений обчисленню еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи для заглибленої споруди і представлений на рисунку 2.5.

Для заглибленого фундаменту необхідно провести додаткові обчислення та визначити динамічні коефіцієнти жорсткості і коефіцієнти демпфування за наступним алгоритмом.

1) Розрахунок статичних коефіцієнтів жорсткості для кожного виду коливань (при поступальних й обертальних переміщеннях фундаменту за трьома осями) для заглиблених фундаментів:

- визначити глибину закладення фундаменту,  $D$ ;
- визначити висоту контакту ґрунтової основи з фундаментом  $d$ .

Висота контакту залежить від поверхні фундаменту та характеристик ґрунту, який знаходиться навколо нього. Згідно з рекомендаціями проф. Дж. Газетаса для визначення висоти контакту ґрунтової основи з фундаментом необхідно використовувати результати проведених великомасштабних та маломасштабних експериментів, які представлені в роботах Дж. Милонакіса (Mylonakis), Дж. Газетаса [122, 129];

- визначити вертикальну площу контакту фундаменту з ґрунтовою основою,  $A_w$ ;

- обчислити коефіцієнти динамічної жорсткості  $k_i$  заглибленого фундаменту згідно з графіками (рис. А.2, додаток А);

- на основі статичних коефіцієнтів жорсткості ґрунтової основи для фундаментів неглибокого закладення  $K_{i, surf}$  (табл. А.1), розрахувати статичний коефіцієнт жорсткості ґрунтової основи для заглиблених фундаментів  $K_{i, emb}$  (табл. А.2, додаток А);

- динамічні коефіцієнти жорсткості визначити шляхом множення статичного коефіцієнта жорсткості  $K_{i, emb}$  на коефіцієнт динамічної жорсткості  $k_i$ ;

- визначити модифікатор заглибленого фундаменту  $\eta_j$  (табл. А.2, додаток А);

– визначити коефіцієнти демпфування заглибленого фундаменту за формулами, які наведені в таблиці А.2, додаток А.

Для визначення еквівалентних параметрів ґрунтової основи при динамічному впливі за методикою проф. Бірбраєра, інформація представлена у вигляді простих алгебраїчних формул і безрозмірних графіків.

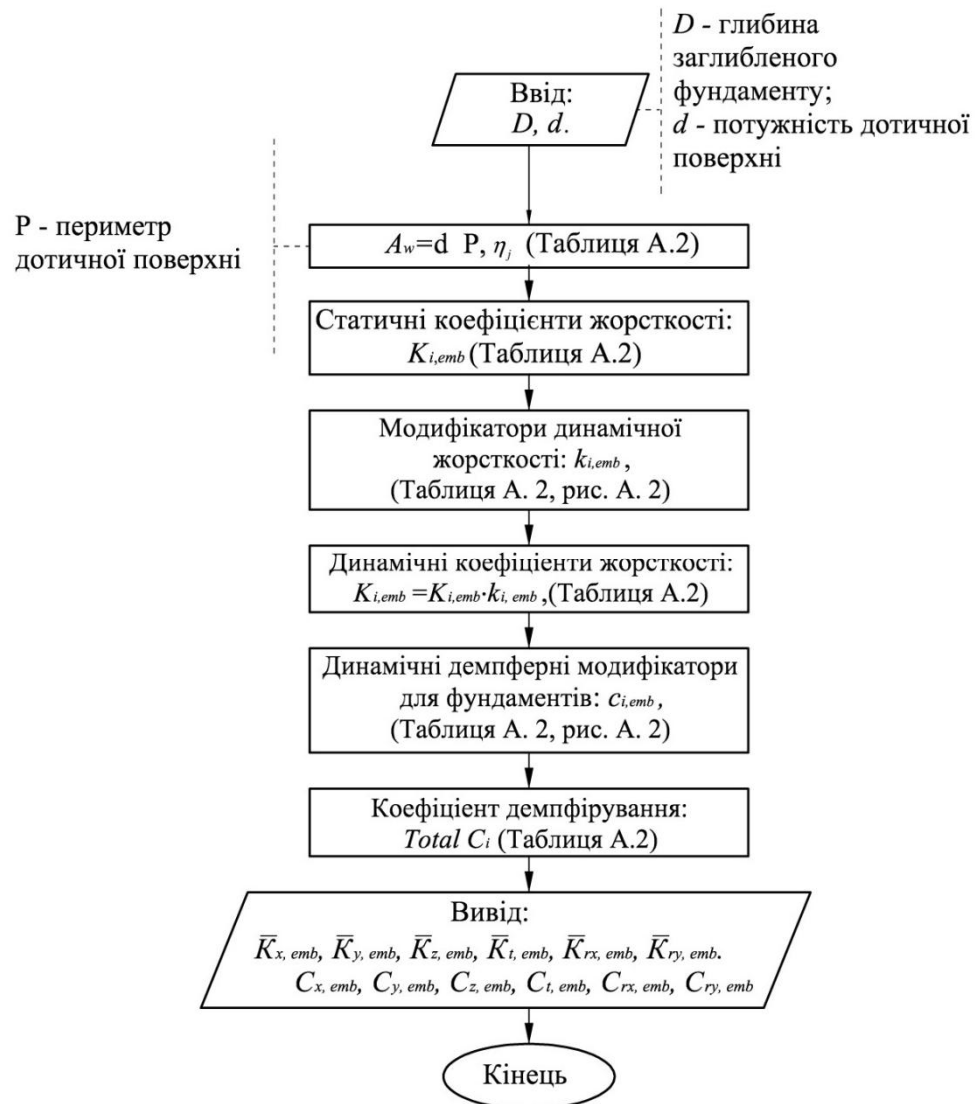


Рис. 2.5. Блок розрахунку №2

У якості вихідних даних використовується геологічний розріз ґрунтового масиву, значення швидкостей поперечних хвиль і фізико-механічні характеристики ґрунтової основи; коефіцієнт Пуассона інженерно-

геологічних елементів, дані про фундамент, моменти інерції споруди відносно горизонтальних і вертикальних осей, відстань від центра ваги споруди до фундаменту, маса досліджуваної споруди.

Нижче наведений алгоритм розрахунку коефіцієнтів жорсткості і демпфування за методикою Бірбраєра.

1) Розрахунок динамічних коефіцієнтів жорсткості прямокутного фундаменту для кожного виду коливань (поступальних та обертальних за трьома осями):

- визначити допоміжні коефіцієнти  $B_x$ ,  $B_z$ ,  $B_\phi$ , які залежать від співвідношення довжини до ширини фундаменту  $B/L$ , згідно з графіком, який представлений на рисунку 1.6;

- обчислити модифікатор  $R$ , використовуючи ширину та довжину фундаменту ( $B$ ,  $L$ ) та математичну константу  $\pi$ , за формулою, яка наведена в таблиці 1.2;

- визначити допоміжні коефіцієнти  $B_\phi$ ,  $B_\psi$ , використовуючи момент інерції споруди відносно горизонтальної осі хитання,  $I_{0m}$ , модифікатор  $R$ , коефіцієнт Пуассона та щільність ґрунту;

- динамічні коефіцієнти жорсткості  $K_i$  розрахувати за допомогою отриманих допоміжних коефіцієнтів та модифікаторів за формулами, наведеними в таблиці 1.2.

2) Розрахунок динамічних коефіцієнтів демпфування для прямокутних фундаментів:

- коефіцієнти демпфування  $b_i$  визначаються відповідно до формул, наведених в таблиці 1.2, на основі розрахованих динамічних коефіцієнтів жорсткості  $K_i$ .

Методика проф. Бірбраєра А. Н. по розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи автором використовується з метою обчислення коефіцієнтів жорсткості і демпфування для прямокутного фундаменту. Однак представлена методика може використовуватись і для круглих фундаментів в плані.

Детальна блок-схема розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи за методикою проф. Бірбраєра А. Н. представлена на рисунку 2.6.

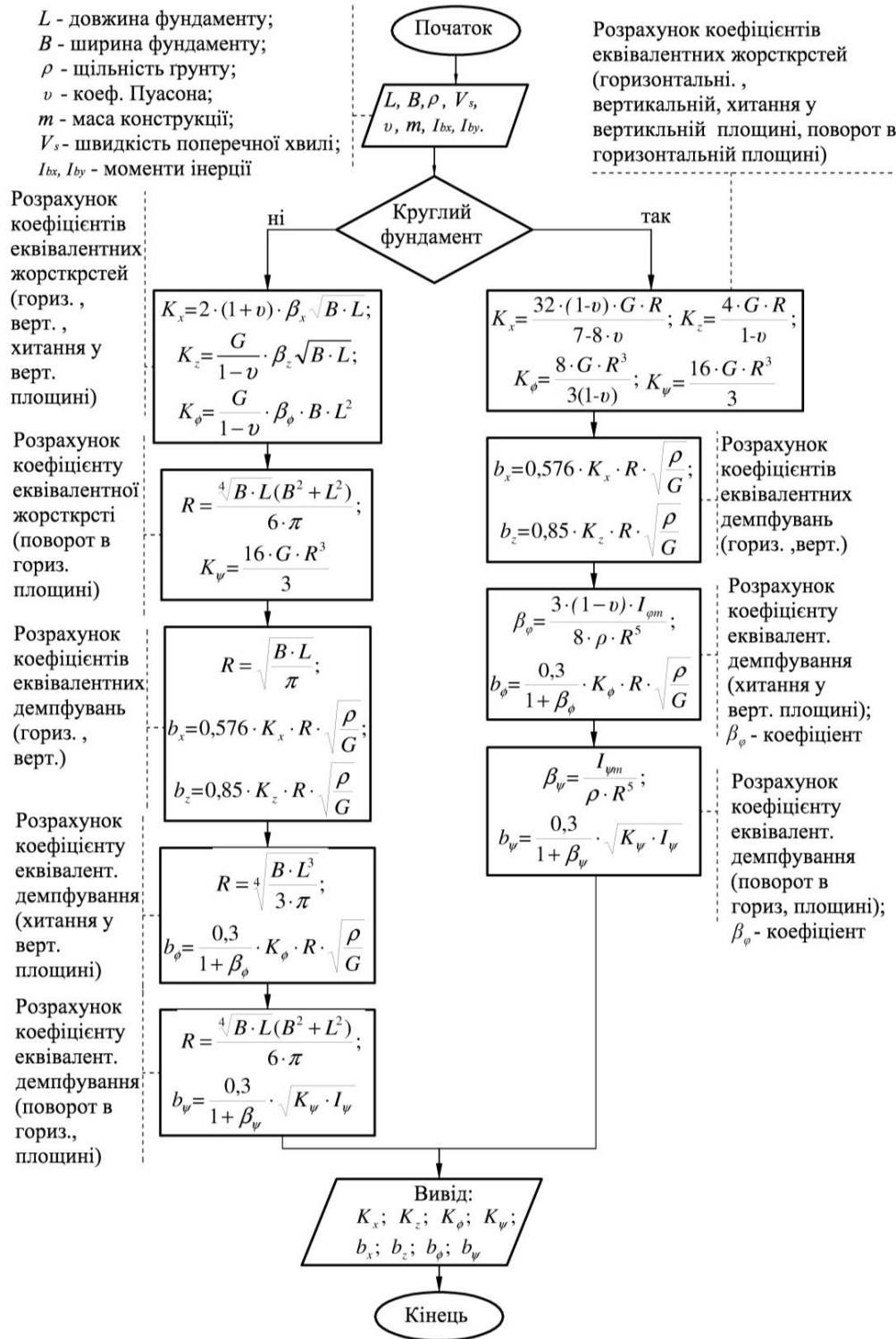


Рис. 2.6. Блок-схема розрахунку коефіцієнтів жорсткості і демпфування за методикою Бірбраєра

Вихідні дані для розрахунку динамічних коефіцієнтів жорсткості та демпфування круглих фундаментів співпадають з вихідними даними прямокутного фундаменту, окрім додатково необхідного радіусу фундаменту  $R$ .

1) Визначити допоміжні коефіцієнти  $B_\phi$ ,  $B_\psi$ , використовуючи момент інерції споруди відносно горизонтальної осі хитання,  $I_{0m}$ , модифікатор  $R$ , коефіцієнт Пуассона та щільність ґрунту.

2) Динамічні коефіцієнти жорсткості  $K_i$  розраховуються за допомогою отриманих допоміжних коефіцієнтів, щільності ґрунту, модуля зсуву за формулами, наведеними в таблиці 1.3.

3) Коефіцієнти демпфування  $b_i$  визначаються відповідно за формулами, представленими в таблиці 1.3, на основі розрахованих динамічних коефіцієнтів жорсткості  $K_i$ .

### **2.3 Розрахунок динамічної та скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі**

Для отримання розрахункового сейсмічного впливу проводиться аналіз взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда". Даний аналіз проводиться шляхом об'єднання отриманих узагальнених параметрів ґрунтової основи та динамічної моделі будівлі, яка еквівалентна за масою і частотою реальній розглянутій системі (розрахунковій схемі конструкції), і отримання відкоригованого сейсмічного впливу для цієї системи на рівні підшви фундаменту конструкції.

Розрахунок дозволяє врахувати ефекти взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда", при чому проходження сейсмічного впливу через стисливе середовище з урахуванням геофізичних умов майданчика враховується шляхом використання в якості вихідних даних сейсмічного впливу на рівні вільної поверхні ґрунту.



Розрахунок скінченно-елементної моделі проводиться шляхом прямого динамічного аналізу. Для цього до моделі прикладаються динамічні навантаження, що моделюють сейсмічну дію заданої інтенсивності в трьох напрямках ( $x, y, z$ ).

У якості вихідних даних використовуються акселерограми в рівні підшви фундаменту з урахуванням взаємодії споруди та ґрунтової основи, які були отримані на етапі розрахунку динамічної моделі споруди з накладеними в еквівалентними параметрами ґрунтової основи.

Отримані в процесі динамічного аналізу системи "основа – фундамент – споруда" результати, а саме поповерхові спектри реакції, використовуються як вихідні дані для кваліфікації систем, важливих для безпеки атомних електростанцій [43].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1) Удосконалено метод аналізу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" та розроблено його алгоритм, запропонований метод оснований на використанні скінченно-елементної моделі, динамічної моделі будівлі та еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи у вигляді коефіцієнтів жорсткості та демпфування.

2) Показано, що використання удосконаленого методу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі дозволяє обчислювати кінематичні параметри будівлі (поповерхові спектри реакції), які в свою чергу є вихідними даним для кваліфікації систем, важливих для безпеки АЕС.

3) Представлені блок-схеми проведення розрахунків еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи за методиками проф. Дж. Газетаса та проф. Бірбраера А. Н., в яких поблоково виділені обчислення залежно від типу фундаменту досліджуваної споруди, що дозволяє кількісно врахувати жорсткостні та демпфуючі властивості ґрунтової основи.

4) Представлені процедури розробки та валідації динамічної моделі будівлі, залежно від типу споруди, яка розглядається, що дозволяє коректно представити загальні динамічні властивості досліджуваної будівлі.

**РОЗДІЛ 3**  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ**  
**СИСТЕМИ "ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – СПОРУДА"**  
**ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ВПЛИВІ**

Натурні експерименти відіграють значну роль у дослідженнях і розвитку динамічного аналізу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда". Аналітичні моделі, які були розроблені на основі теоретичних і чисельних передумов, застосовні для ідеалізованих умов, тому натурні експерименти мають великий вплив на створення методу застосування ідеалізованих моделей на практиці. Крім того, згідно [90], необхідно обґрунтовувати застосовність методів еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи для будівель і споруд АЕС.

Повномасштабне польове дослідження проводиться з метою створення динамічного впливу та реєстрація відповідних даних у контрольних точках на поверхні ґрунту та на відмітках досліджуваної будівлі для отримання якісних та кількісних оцінок перетворення динамічного впливу при його поширенні з ґрунту на будівлю і подальшої перевірки відповідності удосконаленого методу розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" результатам натурального дослідження.

Схема проведення повномасштабних польових досліджень взаємодії ґрунтової основи і споруди при динамічному впливі представлена на рисунку 3.1.

Дослідження показують, що максимальні значення кінематичних параметрів на поверхні ґрунту та на відмітках будівлі при динамічному впливі залишаються в незначному діапазоні [65]. Тому порівняння результатів, отриманих чисельними дослідженнями з натурним експериментом може проводитись по максимальним значенням прискорень в

контрольних точках. Дана методика порівняння є визнаною і широко використовується для динамічної оцінки системи "основа – фундамент – споруда" [19, 65]. Ще одним зі способів оцінки результатів динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" є порівняння спектрів Фур'є натурного експерименту та чисельних досліджень. Спектри Фур'є використовуються для частотного аналізу отриманих впливів з метою виявлення основних частот і закономірностей зміни їх і амплітуд.

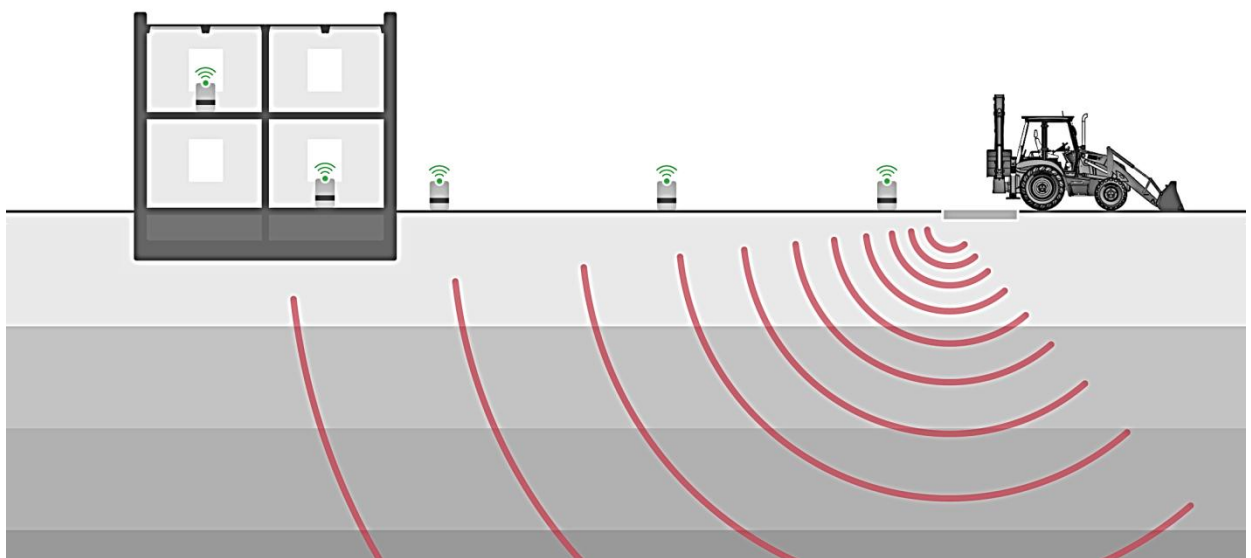


Рис. 3.1. Схема проведення польових експериментальних досліджень

Таким чином, повномасштабне польове експериментальне дослідження взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при динамічному впливі проводиться для отримання кінематичних параметрів (переміщення, швидкості, прискорення) у контрольних точках на поверхні ґрунту та на відмітках будівлі від імітованого динамічного впливу для подальшого порівняння отриманих максимальних амплітуд прискорень і спектрів Фур'є записів у контрольних точках із результатами чисельних досліджень.

У даному розділі представлено об'ємно-планувальне і конструктивне рішення будівлі, фізико-механічні характеристики ґрунту, описанно обладнання, яке використовувалось для досліджень, та етапи проведення натурного експерименту.

### **3.1 Характеристика промайданчика та загальні відомості досліджуваної будівлі**

У якості досліджуваної будівлі була вибрана водно-киснева станція (ВКС) Запорізької атомної електростанції.

Будівля ВКС – двоповерхове каркасне спорудження. Габарити будівлі – 18 000 × 24 000 × 8 700 (h) мм. Конструкції каркаса вирішені в збірних залізобетонних елементах [89].

Просторова стійкість будівлі забезпечується системою вертикальних устоїв, колон, об'єднаних горизонтальними дисками перекриття і покриття.

Будівля обладнана підвісним краном вантажопідйомністю 1,0 т і п'ятьма ручними телями вантажопідйомністю по 1,0 т.

Фундамент будівлі – монолітна залізобетонна плита товщиною 500 мм. Плита виконана з бетону класу В15 з армуванням сітками зі стрижнів класу АШ. Відмітка закладення фундаментів -1,900 м.

Колони каркаса – залізобетонні та металеві (у районі підвісного крана). Перетин залізобетонних колон 400×400 мм. Металеві колони – двотаврові з зовнішніми габаритами 400×400 мм.

Перекриття та покриття – збірно-монолітні.

Монолітні залізобетонні конструкції складаються з бетону класу В15 з армуванням стрижнями класу АШ.

Фрагмент об'ємно-планувальних рішень, а також натурні фотографії досліджуваної будівлі наведені на рисунку 3.2.

Докладне об'ємно-планувальне і конструктивне рішення будівлі представлено в додатку Б (рис. Б.1 – Б.4).

У кліматичному відношенні район належить до областей із помірно-континентальним кліматом, із тривалим посушливим літом і нестійкою малосніжною зимою.

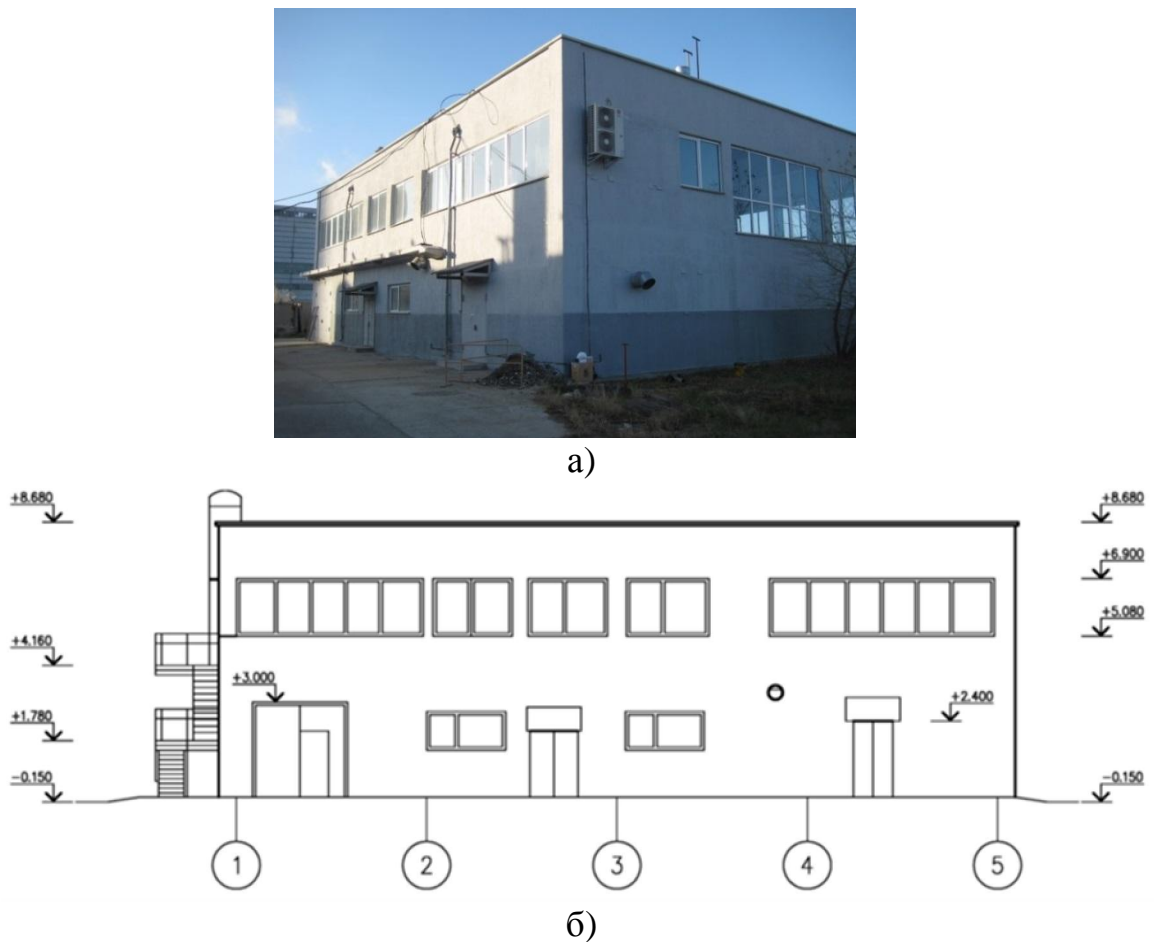


Рис. 3.2. Фрагмент об'ємно-планувальних рішень досліджуваної будівлі:  
а) зовнішній досліджуваної вигляд будівлі; б) фасад будівлі в осях.

Згідно з інженерно-геологічними вишукуваннями проммайданчику [33] ґрунтами основи фундаменту досліджуваної будівлі на глибині залягання -1,900 м. є насипні ґрунти – піски середньої щільності (ІГЕ 1-Б<sub>2</sub>), які підстилаються природними пісками середньої щільності (ІГЕ-4Б).

Літологічна колонка досліджуваної будівлі представлена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

## Літологічна колонка будівлі ВКС

№ ІГЕ	Підшва шару, м		потуж- ність шару, м	Літологічна колонка	Описання ґрунту	Категорія ґрунту
	глибина	абс. позн., м				
1Б <sub>1</sub>	1,8	20,53	1,8		Насипний шар – пісок дрібний, середньої щільності	I
1Б <sub>2</sub>	2,3	20,03	0,5		Насипний шар – пісок дрібний, пухкий	II
4Б	6,2	16,13	3,9		Пісок дрібний жовтувато-коричневий, середньої щільності	III
4А	9,5	12,83	3,3		Пісок дрібний жовтувато-коричневий, пухкий, насичений водою	III
4Б	10,6	11,43	1,1		Пісок дрібний жовтувато-коричневий, середньої щільності	III
4В	20,0	2,33	9,4		Пісок дрібний жовтувато-коричневий, щільний	III

Фізико-механічні властивості ґрунтів кожного інженерно-геологічно елемента наведено нижче.

ІГЕ-1Б<sub>1</sub> – пісок дрібний:

- $\rho_d = 1,49 \text{ т/м}^3$ ;
- коефіцієнт пористості,  $e = 0,77$ ;
- кут внутрішнього тертя,  $\varphi = 28$  град;
- щільність ґрунту,  $\rho = 1,53 \text{ т/м}^3$ ;
- щільність частинок ґрунту,  $\rho_s = 2,65 \text{ т/м}^3$ ;
- модуль деформації,  $E = 13 \text{ МПа}$ .

ІГЕ-1Б<sub>2</sub> – пісок дрібний, середньої щільності:

- $\rho_d = 1,54 \text{ т/м}^3$ ;
- коефіцієнт пористості,  $e = 0,72$ ;

- кут внутрішнього тертя,  $\varphi = 29$  град;
- щільність ґрунту,  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>;
- щільність частинок ґрунту,  $\rho_s = 2,65$  т/м<sup>3</sup>;
- модуль деформації,  $E = 22$  МПа.

ІГЕ-4А – пісок дрібний, пухкий, вологий, насичений водою:

- $\rho_d = 1,48 \dots 1,49$  т/м<sup>3</sup>;
- коефіцієнт пористості,  $e = 0,780 \dots 0,770$ ;
- кут внутрішнього тертя,  $\varphi = 27$  град;
- щільність ґрунту,  $\rho = 1,54 \dots 1,91$  т/м<sup>3</sup> (відповідно вище і нижче рівня ґрунтових вод);
- щільність частинок ґрунту,  $\rho_s = 2,65$  т/м<sup>3</sup>;
- модуль деформації,  $E = 13$  МПа.

ІГЕ-4Б – пісок дрібний, середньої щільності, вологий, насичений водою:

- $\rho_d = 1,56 \dots 1,55$  т/м<sup>3</sup>;
- коефіцієнт пористості,  $e = 0,700 \dots 0,710$ ;
- кут внутрішнього тертя,  $\varphi = 31 \dots 29$  град;
- щільність ґрунту,  $\rho = 1,62 \dots 1,94$  т/м<sup>3</sup> (відповідно вище і нижче рівня ґрунтових вод);
- щільність частинок ґрунту,  $\rho_s = 2,65$  т/м<sup>3</sup>;
- модуль деформації,  $E = 30$  МПа.

ІГЕ-4В – пісок дрібний, щільний, насичений водою:

- $\rho_d = 1,82$  т/м<sup>3</sup>;
- кут внутрішнього тертя,  $\varphi = 37$  град;
- щільність ґрунту,  $\rho = 2,1$  т/м<sup>3</sup>;
- щільність частинок ґрунту,  $\rho_s = 2,65$  т/м<sup>3</sup>;
- модуль деформації,  $E = 45$  МПа.



### 3.2 Основні характеристики вимірювальних приладів

Для аналізу вібрацій на майданчику, а також всередині будівельних конструкцій використовувалась система під назвою GURALP CMG-40TD, даний сейсмометр являє собою трьохкомпонентний цифровий датчик із форс-балансним зворотнім зв'язком у герметичному корпусі з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем і вбудованим засобом калібрування каналу реєстрації.

Сейсмометр є функціонально закінченою системою, що вимагає тільки зовнішнього джерела живлення, однак для налаштування та аналізу даних приладу необхідний персональний комп'ютер. Дана установка використовується для регіональних і локальних мереж, тимчасових установок, моніторингу будівель і споруд, вулканів, інженерної сейсмології та ін. На рисунку 3.3 наведений прилад, який використовувався для вимірювань на будівельному майданчику, а також усередині будівлі безпосередньо на конструкціях споруди. Нижче наведені технічні характеристики сейсмометра GURALP CMG-40TD.



Рис. 3.3. Сейсмометр GURALP CMG-40TD

Основні характеристики приладу, який використовувався:

- частотний діапазон по швидкості: 30 с – 50 Гц (стандарт);
- вихідний сигнал: диференціальний  $\pm 10$  В (20 В повна амплітуда);
- діапазон робочих температур: від -20 до +75 ° С;
- матеріали: корпус з нержавіючої сталі; діаметр корпусу: 154 мм;
- висота корпусу: 207 мм;
- вага: 2,49 кг.

Схема комплекту вимірювального обладнання представлена на рисунку 3.4.

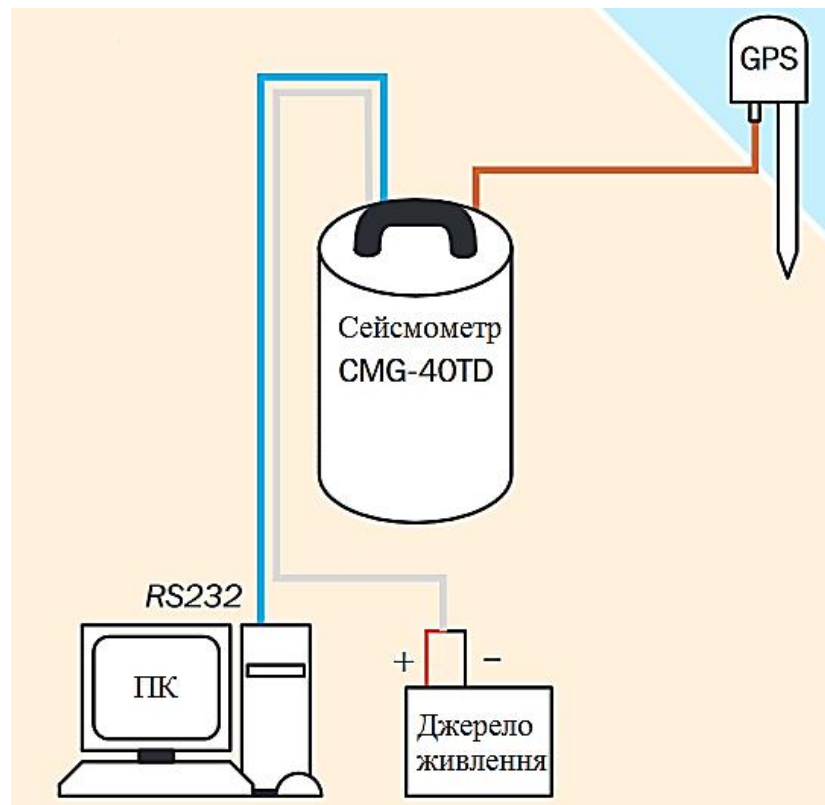


Рис. 3.4. Комплект вимірювального обладнання

До комплекту вимірювального обладнання входять: джерело живлення, прибор "система глобального позиціонування" (GPS) і трьохкомпонентний сейсмометр.

### 3.3 Встановлення вимірювальних приладів та створення динамічного впливу

Реєстрація динамічного впливу на поверхні ґрунту, а також на відмітках будівлі, здійснювалась за допомогою обладнання GURALP CMG-40TD.

Для установки приладу в ґрунті згідно з технічною документацією [141] була обрана методика швидкого розміщення сейсмометра, що являє собою встановлення обладнання в попередньо підготовлене поглиблення діаметром 40 см і глибиною 60...90 см. Дно поглиблення засипається дрібним рихлим піском, на якому розміщується рівна гранітна плітка або плоский камінь розміром не менше 20×20 см.

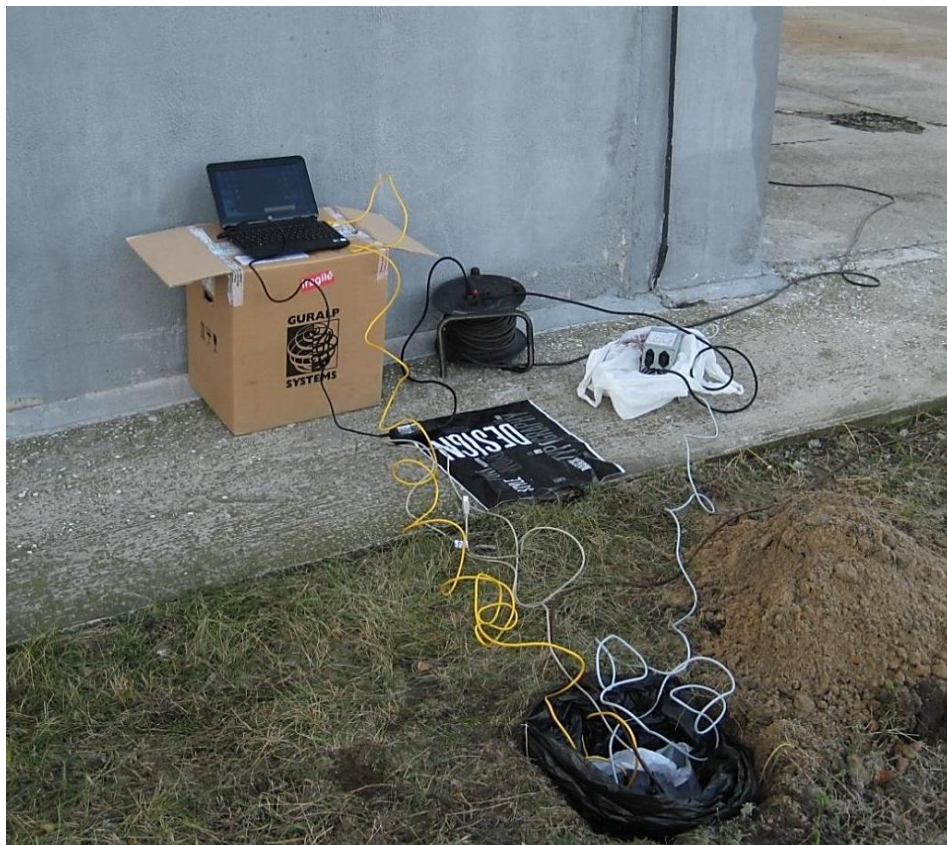


Рис. 3.5. Облаштування тимчасового пункту сейсмологічних спостережень в ґрунті



Сейсмометр GURALP CMG-40TD встановлювався в підготовлене поглиблення (діаметром 40 см, глибиною 60 см) на гранітну плитку в щільній водонепроникній поліетиленовій упаковці (рис. 3.6). Сейсмологічний прилад засипався дрібним піском до вершини приладу. Пісок ізолює інструмент і захищає його від теплових флуктуацій, а також зводить до мінімуму небажану вібрацію.

При установці сейсмологічного обладнання прилад орієнтувався на північ.



Рис. 3.6. Встановлення сейсмометра GURALP в польових умовах:  
1 – гідроізоляційний матеріал (щільна водонепроникна поліетиленова упаковка), 2 – сейсмологічний прилад, 3 – поглиблення.

При реєстрації динамічного впливу на відмітках будівлі згідно з технічною документацією [141] сейсмологічне обладнання встановлювалось безпосередньо на елементах несучих конструкцій досліджуваної споруди (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Встановлення сейсмологічного обладнання на відмітках будівлі

Відповідно до цілей польового експериментального дослідження, а саме реєстрація записів на поверхні ґрунту та на відмітках будівлі – сейсмологічне обладнання розміщувалось по схемі, представленій на рисунку 3.8.

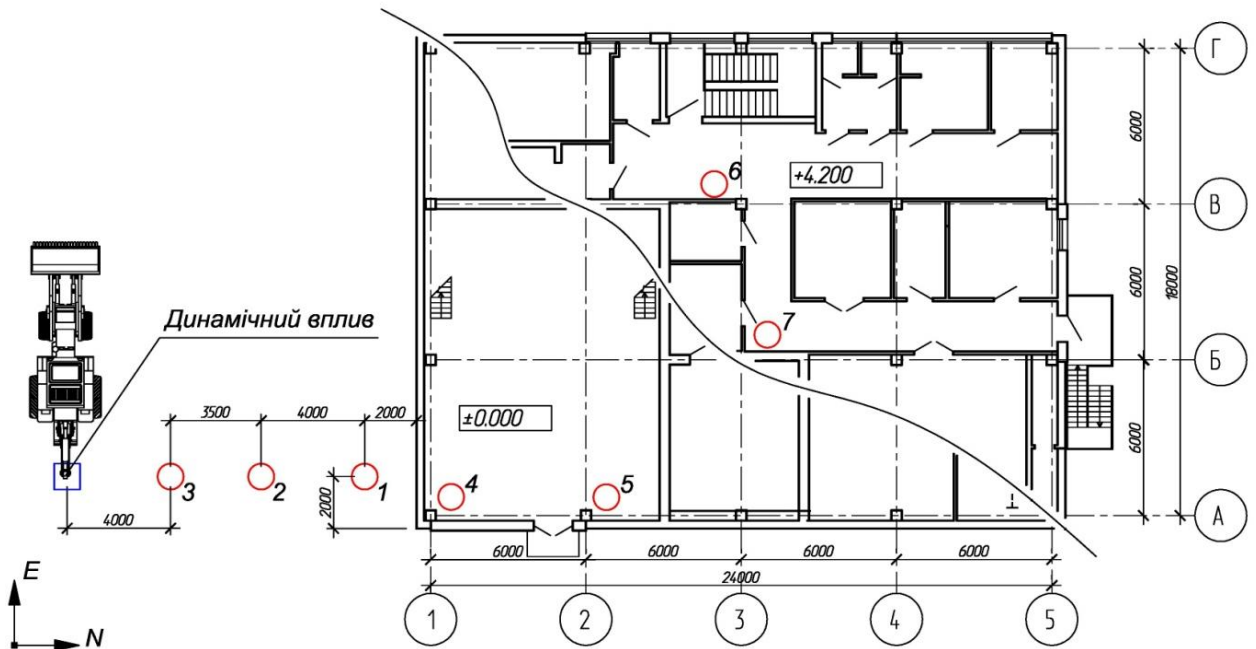


Рис. 3.8. Схема розташування сейсмометра на ґрунті (1-3), на відм.  $\pm 0.000$  (4, 5) і на відм.  $+4.200$  (6, 7)

Динамічний вплив проводився шляхом нанесення ударів бетонолома по закладній деталі плити розміром  $1 \times 1$  м (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Встановлення бетонолома та створення динамічного впливу

Вплив відбувався протягом 15 секунд, при мінімальній інтенсивності роботи бетонолома.

### **3.4 Реєстрація даних та обробка інформації повномасштабних польових досліджень**

Реєстрація обладнанням динамічних даних відбувалось при проходженні динамічних хвиль через ґрунт в процесі створення динамічного впливу.

Для якісного збору даних записані впливи потім фільтрувались в залежності від наступних факторів:

- записи з деякими іншими зовнішніми перешкодами (наприклад, внаслідок проїзду важкого транспорту поблизу вимірювальних приладів) видалялись;



– записи динамічного впливу, які обірвались, наприклад, при відключенні зовнішнього джерела живлення, видалялись.

Обробка інформації проводилась за допомогою програми Scream. Універсальна програма від виробника для роботи зі сейсмологічним обладнанням Guralp. Призначена для контролю обладнання й отримання та збереження даних із сейсмометрів у реальному часі.

У результаті проведених робіт були отримані кінематичні характеристики на поверхні ґрунту та на відмітках будівлі.

На рисунку 3.10 показаний приклад запису одного з приладів, що містить осциляції внаслідок створення динамічного впливу на майданчику.

Згідно з наведеним графіком із 0 по 5 секунду виявлений фоновий шум промайданчику, на якому знаходиться досліджувана будівля, із 5 по 21 секунду наведено енергонасичений діапазон, який містить динамічний вплив з максимальною амплітудою коливань  $0,2 \text{ м/с}^2$ . Із 21 по 28 секунду на графіку виявлений фоновий шум.

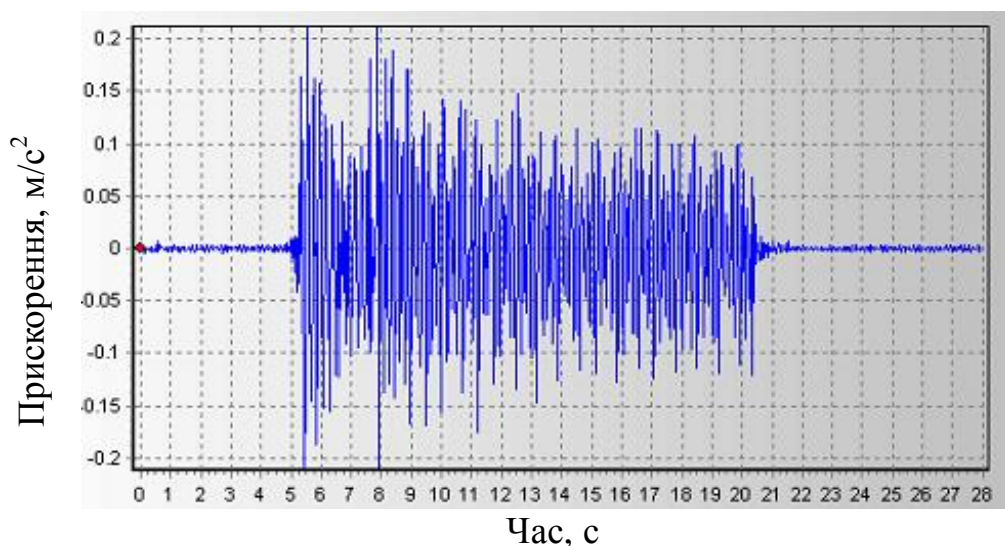


Рис. 3.10. Приклад запису, що містить динамічний вплив в напрямку E

При створенні динамічного впливу поверхня ґрунту та відмітки будівлі отримують складні за своїм спектром та амплітудою коливання, які

супроводжуються поширенням в ґрунтовому середовищі хвиль, що мають складний характер [65] у зв'язку з:

- віддзеркалюванням від границь вільної поверхні;
- віддзеркалюванням від границь ґрунтових шарів;
- віддзеркалюванням від фундаменту будівлі;
- взаємодією з іншими хвилями;
- процесами згасання.

Натурні дослідження показують, що характер зміни кінематичних параметрів (переміщення, швидкості, прискорення) поверхні ґрунту залежить від таких факторів як:

- неоднорідність властивостей ґрунтів;
- присутність ґрунтових вод;
- зовнішні шуми на майданчику;
- властивості середовищ.

Згідно з цілями науково-дослідної роботи, а саме: обґрунтування удосконаленого методу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" запропонована методика порівняння результатів, отриманих чисельними дослідженнями з польовими даними.

У роботі використовуються два способи порівняння результатів чисельних досліджень із натурним експериментом:

- порівняння максимальних амплітуд прискорень в контрольних точках;
- порівняння спектрів Фур'є записів, які були зареєстровані в контрольних точках.

На рисунку 3.11 представлена схема запропонованої методики порівняння отриманих в контрольних точках результатів. Схема розташування контрольних точок представлена на рисунку 3.8.



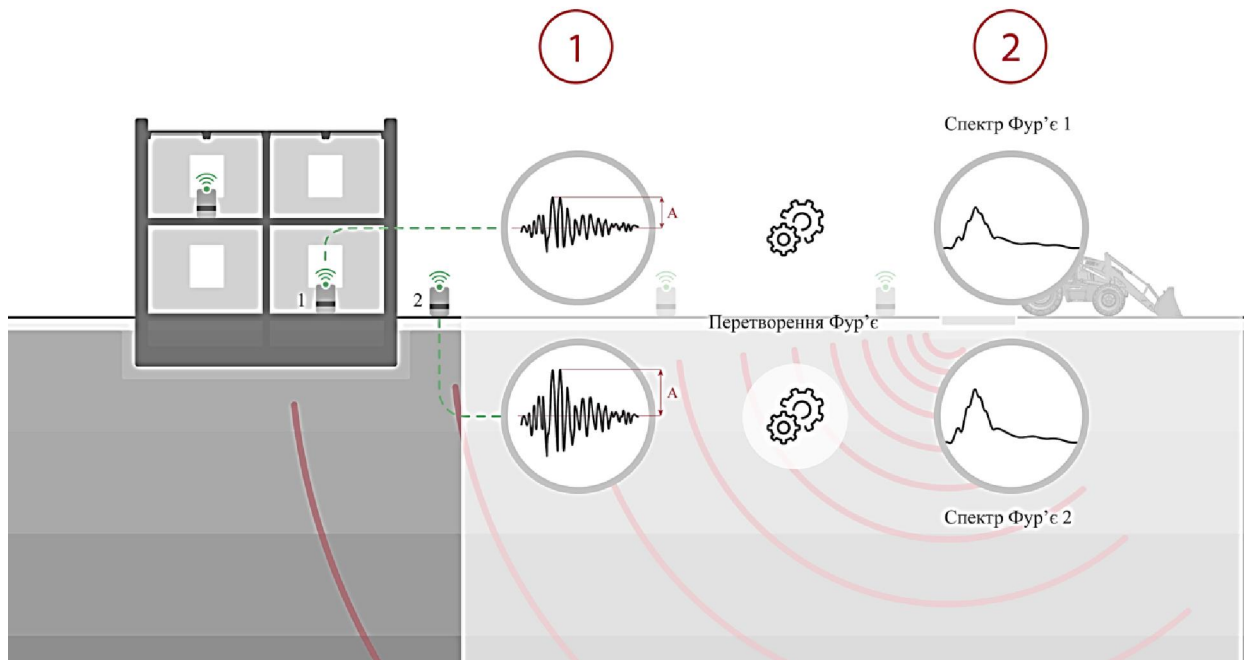


Рис. 3.11. Схема методики порівняння отриманих результатів

Результати натурних досліджень у вигляді максимальних амплітуд прискорень динамічного впливу записів у контрольних точках наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

**Максимальні амплітуди динамічного впливу в контрольних точках**

Контрольна точка	Напрямок руху		
	Е	Н	З
1	0,21 м/с <sup>2</sup>	0,168 м/с <sup>2</sup>	0,17 м/с <sup>2</sup>
2	0,22 м/с <sup>2</sup>	0,175 м/с <sup>2</sup>	0,24 м/с <sup>2</sup>
3	0,23 м/с <sup>2</sup>	0,18 м/с <sup>2</sup>	0,27 м/с <sup>2</sup>
4	0,055 м/с <sup>2</sup>	0,042 м/с <sup>2</sup>	0,041 м/с <sup>2</sup>
5	0,051 м/с <sup>2</sup>	0,039 м/с <sup>2</sup>	0,04 м/с <sup>2</sup>
6	0,026 м/с <sup>2</sup>	0,022 м/с <sup>2</sup>	0,038 м/с <sup>2</sup>
7	0,024 м/с <sup>2</sup>	0,019 м/с <sup>2</sup>	0,038 м/с <sup>2</sup>

Згідно з методикою порівняння розрахункових методів взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда", один зі способів порівняльного аналізу є зіставлення основних частот і їх амплітуд,

отриманих в одній й тій же контрольній точці за результатами чисельних досліджень і за результатами польового експериментального дослідження. Отримані результати натурних досліджень у вигляді часового ряду (зазвичай графіки залежності прискорень від часу для вібрацій) при створенні динамічного впливу перетворюється в частотні спектри за допомогою перетворювання Фур'є.

Отримані спектри Фур'є записів контрольних точок № 3 (поверхня ґрунту) та № 4 (відмітка будівлі) представлені на рисунках 3.12 – 3.17.

Наведений спектр Фур'є запису впливу в контрольній точці на поверхні ґрунту в напрямку Е (рис. 3.12) має два яскраво виражених піки на частотах приблизно 4 і 5,5 Гц, що пояснюється складністю зареєстрованого сигналу та наявністю в коливальному процесі декількох регулярних складових із різними частотами (частота динамічного впливу та частота екскаватора). У проміжку між ними розташований енергонасичений діапазон із плавним збільшенням до значно меншого піку на частоті приблизно 5 Гц. Максимальна амплітуда Фур'є по даному напрямку знаходиться на частоті 5,5 Гц і становить 0,42.

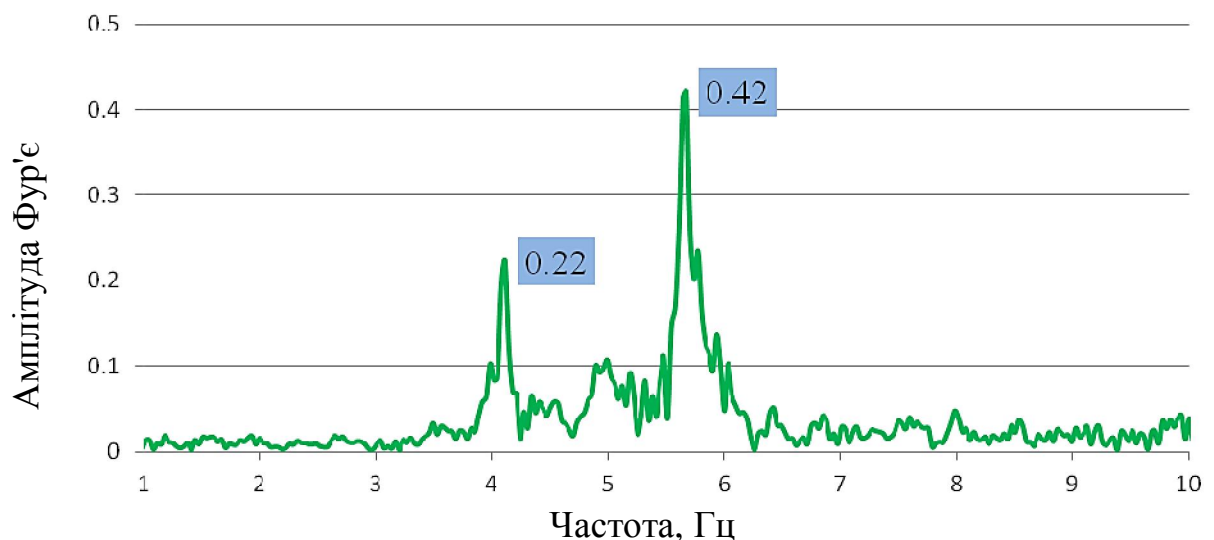


Рис. 3.12. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований в контрольній точці ґрунтової основи в напрямку Е

На рисунку 3.13 представлений спектр Фур'є запису впливу в напрямку Е, зареєстрованого в контрольній точці на відмітці досліджуваної будівлі.

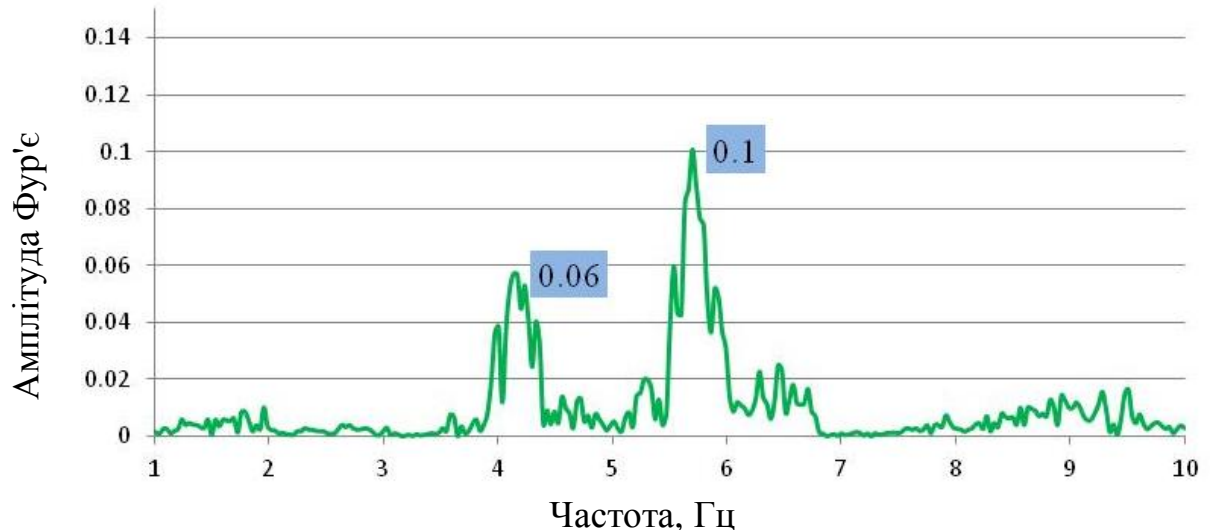


Рис. 3.13. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований в контрольній точці на відмітці будівлі в напрямку Е

На графіку (рис. 3.13) присутні два явно виражені, рознесені по частотах піки. Серед них пік, що відповідає більш високій частоті, має більше значення амплітуди Фур'є. У цих же частотних діапазонах розташовані піки спектру коливання ґрунтової основи (рис. 3.12).

Амплітуди Фур'є запису впливу, зареєстрованого на відмітці досліджуваної будівлі, істотно менші, ніж амплітуди Фур'є запису впливу на поверхні ґрунту, що пояснюється процесами фільтрації і демпфування, які супроводжують перехід коливальних процесів від ґрунтової основи до будівлі. В області частот від 1 до 3 Гц досить явно проявляються піки, близькі до частот власних коливань досліджуваного споруди.

Спектр Фур'є запису впливу зареєстрованого в контрольній точці на поверхні ґрунту в напрямку N (рис. 3.14) має три зони пікових значень: 4 Гц, 4,5 Гц і 5,5 Гц. Спектр Фур'є в напрямку N за характером аналогічний

спектру Фур'є в напрямку Е (рис. 3.12). Піки спектрів знаходяться практично в однакових частотних діапазонах.

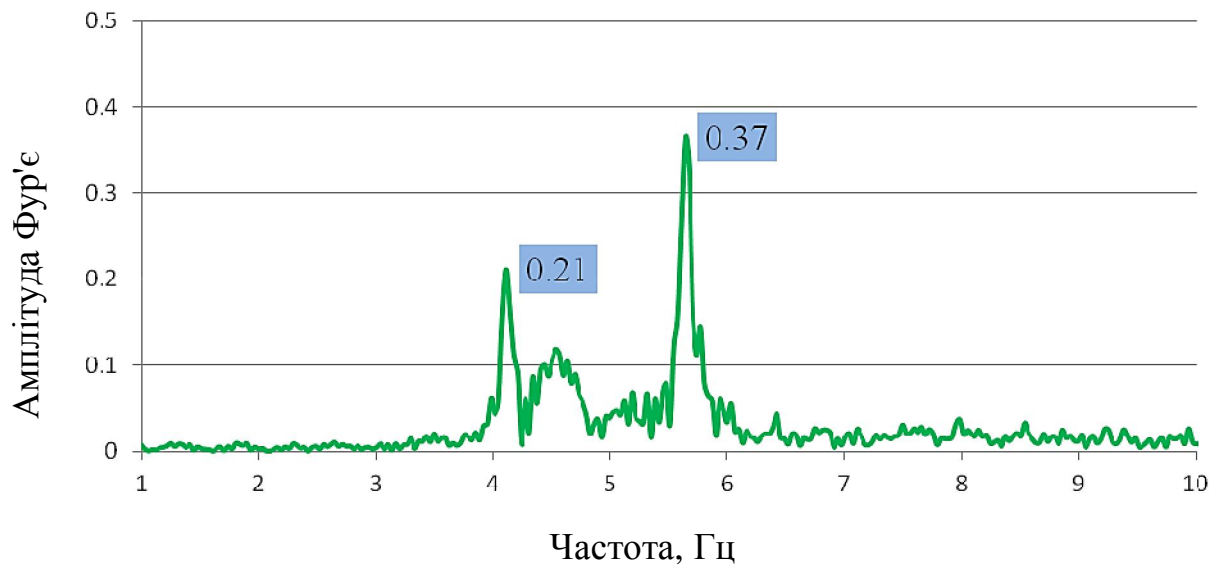


Рис. 3.14. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований в контрольній точці ґрунтової основи в напрямку N

Спектр Фур'є запису впливу зареєстрованого в точці на відмітці досліджуваного споруди в напрямку N (рис. 3.15) є найбільш широкополосним порівняно з іншими.

Два низькочастотних піки, які були зареєстровані в контрольній точці ґрунтової основи на частотах приблизно 4 і 4,5 Гц (рис. 3.14), зливаються в один із максимальним піком на частоті близько 6 Гц. Максимальна амплітуда даного спектра рознесена в широкій частотній смузі (5...6,5 Гц).

Як і у випадку зі спектром Фур'є запису впливу в напрямку Е, зареєстрованого на відмітці досліджуваної споруди, на даному спектрі проявляються піки, близькі до частот власних коливань будівлі.

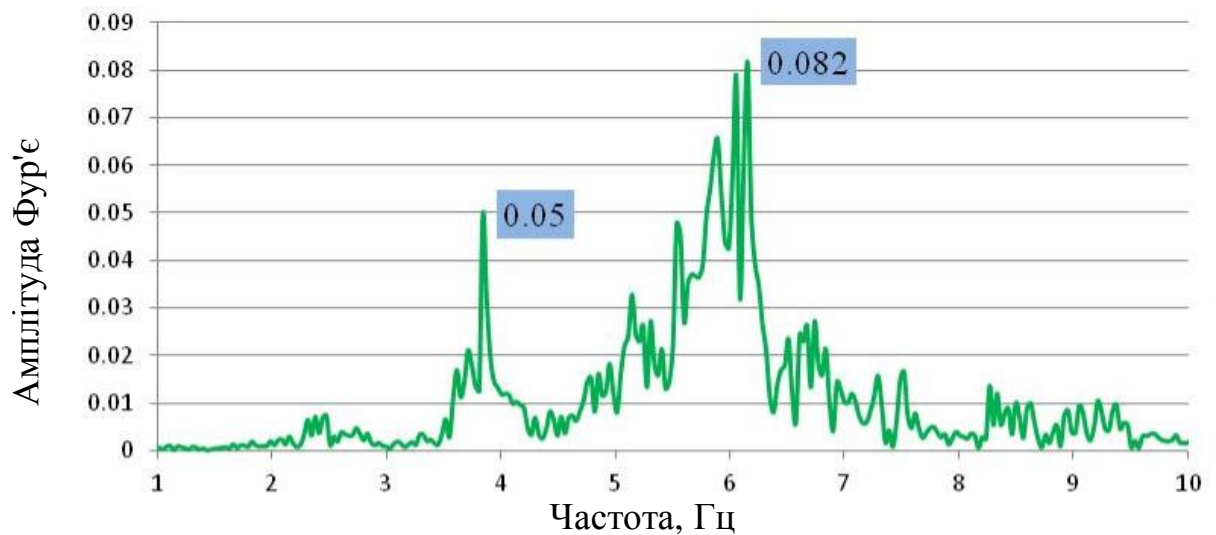


Рис. 3.15. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований в контрольній точці на відмітці будівлі в напрямку N

Найбільш інтенсивною по амплітуді Фур'є в усьому частотному діапазоні є вертикальна складова, отримана в контрольній точці на поверхні ґрунту (рис. 3.16).

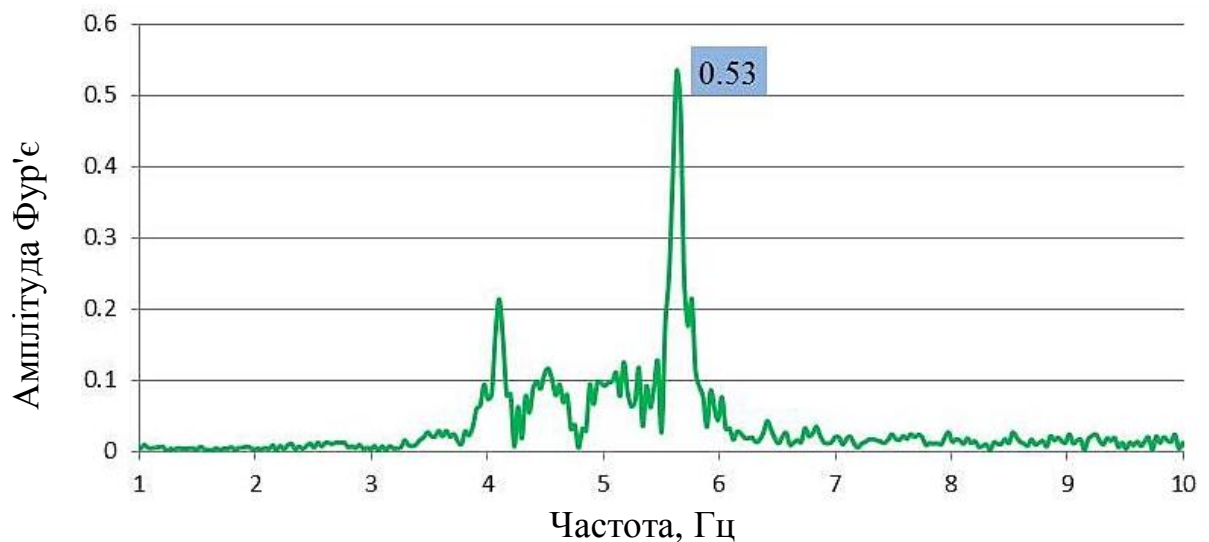


Рис. 3.16. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований в контрольній точці ґрунтової основи в напрямку Z

На рисунку 3.17 представлений спектр Фур'є запису впливу в напрямку Z, який був зареєстрований в контрольній точці на відмітці досліджуваної будівлі. Як і в інших спектрах Фур'є, в даному спектрі присутні два основних піки на частотах 4 і 5,5 Гц.

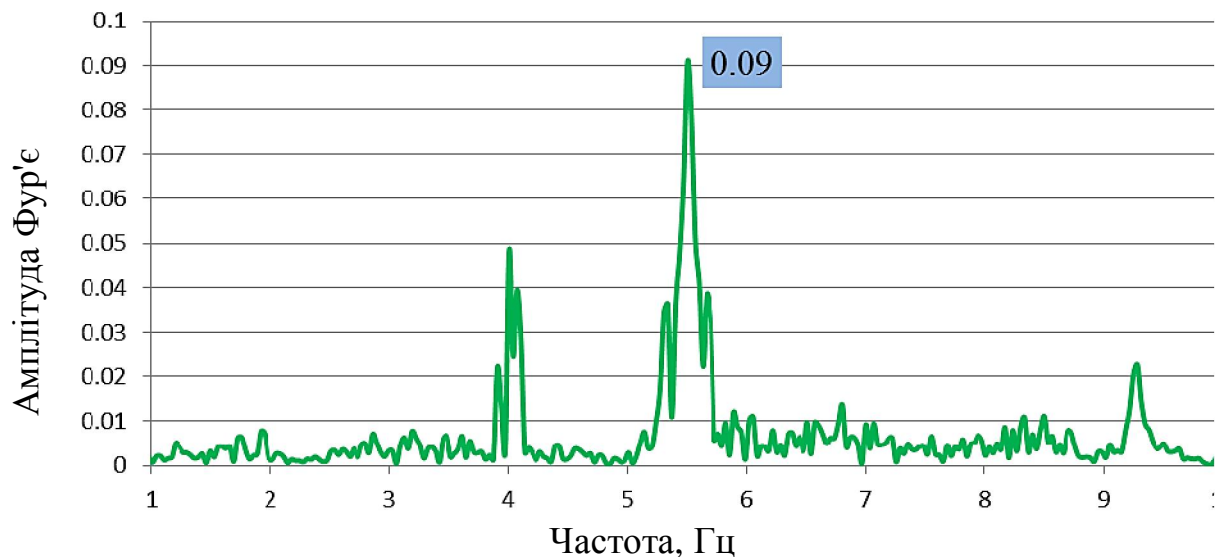


Рис. 3.17. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований в контрольній точці на відмітці будівлі в напрямку Z

Із проведеного аналізу спектрів Фур'є горизонтальної і вертикальної складових зареєстрованих впливів у контрольних точках на поверхні ґрунту і на відмітках будівлі виділені такі характерні особливості:

- найбільш інтенсивною за амплітудою Фур'є в усьому частотному діапазоні є вертикальна складова, найменшою – горизонтальна складова в поздовжньому напрямку відносно досліджуваної будівлі;
- у всіх представлених спектрах Фур'є записів, зареєстрованих у контрольних точках вимірювання коливань, присутні два яскраво виражених піки на частотах приблизно 4 і 5,7 Гц;

– відмінною особливістю спектра Фур'є запису в напрямку N, який був зареєстрований на відмітці досліджуваної споруди є наявність у нього широкого піку в області частот близько 6 Гц;

– коливання в контрольних точках на поверхні ґрунту істотно перевищують за амплітудою коливання, які були зареєстровані на відмітках досліджуваної будівлі, що пояснюється процесами фільтрації і демпфування, які супроводжують перехід коливальних процесів від ґрунтової основи до будівлі;

– на спектрах Фур'є записів зареєстрованих на відмітках досліджуваної будівлі досить явно проявляються піки, близькі до частот власних коливань споруди.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1) Виявлено, що аналітичні моделі врахування ґрунтової основи в системі "основа – фундамент – споруда" при динамічному впливі, які були розроблені на основі теоретичних і чисельних передумов, застосовні для ідеалізованих умов, тому натурні експерименти мають великий вплив на створення методу застосування ідеалізованих моделей на практиці.

2) В результаті проведення польових досліджень отримано записи динамічного впливу на поверхні ґрунту та на відмітках будівлі, що досліджувалася. Отримані результати в подальших етапах роботи порівнюються з моделюванням даної задачі удосконаленим методом.

3) Виявлено, що при проведенні натурних експериментів (створення динамічного впливу) поверхня ґрунту та будівля отримують складні за своїм спектром та амплітудою коливання, однак максимальні значення кінематичних параметрів на поверхні ґрунту та на відмітках будівлі порівняно з чисельними розрахунками знаходяться в незначному діапазоні.

4) Представлено методику порівняння результатів чисельних і натурних досліджень, яка включає в себе порівняння максимальних амплітуд прискорень у контрольних точках і порівняння спектрів Фур'є, які в свою чергу використовуються для частотного аналізу зареєстрованих впливів з метою виявлення основних частот і закономірностей зміни їх та амплітуд.



## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІТИЧНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ СИСТЕМИ "ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – СПОРУДА"

У відповідності з цілями науково-дослідної роботи для обґрунтування застосовності удосконаленого методу взаємодії ґрунтової основи зі спорудою необхідно провести чисельні дослідження моделювання системи "основа – фундамент – споруда" для подальшого порівняння з даними отриманими за допомогою польового експерименту.

Згідно з удосконаленим методом для моделювання ґрунтового середовища в системі "основа – фундамент споруда" використовуються такі методики моделювання ґрунтової основи.

1) Модель еквівалентних динамічних жорсткостей і демпфування ґрунтової основи запропонованим методом проф. А. Н. Бірбраєра.

2) Модель еквівалентних динамічних жорсткостей і демпфування ґрунтової основи запропонованим методом проф. Дж. Газетаса.

Для оцінки збіжності отриманих результатів динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда", змодельованої відповідно до удосконаленого методу, крім результатів, що були отримані при проведенні повномасштабного натурного експерименту, використовується прямий метод розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" (моделювання ґрунту об'ємними елементами).

Чисельне моделювання виконано з використанням таких спеціалізованих програмних комплексів, як:

- розрахунковий комплекс Ansys Workbench;
- розрахунковий комплекс Robot structural analysis.

Для застосування даних комплексів необхідно обґрунтувати розрахункові передумови побудови чисельних моделей.

#### **4.1 Обґрунтування розрахункових передумов побудови чисельних моделей**

Метод отримання кінематичних параметрів у точках всередині конструкції та в ґрунтовому масиві передбачає вирішення завдання обчислення історії зміни прискорень в даних точках. Ця задача вирішується за допомогою аналізу чисельної моделі методом скінчених елементів шляхом прямого інтегрування рівнянь руху елементів чисельної моделі (прямий динамічний аналіз).

Для отримання коректних результатів необхідно, щоб крок сітки був достатнім. У рамках даної роботи були проведені попередні дослідження по обґрунтуванню густоти сітки, результати яких наведені в додатку Г.

При аналізі результатів чисельних досліджень враховувався ряд допущень моделювання:

- спрощення взаємного розташування елементів. У рамках розрахунків осі скінчених елементів-пластин, які моделюють залізобетонні конструкції, приймалось, що вони лежать в одній площині, якщо різниця у фізичному розташуванні осей становила менше 10 см по модулю;

- перехід від континуальної розрахункової схеми до скінченно-елементної. Прийнято, що осі елементів проходять через центри тяжкості відповідних перетинів; точки розташування вузлів збігаються з осями, які приходять у вузол елементів або збігаються з умовним центром обертання відповідного їм з'єднання.

Врахування зазначених вище допущень є такими що визнані та не знижують коректності результатів розрахунку поповерхових спектрів реакції досліджуваної будівлі.

#### **4.2 Удосконалений метод аналізу динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда".**

Відповідно до мети дослідження, а саме обґрунтування удосконаленого методу моделювання взаємодії ґрунтової основи зі спорудою, у даному розділі проводиться розрахунок взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда". Результати, які були отримані в даному розділі, в подальшому порівнюються з результатами, отриманими на етапі натурних досліджень.

У роботі використовуються два способи порівняння результатів, а саме: порівняння максимальних амплітуд прискорень та порівняння спектрів Фур'є записів в контрольних точках.

Згідно з удосконаленим методом ґрунт описується пружними та демпфуючими властивостями, що відображають опір та розсіювання енергії в ґрунтової основі.

Оскільки метою розрахунку є обчислення кінематичних параметрів (переміщення, швидкості, прискорення) окремих точок будівлі, а також використовується удосконалений в даній дисертаційній роботі метод, застосовується спрощена схема будинку [8, 7, 83, 24] у вигляді пружно-деформованої системи із зосередженими у вузлах масами.

Відповідно до розробленого методу (розділ 2) обчислення кінематичних параметрів досліджуваної будівлі з урахуванням взаємодії з ґрунтовою основою був розділений на п'ять етапів.

- 1) Побудова скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі.
- 2) Розрахунок еквівалентних динамічних характеристик ґрунтової основи для врахування взаємодій в системі "основа – фундамент – споруда".
- 3) Розробка динамічної моделі будівлі з метою отримання розрахункових впливів на рівні підшви фундаменту конструкції.
- 4) Розрахунок динамічної моделі будівлі з накладеними динамічними параметрами ґрунтової основи.

5) Розрахунок скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі на динамічну дію, яка була отримана, виходячи з попереднього етапу.

#### 4.2.1 Тривимірна скінченно-елементна модель досліджуваної будівлі.

У якості основних джерел інформації, необхідних для побудови розрахункової скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі (зокрема відомості про конструктивну схему і характеристики матеріалів конструктивних елементів), використовувалась технічна документація на будівельні конструкції [89].

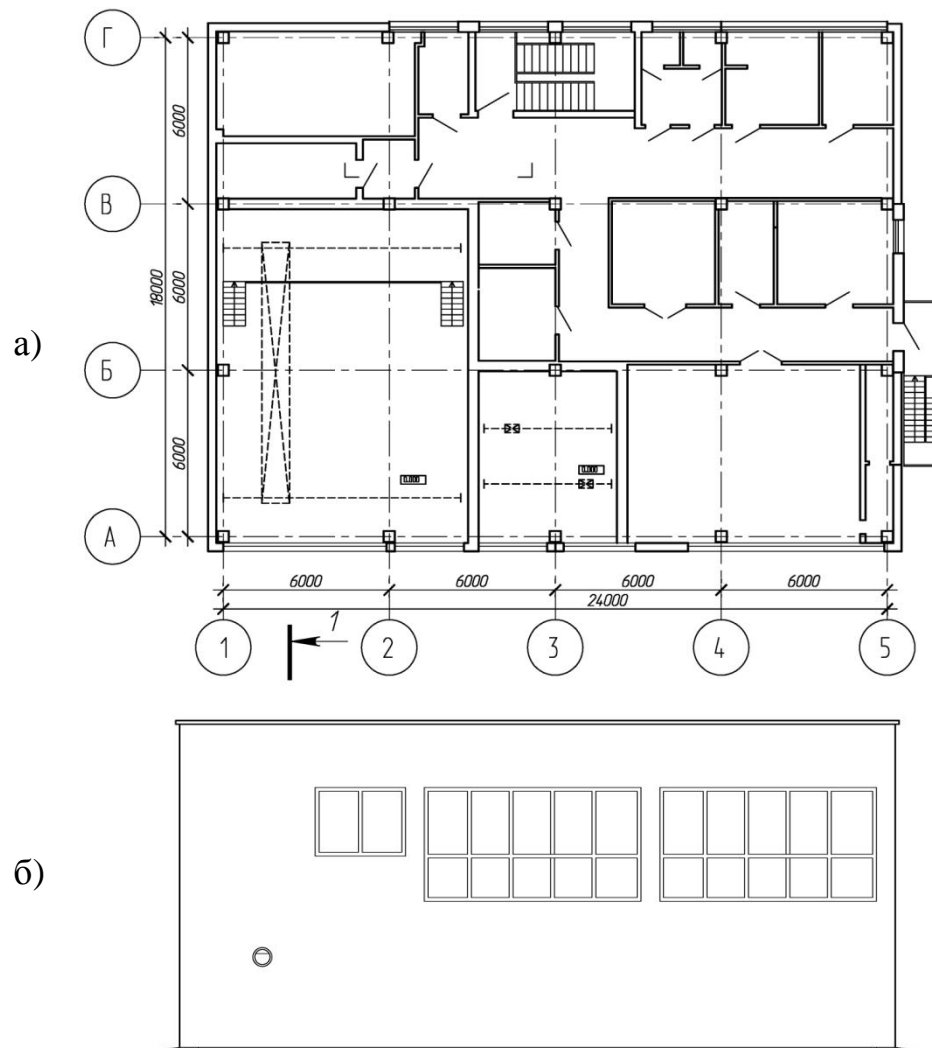


Рис. 4.1. Фрагмент об'ємно-планувальних рішень:

а) план на відм.  $\pm 0,000$ ; б) фасад.

Побудова скінченно-елементної моделі здійснювалась у середовищі розрахункового комплексу Robot. При моделюванні використовувався принцип побудови більш загальної, т.зв. геометричної, моделі споруди, що складається з елементів більш високого порядку. Навантаження, зв'язки та властивості матеріалів й елементів накладалися на геометричну модель, на основі якої препроцесором генерувалась СЕ-модель. (рис. 4.2).

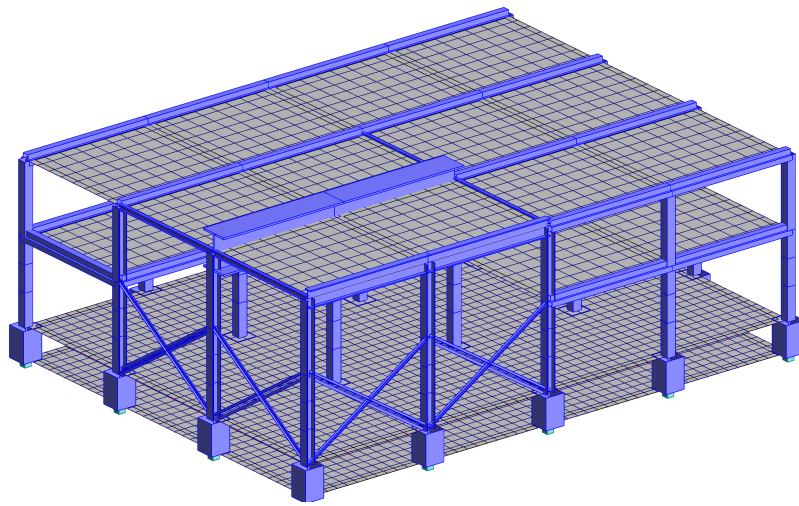


Рис. 4.2. СЕ модель досліджуваної будівлі. Загальний вигляд

#### **4.2.2 Розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи досліджуваної будівлі.**

У даному розділі представлений розрахунок коефіцієнтів жорсткості та демпфування ґрунтової основи досліджуваної будівлі згідно з методиками Дж. Газетаса та А. Н. Бірбраєра.

Формули для знаходження еквівалентних жорсткостей ґрунтової основи і коефіцієнтів втрат енергії за методикою Дж. Газетаса наведено в таблицях А.1, А.2.

Нижче представлений розрахунок коефіцієнтів жорсткості та демпфування за методикою Дж. Газетаса. Необхідні вихідні дані представлені в таблиці 4.1.

Згідно з методикою Дж. Газетаса в розрахунках приймається:

$$L = L_{\text{фунд}}/2 ; B = B_{\text{фунд}}/2.$$

Таблиця 4.1

## Вихідні дані

№	Назва	Показник	Значення	Од. вим.
1	Довжина будівлі	$L_{\text{фунд}}$	24	м
2	Ширина будівлі	$B_{\text{фунд}}$	18	м
3	Глибина залягання фундаменту	$D$	1,9	м
4	Щільність ґрунту	$\rho$	1,6	т/м <sup>3</sup>
5	Швидкість поперечної хвилі	$V_s$	300	м/с
6	Коефіцієнт Пуассона	$\nu$	0,35	
8	Переважаюча частота впливу	$f$	5,50	Гц
9	Площа фундаменту	$A_b$	432	м <sup>2</sup>
10	Швидкість хвилі "Аналог Лісмера"	$V_{La} = \frac{3,4}{\pi(1-\nu)} \cdot V_s$	499,76	м/с
11	Кругова частота прикладеного впливу	$\omega = 2\pi f$	34,54	Гц
12	Безрозмірна частота	$a_0 = \frac{\omega B}{V_s}$	1,04	
13	Коефіцієнт	$\chi = \frac{A_b}{4L^2}$	0,75	
14	Площа дотичної поверхні	$A_w = (d) \times (\text{периметр})$	168	м <sup>2</sup>

Далі наводиться розрахунок динамічних коефіцієнтів демпфування і коефіцієнтів жорсткості для фундаменту досліджуваної будівлі.

Розрахунок вертикального режиму відносно осі Oz.

1) Статичний коефіцієнт обчислюємо за формулою 4.1:

$$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} (0,73 + 1,54 \cdot \chi^{0,75}), \quad (4.1)$$

$$K_z = 10480,34 \cdot 10^3 \text{ кН/м.}$$

2) Визначаємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_z = k_z \left( \frac{L}{B}, \nu; a_0 \right), \quad (4.2)$$

$$k_z = 0,9.$$

3) Розраховуємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\bar{K}_z = K_z \cdot k_z(\omega), \quad (4.3)$$

$$\bar{K}_z = 9,43 \cdot 10^6 \text{кН/м}.$$

4) Допоміжний динамічний коефіцієнт демпфування визначаємо за формулою:

$$\tilde{c}_z = \tilde{c}_z \left( \frac{L}{B}, \nu; a_0 \right), \quad (4.4)$$

$$\tilde{c}_z = 0,9.$$

5) Обчислюємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_z = (p \cdot V_{La} \cdot A_b) \cdot \tilde{c}_z, \quad (4.5)$$

$$C_z = 31,09 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м}.$$

6) Далі визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C + 2 \frac{\bar{K}}{\omega} \beta_0, \quad (4.6)$$

$$Total C = 36,55 \cdot 10^4 \text{кНс/м.}$$

Розрахунок бічного горизонтального режиму відносно осі Oy:

- 1) Статичний коефіцієнт визначаємо за формулою 4.7:

$$K_y = \frac{2GL}{2 - \nu} (2 + 2.50\chi^{0.85}), \quad (4.7)$$

$$K_y = 8289,54 \cdot 10^3 \text{кН/м.}$$

- 2) Обчислюємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_y = k_y \left( \frac{L}{B}, \nu; a_0 \right), \quad (4.8)$$

$$k_y = 1.$$

- 3) Розраховуємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\overline{K}_y = K_y \cdot k_y(\omega), \quad (4.9)$$

$$\overline{K}_y = 8,29 \cdot 10^6 \text{кН/м.}$$

- 4) Допоміжний динамічний коефіцієнт демпфування визначаємо за формулою:

$$\tilde{c}_y = \tilde{c}_y \left( \frac{L}{B}; a_0 \right) \quad (4.10)$$

$$\tilde{c}_y = 0,9.$$



5) Обчислюємо коефіцієнт демпфування:

$$C_y = (\rho V_s A_b) \tilde{c}_y, \quad (4.11)$$

$$C_y = 18,66 \cdot 10^4 \text{кНс/м.}$$

6) Визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C + 2 \frac{\overline{K}}{\omega} \beta_0, \quad (4.12)$$

$$Total C = 23,46 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м.}$$

Розрахунок бічного горизонтального режиму відносно осі Oх:

1) Статичний коефіцієнт розраховуємо за формулою 4.13:

$$K_x = K_y - \frac{0.2}{0.75 - \nu} GL \left(1 - \frac{B}{L}\right), \quad (4.13)$$

$$K_x = 8073,54 \cdot 10^3 \text{кН/м.}$$

2) Визначаємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_x \approx 1.$$

3) Розраховуємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\overline{K}_x = K_x \cdot k_x(\omega), \quad (4.14)$$

$$\bar{x} = 8,07 \cdot 10^6 \text{кН/м.}$$

- 4) Обчислюємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_x = \rho V_s A_b, \quad (4.15)$$

$$C_x = 20,74 \cdot 10^4 \text{кНс/м.}$$

- 5) Визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C + \frac{\overline{2K}}{\omega} \beta_0, \quad (4.16)$$

$$Total C = 25,41 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м.}$$

Розрахунок режиму коливання навколо осі Оу (rOx).

- 1) Статичний коефіцієнт визначаємо за формулою 4.17:

$$K_{rx} = \frac{G}{1-\nu} I_{bx}^{0.75} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.25} \left(2.4 + 0.5 \frac{B}{L}\right), \quad (4.17)$$

$$K_{rx} = 74,15 \cdot 10^7 \text{кН} \cdot \text{м.}$$

- 2) Розраховуємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_{rx} = 1 - 0.20a_0, \quad (4.18)$$

$$k_{rx} = 0,79.$$

- 3) Визначаємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\overline{\overline{K}}_{rx} = K_{rx} \cdot k_{rx}(\omega), \quad (4.19)$$

$$\overline{K_{rx}} = 58,78 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

4) Обчислюємо допоміжний динамічний коефіцієнт демпфування визначаємо за формулою:

$$\tilde{c}_{rx} = \tilde{c}_{rx} \left( \frac{L}{B}; a_0 \right), \quad (4.20)$$

$$\tilde{c}_{rx} = 0,25.$$

5) Розраховуємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{rx} = (\rho V_{La} I_{bx}) \tilde{c}_{rx}, \quad (4.21)$$

$$C_{rx} = 233,17 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{с/м}.$$

6) Далі визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C + 2 \frac{\overline{K}}{\omega} \beta_0, \quad (4.22)$$

$$Total C = 573,52 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок режиму коливання навколо поздовжньої осі Оу (rOy)

1) Статичний коефіцієнт розраховуємо за формулою 4.23:

$$K_{ry} = \frac{3G}{1-\nu} I_{by}^{0.75} \left( \frac{L}{B} \right)^{0.15} \quad (4.23)$$

$$K_{ry} = 119,91 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

- 2) Визначаємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_{ry} = 1 - 0,26a_0, \quad (4.24)$$

$$k_{ry} = 0,73.$$

- 3) Обчислюємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\overline{K}_{ry} = K_{ry} \cdot k_{ry}(\omega), \quad (4.25)$$

$$\overline{K}_{ry} = 87,6 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

- 4) Допоміжний динамічний коефіцієнт демпфування визначаємо за формулою:

$$\tilde{c}_{ry} = \tilde{c}_{ry} \left( \frac{L}{B}; a_0 \right), \quad (4.26)$$

$$\tilde{c}_{ry} = 0,4.$$

- 5) Обчислюємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{ry} = (\rho V_{La} A_{by}) \tilde{c}_{ry}, \quad (4.27)$$

$$C_{ry} = 663,23 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

б) Визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C + \frac{2\bar{K}}{\omega} \beta_0, \quad (4.28)$$

$$Total C = 1170,49 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок коливання кручення.

1) Статичний коефіцієнт визначаємо за формулою 4.29:

$$K_t = 3,5GI_b^{0,75} \left(\frac{B}{L}\right)^{0,4} \left(\frac{I_b}{B^4}\right)^{0,2}, \quad (4.29)$$

$$K_t = 14,93 \cdot 10^8 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

2) Розраховуємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_t = 1 - 0,14a_0, \quad (4.30)$$

$$k_t = 0,85.$$

3) Визначаємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\bar{K}_t = K_t \cdot k_t(\omega), \quad (4.31)$$

$$\bar{K}_t = 12,76 \cdot 10^8 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

4) Допоміжний динамічний коефіцієнт демпфування обчислюємо за формулою:

$$\tilde{c}_t = \tilde{c}_t \left( \frac{L}{B}; a_0 \right) \quad (4.32)$$

$$\tilde{c}_t = 0,3$$

5) Визначаємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$c_t = (pV_{La}I_b)\tilde{c}_t, \quad (4.33)$$

$$c_t = 46,66 \cdot 10^5 \text{кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

6) Обчислюємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C + 2 \frac{\bar{K}}{\omega} \beta_0, \quad (4.34)$$

$$Total C = 120,57 \cdot 10^5 \text{кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

Вертикальний режим заглибленого фундаменту відносно осі Oz.

1) Статичний коефіцієнт розраховуємо за формулою 4.35:

$$K_{z,emb} = K_z [1 + (1/21)(D/B)(1 + 1,3\chi)] [1 + 0,2(A_w/A_b)^{2/3}], \quad (4.35)$$

$$K_{z,emb} = 11789,05 \cdot 10^3 \text{кН/м}.$$

- 2) Визначаємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_{z,emb} \cong k_z [1 - 0.09(D/B)^{3/4} a_0^2]; \quad (4.36)$$

$$k_{z,emb} = 0,87.$$

- 3) Обчислюємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\bar{K}_{z,emb} = K_{z,emb} \cdot k_{z,emb} (\omega), \quad (4.37)$$

$$\bar{K}_{z,emb} = 10,29 \cdot 10^6 \text{кН/м.}$$

- 4) Обчислюємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{z,emb} \cong C_z + \rho V_s A_w, \quad (4.38)$$

$$C_{z,emb} \cong 38,75 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м.}$$

- 5) Обчислюємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C_{emb} + 2 \frac{\bar{K}_{emb}}{\omega} \beta_0, \quad (4.39)$$

$$Total C = 44,70 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м.}$$

Розрахунок бічного горизонтального режиму заглибленого фундаменту (Oy)

1) Статичний коефіцієнт визначаємо за формулою 4.40:

$$K_{y,emb} = K_y \left[ 1 + 0,15 \left( \frac{D}{B} \right)^{0,5} \right] \cdot \{ 1 + 0,52 [(h/B)(A_w/L^2)]^{0,4} \}, \quad (4.40)$$

$$K_{y,emb} = 10814,03 \cdot 10^3 \text{ кН/м.}$$

2) Знаходимо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_{y,emb} = 1. \quad (4.41)$$

3) Визначаємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\bar{K}_{y,emb} = K_{y,emb} \cdot k_{y,emb}(\omega), \quad (4.42)$$

$$\bar{K}_{y,emb} = 10,81 \cdot 10^6 \text{ кН/м.}$$

4) Обчислюємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{y,emb} = C_y + 4\rho V_s B d + 4\rho V_{La} L d, \quad (4.43)$$

$$C_{y,emb} = 29,24 \cdot 10^4 \text{ кНс/м.}$$

5) Далі визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C_{emb} + 2 \frac{\bar{K}_{emb}}{\omega} \beta_0, \quad (4.44)$$



$$Total C = 35,49 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м}.$$

Розрахунок бічного горизонтального режиму заглибленого фундаменту відносно осі Oх:

- 1) Статичний коефіцієнт обчислюємо за формулою 4.45:

$$K_{x,emb} = K_x \cdot \left( \frac{K_{y,emb}}{K_y} \right), \quad (4.45)$$

$$K_{x,emb} = 10532,25 \cdot 10^3 \text{кН/м}.$$

- 2) Визначаємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_{x,emb} = 0,98. \quad (4.46)$$

- 3) Розраховуємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\bar{K}_{x,emb} = K_{x,emb} \cdot k_{x,emb} (\omega), \quad (4.47)$$

$$\bar{K}_{x,emb} = 10,32 \cdot 10^6 \text{кН/м}.$$

- 4) Далі визначаємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{x,emb} = C_x + 4\rho V_{La} B d + 4\rho V_s L d, \quad (4.48)$$

$$C_{x,emb} = 31,31 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м}.$$

5) Далі визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C_{emb} + 2 \frac{\overline{K_{emb}}}{\omega} \beta_0, \quad (4.49)$$

$$Total C = 37,28 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{с/м}.$$

Розрахунок режиму коливання навколо поздовжньої осі  $Ox$  заглибленого фундаменту ( $rOx$ )

1) Статичний коефіцієнт визначається за формулою 4.50:

$$K_{rx,emb} = K_{rx} \{1 + 1,26(d/B) \cdot [1 + (d/B)(d/D)^{-0,2}(B/L)^{0,5}]\}, \quad (4.50)$$

$$K_{rx,emb} = 97,47 \cdot 10^7 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

2) Визначаємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_{rx,emb} \cong k_{rx} = 0,79. \quad (4.51)$$

3) Обчислюємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\overline{K}_{rx,emb} = K_{rx,emb} \cdot k_{rx,emb} (\omega), \quad (4.52)$$

$$\overline{K}_{rx,emb} = 77,27 \cdot 10^7 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

4) Визначаємо допоміжний коефіцієнт

$$\eta_{rx} = 0,25 + 0,65 \sqrt{a_0} \cdot (d/D)^{-a_0/2} (D/B)^{-1/4}, \quad (4.53)$$

$$\eta_{rx} = 1,22.$$

5) Обчислюємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{rx,emb} = C_{rx} + \rho I_{bx} (d/B) \{V_{La} (d^2/B^2) + 3V_s + V_s (B/L) [1 + (d^2/B^2)]\} \cdot \eta_{rx}, \quad (4.54)$$

$$C_{rx,emb} = 844,95 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

6) Далі визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C_{emb} + 2 \frac{\overline{K_{emb}}}{\omega} \beta_0, \quad (4.55)$$

$$Total C = 1292,39 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок режиму коливання навколо поздовжньої осі Оу заглибленого фундаменту (rOy)

1) Статичний коефіцієнт обчислюємо за формулою 4.56:

$$K_{ry,emb} = K_{ry} \{1 + 0,92 (d/L)^{0,6} [1,5 + (d/L)^{1,9} (d/L)^{-0,6}]\}, \quad (4.56)$$

$$K_{ry,emb} = 178 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

2) Визначаємо допоміжний динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$k_{ry,emb} \cong k_{ry} = 0,73. \quad (4.57)$$

3) Розраховуємо динамічний коефіцієнт жорсткості:

$$\overline{K}_{ry,emb} = K_{ry,emb} \cdot k_{ry,emb} (\omega), \quad (4.58)$$

$$\overline{K}_{ry,emb} = 130,04 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

4) Обчислюємо допоміжний коефіцієнт:

$$\eta_{ry} = 0,25 + 0,65\sqrt{a_0} \cdot (d/D)^{-a_0/2} (D/L)^{-1/4}, \quad (4.59)$$

$$\eta_{rx} = 1,3.$$

5) Розраховуємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{ry,emb} = C_{rx} + \rho I_{by} (d/L) \{V_{La} (d^2/L^2) + 3V_s + V_s (L/B) [1 + (d^2/L^2)]\} \cdot \eta_{ry}, \quad (4.60)$$

$$C_{ry,emb} = 1205,29 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

6) Визначаємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C_{emb} + 2 \frac{\overline{K}_{emb}}{\omega} \beta_0, \quad (4.61)$$

$$Total C = 1958,29 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок коливання кручення заглибленого фундаменту

1) Статичний коефіцієнт визначаємо за формулою 4.57

$$K_{t,emb} = K_t \cdot \Gamma_w \cdot \Gamma_{tre}, \quad (4.62)$$

$$K_{t,emb} = 24,52 \cdot 10^8 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

2) Виконуємо допоміжні розрахунки:

а)

$$\Gamma_w = 1 + 0.4(D/d)^{0.5}(j_s/j_r)(B/D)^{0.6}, \quad (4.63)$$

$$\Gamma_w = 1,01.$$

б)

$$\Gamma_{tre} = 1 + 0.5(D/B)^{0.1}(B^4/I_b)^{0.13}, \quad (4.64)$$

$$\Gamma_{tre} = 1,61.$$

в)

$$j_s = (4/3)d(B^3 + L^3) + 4BLd(L + B), \quad (4.65)$$

$$j_s = 23461,2 \text{ м}^4.$$

г)

$$j_r = (4/3)BL(B^2 + L^2), \quad (4.66)$$

$$j_r = 1679616, \text{ м}^4.$$

д)

$$k_{r,emb} \cong k_{r,surface} = 0.85.$$

3) Визначаємо динамічний коефіцієнт ("пружини"):

$$\bar{K}_{t,emb} = K_{t,emb} \cdot k_{t,emb}(\omega), \quad (4.67)$$

$$\bar{K}_{t,emb} = 20.97 \cdot 10^8 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

4) Розраховуємо допоміжний коефіцієнт:

$$\eta_r \cong (d/D)^{-0.5} \cdot a_0^2 / [a_0^2 + (1/2)(L/B)^{-1.5}], \quad (4.68)$$

$$\eta_r \cong 0,76.$$

5) Визначаємо поглинаючий коефіцієнт демпфування:

$$C_{t,emb} = C_t + 4\rho d[(1/3)V_{La}(L^3 + B^3) + V_s BL(L + B)] \cdot \eta_r, \quad (4.69)$$

$$C_{t,emb} = 153,09 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

6) Далі обчислюємо загальний коефіцієнт демпфування:

$$Total C = radiation C_{emb} + 2 \frac{\overline{K_{emb}}}{\omega} \beta_0, \quad (4.70)$$

$$Total C = 274,5 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}.$$

Формули для знаходження еквівалентних жорсткостей ґрунтової основи і коефіцієнтів втрат енергії прямокутного фундаменту за методикою Бірбрасра наведено в таблиці 1.2.

Нижче представлений розрахунок коефіцієнтів жорсткості та демпфування за методикою Бірбраєра. Необхідні вихідні дані наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

**Вихідні дані:**

№	Назва	Показник	Значення	Од. вим.
1	Довжина будівлі	$L$	24	м
2	Ширина будівлі	$B$	18	м
3	Щільність ґрунту	$\rho$	1,6	т/м <sup>3</sup>
4	Швидкість поперечної хвилі	$V_s$	300	м/с
5	Коефіцієнт Пуассона	$\nu$	0.35	
6	Модуль зсуву	$G_{max}$	144000	кПа
7	Момент інерції споруди відносно горизонтальної осі коливання, що проходить через центр основи	$I_{0m}$	76701572.3	кг·м <sup>2</sup>
8	Полярний момент інерції споруди щодо вертикальної осі симетрії	$I_{\psi m}$	128168309.8	кг·м <sup>2</sup>
9	Відстань від центра ваги споруди до фундаменту	$d$	5.28	м
10	Маса споруди	$m$	848924.8	кг

Розрахунок еквівалентних жорсткостей:

- 1) Горизонтальний динамічний коефіцієнт розраховуємо за формулою:

$$K_x = 2(1 + \nu)G\beta_x\sqrt{BL}, \quad (4.71)$$

$$K_x = 8081056247.8, \text{ Н/м.}$$

- 2) Визначаємо вертикальний динамічний коефіцієнт:

$$K_z = \frac{G}{1 - \nu}\beta_z\sqrt{BL}, \quad (4.72)$$

$$K_z = 9209180909.2, \text{ Н/м.}$$

3) Динамічний коефіцієнт хитання у вертикальній площині обчислюємо за формулою:

$$K_{\phi} = \frac{G}{1-\nu} \beta_{\phi} B L^2, \quad (4.73)$$

$$K_{\phi} = 1033609846153.9, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

4) Динамічний коефіцієнт повороту у горизонтальній площині визначаємо за формулою:

$$K_{\psi} = \frac{16}{3} G R^3, \quad (4.74)$$

$$K_{\psi} = 1322346403518.4, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахунок еквівалентних затухань:

1) Горизонтальний коефіцієнт демпфування визначаємо за формулою:

$$b_x = 0.576 K_x R \sqrt{\frac{\rho}{G}}, \quad (4.75)$$

$$b_x = 181989531.8, \text{ Нс/м}.$$

2) Розраховуємо вертикальний коефіцієнт демпфування:

$$b_z = 0.85 K_z R \sqrt{\frac{\rho}{G}}, \quad (4.76)$$

$$b_z = 306052353.5.$$



3) Коефіцієнт демпфування хитання в вертикальній площині визначаємо за формулою:

$$b_{\phi} = \frac{0.3}{1+B_{\phi}} K_{\phi} R \sqrt{\frac{\rho}{G}}, \quad (4.77)$$

$$b_{\phi} = 12735226752.5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}.$$

4) Коефіцієнт демпфування повороту в горизонтальній площині обчислюємо за формулою:

$$b_{\psi} = \frac{1}{1+B_{\psi}} \sqrt{K_{\psi} I_{\psi}}, \quad (4.78)$$

$$b_{\psi} = 7900977868 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}.$$

#### **4.2.3 Розробка та верифікація динамічної моделі досліджуваної будівлі.**

Для опису динамічної поведінки будівлі згідно з удосконаленим методом і літературними джерелами [7, 8, 24, 59, 83] була обрана розрахункова схема у вигляді багатомасової пружно-деформованої перехресної системи із зосередженими у вузлах масами, розташованими на рівні перекриттів.

Наведена модель досліджуваної будівлі являє собою раму із зосередженими масами у вузлах, що складається з двох стержнів, з'єднаних горизонтальними зв'язками для відображення залежності частин будівлі (рис. 4.3).

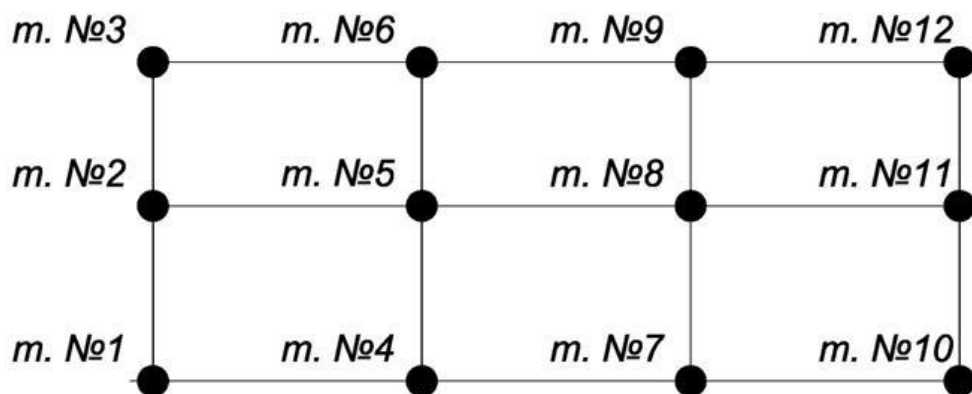


Рис. 4.3. Стрижнева розрахункова схема досліджуваної будівлі. Розріз

Таблиця 4.3

**Зосереджені вузлові маси досліджуваної будівлі**

№	позначення	Маса, <i>m</i>	позначення	Маса, <i>m</i>	позначення	Маса, <i>m</i>	позначення	Маса, <i>m</i>
1	м. №1	6,7	м. №4	15,8	м. №7	15,8	м. №10	27,9
2	м. №2	95,1	м. №5	118,1	м. №8	88,2	м. №11	62,9
3	м. №3	66,7	м. №6	91,5	м. №9	93,5	м. №12	53,9

Валідація пружно-деформованої перехресної системи із зосередженими у вузлах масами складалась із двох різних аналізів, а саме зі статичного, який визначає загальну масу конструкції, і модального, що визначає власні коливання конструкції з урахуванням приєднаних фіктивних мас від тривалих навантажень.

Кількість визначених власних форм коливань визначалась, виходячи з нормативних документів [24], за умови, що сума модальних мас складає не менше 85 % повної суми модальних мас при коливаннях будівлі в горизонтальному напрямку і не менше 75 % цієї суми при коливаннях у вертикальному напрямку.

Перші три форми відповідають повздовжньому, поперечному та крутильному коливанням.

Порівняння епюр і власних частот головних форм коливань СЕ моделі та системи із зосередженими у вузлах масами наведені нижче (таблиці 4.4 та 4.5).

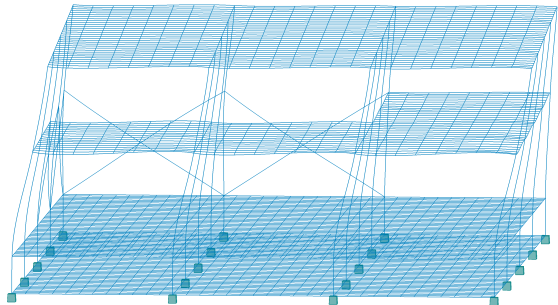
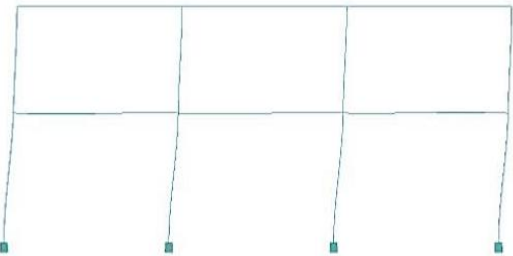
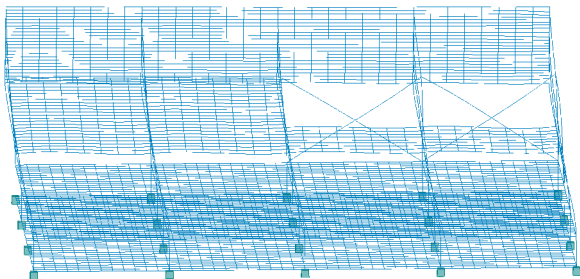
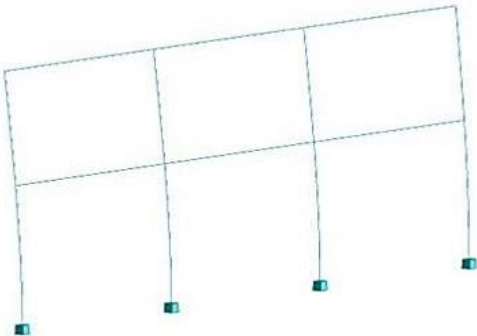
Таблиця 4.4

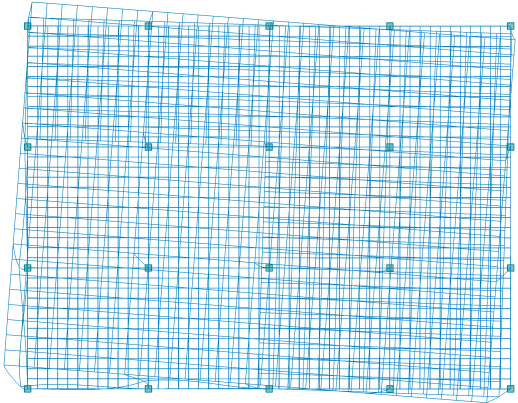

### Порівняння власних частот головних форм коливань

Тип моделі	Частота (Гц) головних форм коливань		
	Форма 1	Форма 2	Форма 3
КЕ модель	1,86	2,39	3,18
Модель із зосередженими у вузлах масами	1,84	2,43	3,19

Таблиця 4.5

### Порівняння головних форм коливань

Скінченно-елементна модель	Динамічна модель (модель із зосередженими у вузлах масами)
1 форма	
	
2 форма	
	

Скінченно-елементна модель	Динамічна модель (модель із зосередженими у вузлах масами)
3 форма	
	

Як бачимо з таблиці 4.4 та 4.5, модель із зосередженими масами у вузлах відповідає за частотами і формами коливань СЕ моделі досліджуваної будівлі. Аналіз результатів показує належну збіжність отриманих даних, похибка становить не більше 2 %.

Для подальшого аналізу проводиться накладання отриманих еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи на розроблену динамічну модель будівлі, яка еквівалентна за масою і частотою тривимірній СЕ системі (розрахунковій схемі конструкції).

Для верифікації динамічної моделі з накладеними в рівні підшви фундаменту отриманими еквівалентними динамічними параметрами ґрунтової основи був зроблений порівняльний аналіз власних частот перших трьох форм коливань, які, як правило, найбільш якісно характеризують динамічну поведінку будівлі, отриманих за результатами чисельних та натурних досліджень.

Визначення власних частот динамічної моделі в системі "основа – фундамент – споруда" було здійснено за допомогою модального аналізу динамічної розрахункової схеми досліджуваної будівлі.

Для визначення власних частот досліджуваної будівлі за даними натурального експерименту була зроблена вибірка із записаних впливів (рис. 4.4), де не виникало ніяких збурень (фоновий шум).

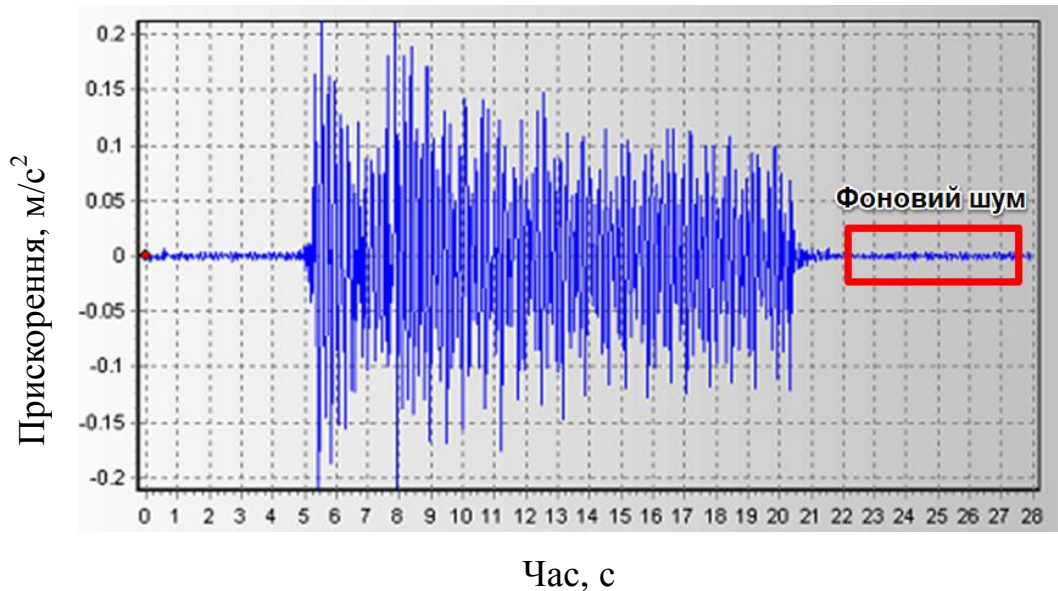


Рис. 4.4. Запис динамічного впливу, що містить фоновий шум

Складання спектра характеристичних частот досліджуваної будівлі виконувалось за допомогою перетворення Фур'є, яке є основним аналітичним інструментом для вирішення різних завдань в обробці сигналу, оскільки ряд Фур'є дає можливість опису будь-якої періодичної функції з використанням часової або частотної області.

Для ослаблення регулярних перешкод і зниження рівня випадкових перешкод був використаний метод групування, який являє собою усереднення значень спектрів Фур'є.

Після необхідних перетворень був побудований усереднений спектр Фур'є в діапазоні досліджуваних частот, що відповідає записаним впливам фонового шуму на відмітках досліджуваної будівлі.

Аналіз побудованого спектру Фур'є впливів фонового шуму на відмітках будівлі свідчить, що перший пік (1,56 Гц) відповідно до проведеного верифікаційного аналізу моделі ґрунтового масиву належить до

власної частоти ґрунтового середовища, тоді як три інші піки являють собою перші три власні частоти досліджуваної будівлі в системі "основа – фундамент – споруда".

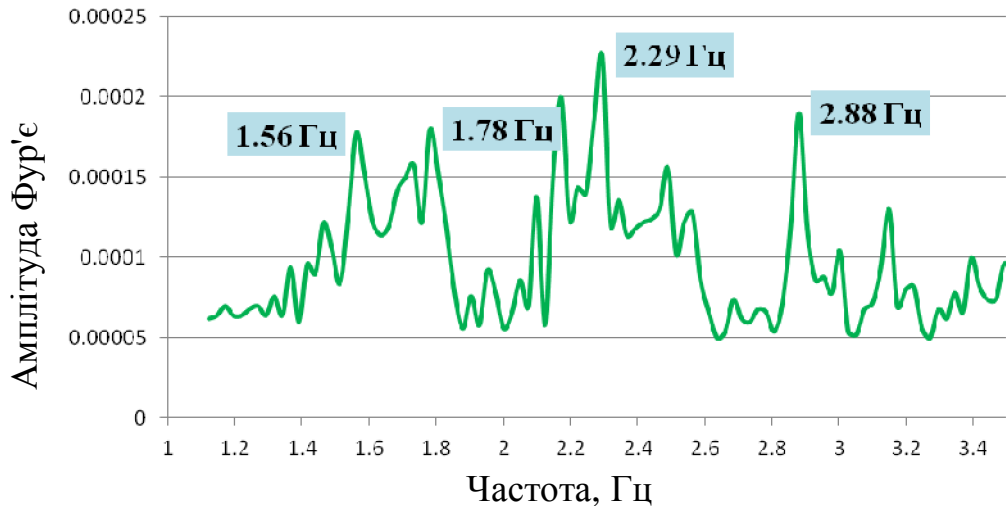


Рис. 4.5. Спектр Фур'є вплив фонового шуму на відмітках будівлі

За допомогою модального аналізу, який проводився в розрахунковому комплексі Robot, були отримані власні частоти коливань досліджуваної будівлі в системі "основа – фундамент – споруда".

Порівняння власних частот досліджуваної будівлі в системі "основа – фундамент – споруда", отриманих за результатами натурних та чисельних досліджень, представлені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

#### Порівняння власних частот головних форм коливань

Тип дослідження	Частота (Гц) власних форм коливань		
	Форма 1	Форма 2	Форма 3
Польовий експеримент	1,78	2,29	2,88
Динамічна модель	1,81	2,35	3,01

Аналіз отриманих результатів свідчить про належну збіжність натурних та чисельних досліджень. Похибка становить не більше 5 %.

#### **4.2.4 Розрахунок системи "основа – фундамент – споруда" за удосконаленим методом. Аналіз результатів.**

У даному розділі представлені результати розрахунку досліджуваної будівлі удосконаленим методом аналізу взаємодії системи "основа – фундамент – споруда" з використанням еквівалентних параметрів ґрунтової основи за методикою проф. Бірбраєра та методикою проф. Дж. Газетаса.

Для отримання розрахункових акселерограм був проведений аналіз взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда". Він проводився шляхом накладення отриманих еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи на розроблену динамічну модель досліджуваної будівлі, що еквівалентна за масою і частотою реальній розглянутій системі (розрахунковій схемі конструкції), і отримання відкоригованого сейсмічного впливу для даної системи на рівні підшви фундаменту конструкції.

Розрахунок скінченно-елементної моделі проводився шляхом прямого динамічного аналізу в розрахунковому комплексі Robot. Для цього до моделі прикладалися динамічні навантаження, що моделюють сейсмічну дію заданої інтенсивності у трьох напрямках ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Вихідними даними були акселерограми в рівні підшви фундаменту з урахуванням взаємодії споруди та ґрунтової основи, які були отримані на етапі розрахунку динамічної моделі будівлі з накладеними еквівалентними динамічними параметрами ґрунтової основи.

У результаті розрахунку були отримані кінематичні параметри (переміщення, швидкості, прискорення) в контрольних точках будівлі.

Порівняння результатів проводилось за максимальним значенням амплітуд прискорень у контрольних точках і порівнювались спектри Фур'є отриманих записів.

Порівняння максимальних значень амплітуд прискорень натурних та чисельних досліджень у контрольних точках при моделювання ґрунтової основи за методикою проф. Газетаса наведено в таблицях 4.7 – 4.8.

Результати представлені у вигляді максимальних прискорень та графіків залежності прискорень від часу для головних контрольних точок будівлі.

Таблиця 4.7

**Порівняння натурних досліджень з чисельними дослідженнями.**

**Контрольна точка №4**

Напрямок руху	Натурні дослідження м/с <sup>2</sup>	Чисельні дослідження, м/с <sup>2</sup>	Різниця, %
E	0,055	0,068	23,6
N	0,042	0,054	28,5
Z	0,041	0,038	7,8

Таблиця 4.8

**Порівняння натурних досліджень з чисельними дослідженнями.**

**Контрольна точка №6**

Напрямок руху	Натурні дослідження м/с <sup>2</sup>	Чисельні дослідження, м/с <sup>2</sup>	Різниця, %
E	0,026	0,03	15,4
N	0,022	0,025	13,6
Z	0,038	0,036	5,5

При порівнянні максимальних амплітуд натурних і чисельних досліджень (моделювання ґрунтової основи за методикою Газетаса) записів зареєстрованих у контрольних точках встановлено:

– максимальна різниця в амплітудах в контрольній точці 4 зареєстрована в горизонтальному напрямку N і становить 28,5 %. У вертикальному напрямку зареєстрована найменша різниця між результатами чисельних і натурних досліджень;



– у контрольній точці №6 різниця максимальних амплітуд у горизонтальних напрямках між чисельними та натурними дослідженнями приблизно однакова та становить 15,4 і 13,6 %.

Порівняння максимальних значень амплітуд прискорень в контрольних точках при моделювання ґрунтової основи за методикою Бірбраєра представлено в таблицях 4.9 – 4.10.

*Таблиця 4.9*

**Порівняння натурних досліджень з чисельними дослідженнями.**

**Контрольна точка №4**

Напрямок руху	Натурні дослідження м/с <sup>2</sup>	Чисельні дослідження, м/с <sup>2</sup>	Різниця, %
E	0,055	0,071	29
N	0,042	0,0580	38
Z	0,041	0,0435	6,01

*Таблиця 4.10*

**Порівняння натурних досліджень з чисельними дослідженнями.**

**Контрольна точка №6**

Напрямок руху	Натурні дослідження м/с <sup>2</sup>	Чисельні дослідження, м/с <sup>2</sup>	Різниця, %
E	0,026	0,03	15,38
N	0,022	0,028	27,2
Z	0,038	0,039	2,6

При порівнянні максимальних амплітуд натурних і чисельних досліджень (моделювання ґрунтової основи за методикою Бірбраєра) записів, зареєстрованих у контрольних точках виявлено, що максимальна різниця амплітуд у контрольній точці 4 зареєстрована в горизонтальному напрямку N та становить 38 %. У вертикальному напрямку зареєстрована найменша різниця між результатами чисельних і натурних досліджень, яка становить 6 %.

У результаті порівняння максимальних амплітуд коливань чисельних показників і даних експериментального польового дослідження виявлено, що при використанні удосконаленого методу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" з урахуванням обчислення еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи за методикою Газетаса різниця в результатах не перевищує 28,5 %. Водночас при використанні методики розрахунку еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи проф. Бірбраєра А. Н. максимальна різниця в результатах становить 38 %.

За результатами проведених досліджень отримано краще узгодження методики Газетаса з даними експериментальних польових досліджень, тому проводився їх подальший аналіз і порівняння результатів у частотній області з використанням спектрів Фур'є. Порівняння спектрів Фур'є відбувалось по контрольній точці № 4.

На рисунку 4.6 наведений спектр Фур'є запису впливу в контрольній точці на поверхні ґрунтової основи в напрямку Е.

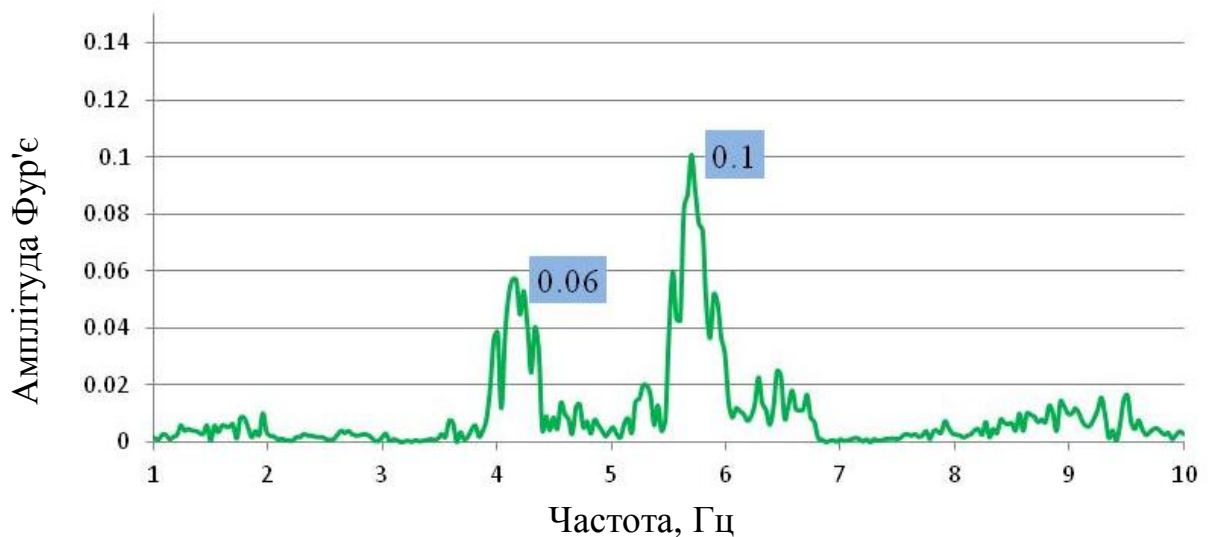


Рис. 4.6. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований у контрольній точці на відмітці будівлі у напрямку Е (натурні дослідження)

Представлений спектр має два виражених піки на частотах приблизно 4,1 і 5,7 Гц, що пояснюється наявністю в коливальному процесі декількох

регулярних складових із різними частотами (частота динамічного впливу й частота екскаватора). Максимальна амплітуда Фур'є по даному напрямку знаходиться на частоті 5,7 Гц із показником амплітуди 0,1.

На рисунку 4.7 представлений спектр Фур'є, отриманий в результаті чисельних досліджень на відмітці будівлі в напрямку Е.



Рис. 4.7. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований у контрольній точці на відмітці будівлі у напрямку Е (чисельні дослідження)

Максимальна амплітуда зображеного спектру горизонтальної складової не перевищує показник 0,13 м/с, що на 30 % більше порівняно з натурними дослідженнями в тому ж напрямку. Збільшення результатів відносно натурального дослідження пояснюється консерватизмом використовуваної методики розрахунку коефіцієнтів жорсткості та демпфування. Порівнюючи дані графіки, слід відзначити, що показники максимальних амплітуд при натурних і числових випробуваннях знаходяться приблизно на однакових частотних діапазонах.

Подібність результатів чисельного дослідження у вигляді спектрів Фур'є горизонтальної складової результатам натурального експерименту вказує на коректність розрахунку.

На рисунку 4.8 зображений спектр Фур'є запису впливу на відмітці досліджуваної будівлі, який був отриманий у результаті повномасштабного дослідження в напрямку N. Для наведеного спектру в горизонтальному напрямку характерна присутність двох піків на частотах приблизно 3,8 і 6 Гц, які по амплітуді коливання мають значення 0,05 і 0,08 м/с відповідно. Максимальна амплітуда даного спектра рознесена в широкій частотній смузі (5,5...6,2 Гц).

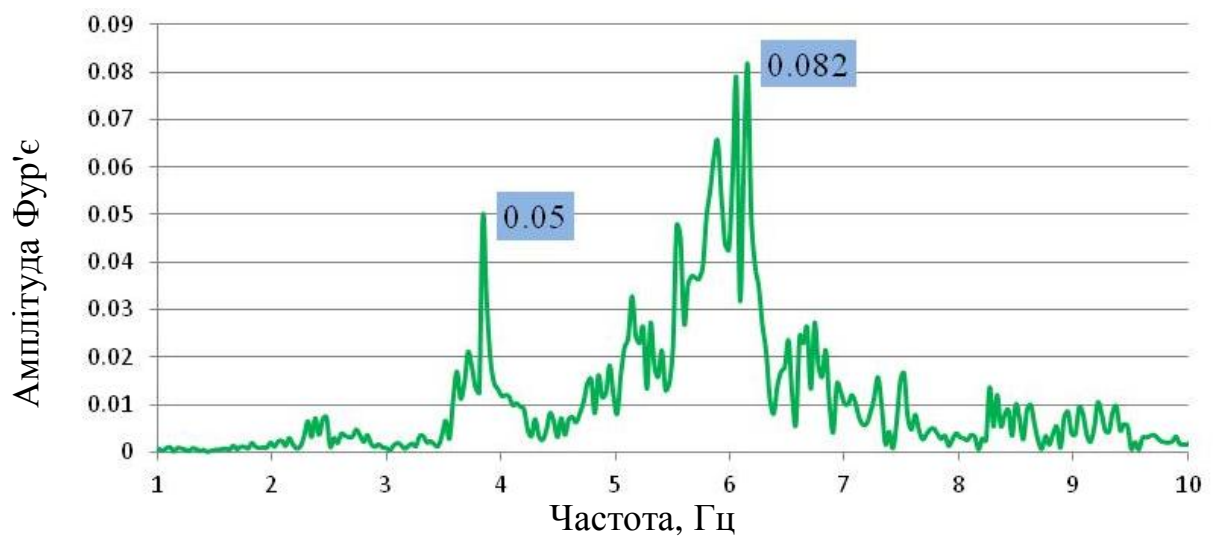


Рис. 4.8. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований у контрольній точці на відмітці будівлі у напрямку N (натурні дослідження)

На рисунку 4.9 приведений спектр Фур'є, отриманий в результаті чисельних досліджень в напрямку N. Як і в інших спектрах Фур'є, у ньому присутні два основних піки на частотах 4,2 і 5,7 Гц. Амплітуда Фур'є не перевищує показник 0,11 м/с, що на 35 % більше за показники натурних досліджень у тому ж напрямку. У проміжку між піками розташований енергонасичений діапазон із різким збільшенням до піку на частоті 4,6 Гц.

На рисунку 4.10 представлений спектр Фур'є запису впливу на відмітці досліджуваної будівлі, отриманий за результатами натурних досліджень. Для спектру Фур'є запису впливу у вертикальному напрямку

(напрямку Z) характерна присутність двох піків на частоті 4,0 і 5,7, які по амплітуді коливання мають значення 0,05 і 0,09.

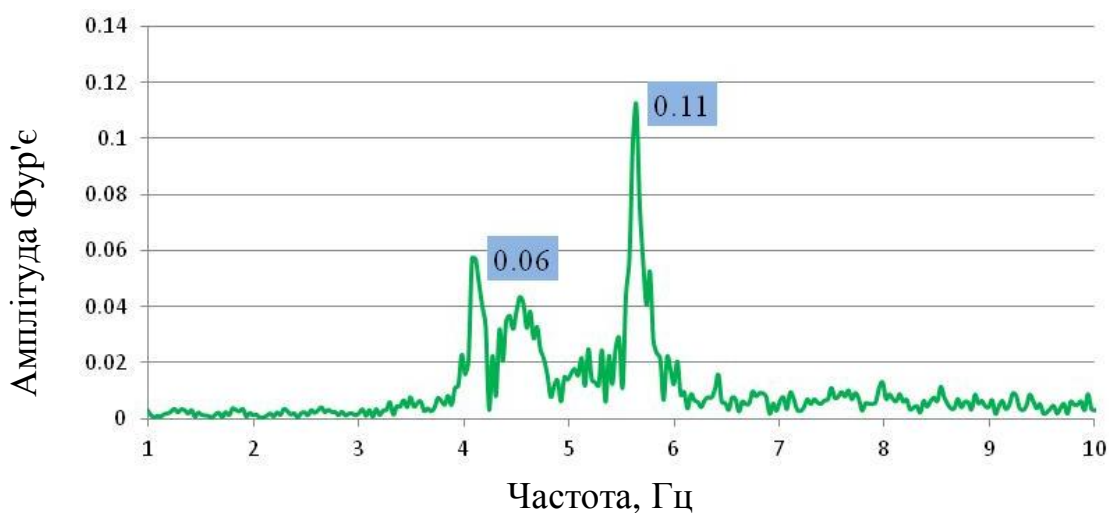


Рис. 4.9. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований у контрольній точці на відмітці будівлі у напрямку N (чисельні дослідження)

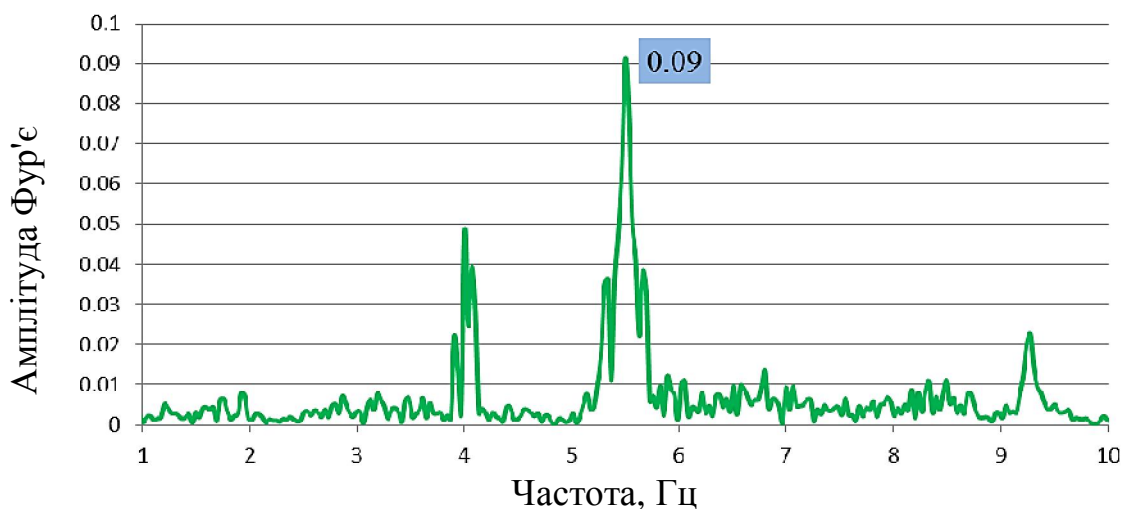


Рис. 4.10. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований у контрольній точці на відмітці будівлі у напрямку Z (натурні дослідження)

На рисунку 4.11 зображений спектр Фур'є, отриманий в результаті чисельних досліджень. У даному спектрі присутні два основних піки на частотах 4,2 і 5,7 Гц.

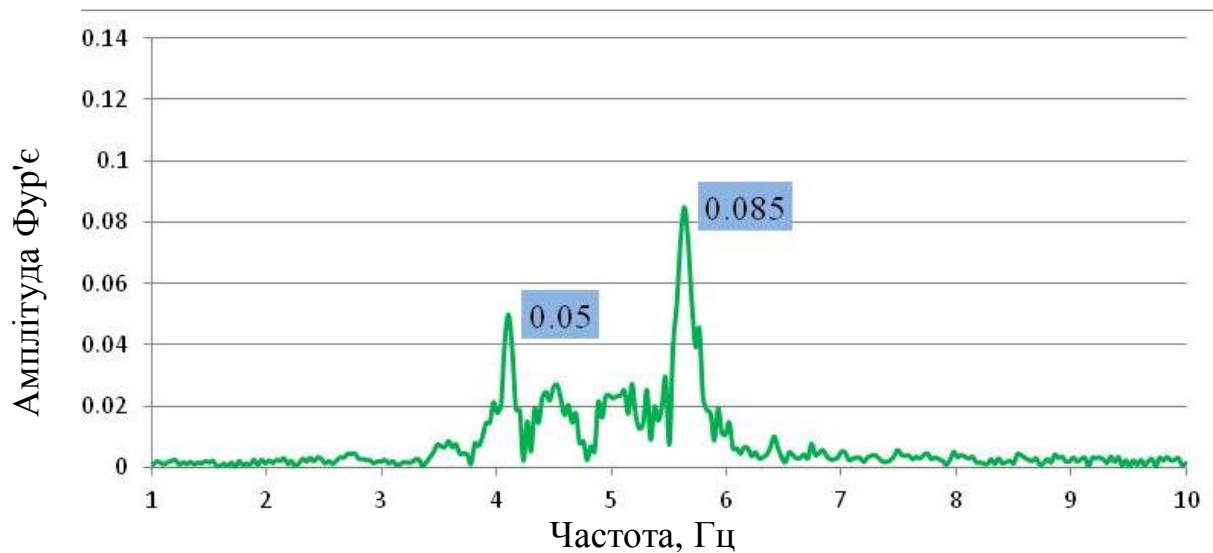


Рис. 4.11. Спектр Фур'є запису, що зареєстрований в контрольній точці на відмітці будівлі у напрямку Z (чисельні дослідження)

Із проведеного аналізу спектрів Фур'є зареєстрованих впливів у контрольних точках, отриманих за результатами чисельних та натурних досліджень, зроблені такі висновки:

- отримані результати чисельних досліджень в горизонтальному напрямку перевищують за амплітудою результати натурних досліджень, що пояснюється консерватизмом використовуваної методики розрахунку коефіцієнтів жорсткості та демпфування в горизонтальному напрямку. Погрішність в максимальних амплітудах не перевищує 35 %;

- максимальні амплітуди спектрів Фур'є у вертикальному напрямку, отриманих за результатами чисельних досліджень, менші на 5,5 % порівняно з натурними дослідженнями;

- максимальні амплітуди при порівнянні натурних та числових досліджень знаходяться приблизно на однакових частотних діапазонах;

- у всіх представлених спектрах Фур'є записів, зареєстрованих у контрольних точках на відмітки будівлі, присутні два яскраво виражених піки на частотах приблизно 4 і 5,7 Гц.

У результаті порівняння спектрів Фур'є контрольних точок, побудованих за результатами експериментального та чисельного досліджень, виявлено, що спектри Фур'є досить близькі у всіх контурних точках. Похибка в максимальних амплітудах не перевищує 35 %.

#### **4.3 Прямий метод взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда". Аналіз результатів**

Чисельне моделювання поведінки ґрунтового масиву проводилось із використанням в'язко-пружної моделі в розрахунковому комплексі Ansys. Дослідження проводились у тривимірній постановці з урахуванням реального нашарування ґрунтів основи, на якій знаходиться досліджувана будівля.

У якості вихідних даних використовувалось динамічне навантаження довжиною 15 с., яке прикладалось у точці фізичного прикладання навантаження.

Чисельна модель включає в себе об'ємний ґрунтовий масив, досліджувану будівлю та елементи фундаменту (рис. 4.12). Габаритні розміри ґрунтового масиву були прийняті відповідно до рекомендацій [55], що відповідає 3 – 4 максимальним розмірам фундаменту. Також габаритні розміри повинні бути достатнього розміру, щоб відповідати умові неможливості повертання відбитих від границь хвиль у розрахункову зону. Для вивчення процесу коливань ґрунтового масиву та дослідження процесів взаємодії основи та споруди необхідно використовувати щільну сітку СЕ.

Для спрощення роботи з моделлю розробка скінченно-елементної моделі була поділена на такі етапи.

- 1) Розробка розрахункової моделі ґрунтового масиву та верифікація даної моделі.
- 2) Розробка розрахункової моделі досліджуваної будівлі й об'єднання з моделлю ґрунтового масиву. Верифікація моделі будівлі.

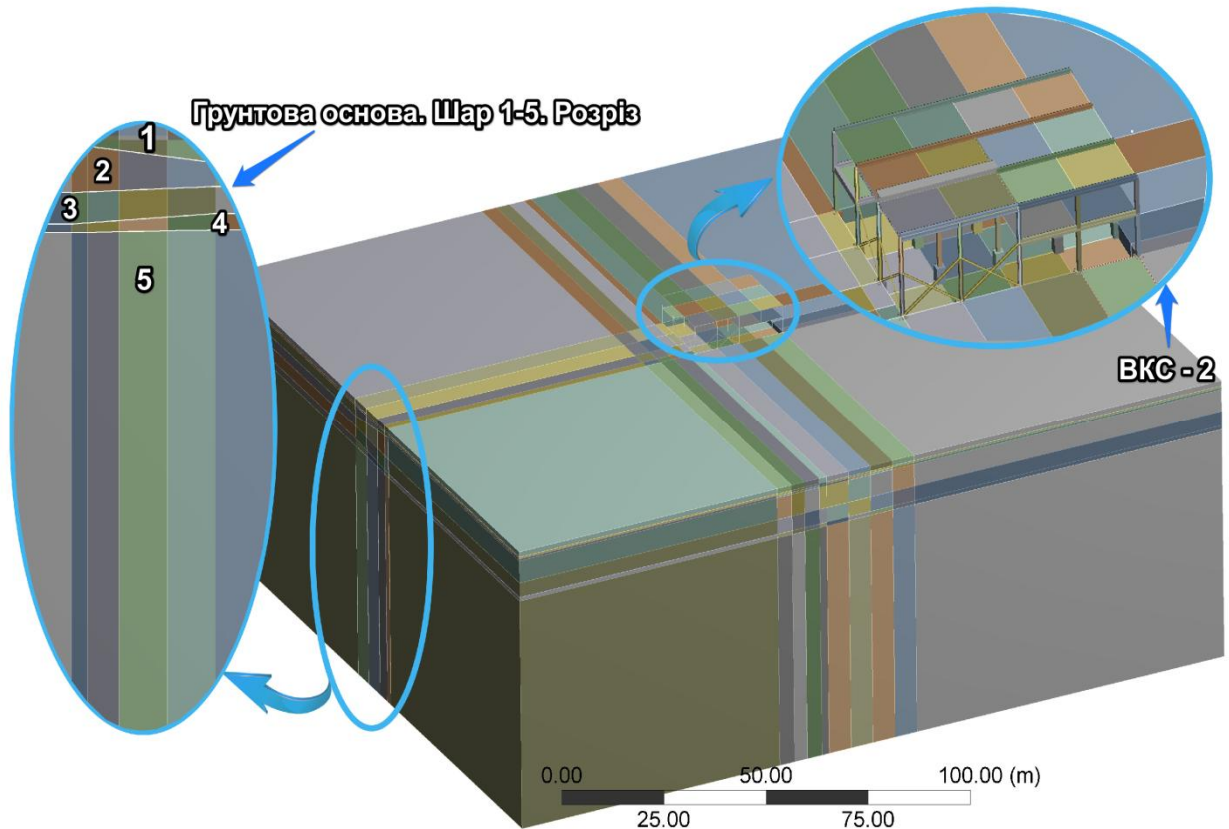


Рис. 4.12. Чисельна модель системи "основа – фундамент – споруда"

При розробці розрахункової моделі ґрунтового масиву та її верифікації, об'ємний ґрунтовий масив був побудований згідно з характеристиками майданчика досліджуваної будівлі. Ґрунтовий масив складається з 5 різних шарів ґрунту (рис. 4.12).

Для верифікації скінченно-елементної моделі ґрунтового масиву був зроблений порівняльний аналіз власної частоти масиву, отриманої за даними чисельного та натурного експерименту.

Визначення власної частоти скінченно-елементного ґрунтового масиву було здійснено за допомогою модального аналізу розрахункової схеми, який визначає власні коливання конструкції. Згідно з чисельними розрахунками, власна частота ґрунтового масиву складає 1,56 Гц (рис. 4.14).



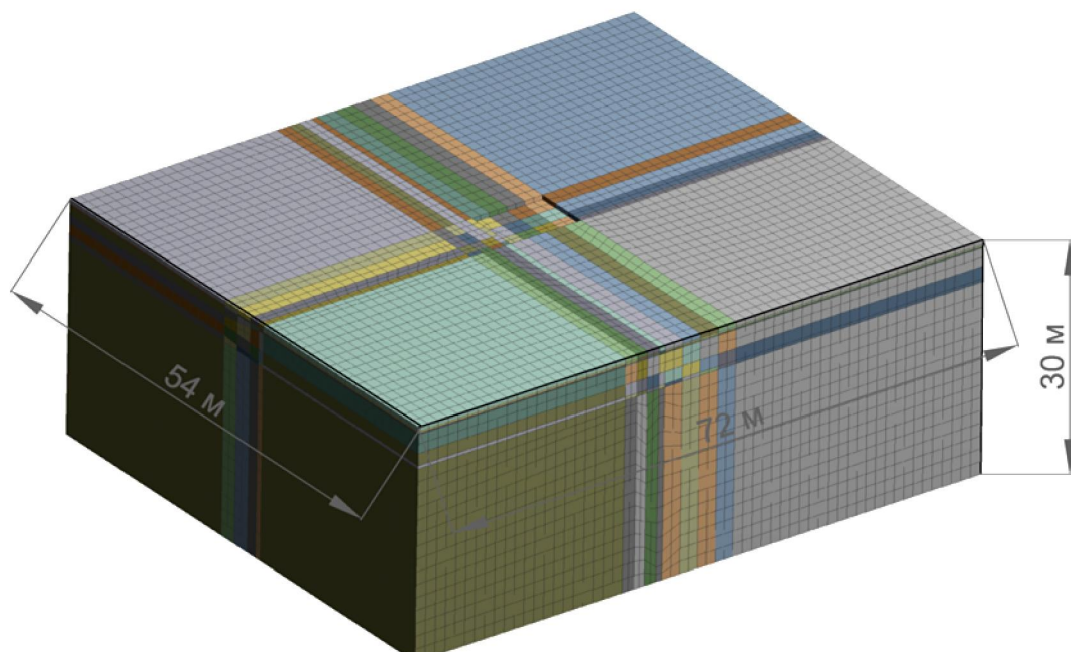


Рис. 4.13. Розрахункова модель ґрунтового масиву

Методика отримання власних частот будівлі аналогічна методиці верифікації динамічної моделі будівлі в системі "основа – фундамент – споруда".

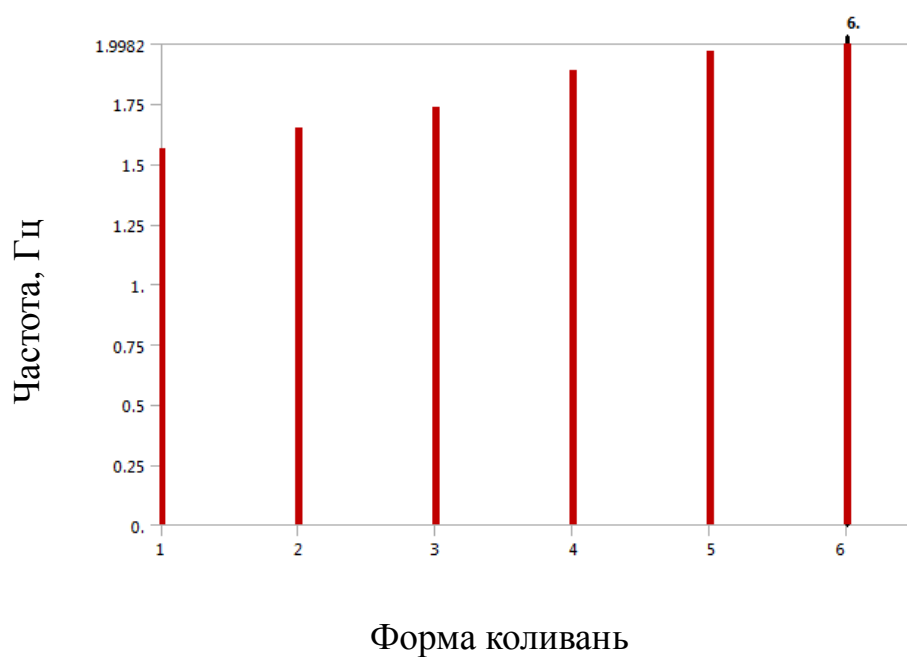


Рис. 4.14. Власні форми коливань ґрунтового масиву (наведено перші шість форм коливань)

Після необхідних перетворень був побудований усереднений спектр Фур'є в діапазоні досліджуваних частот, який відповідає записаним впливам фонового шуму на вільній поверхні ґрунтового масиву (рис. 4.15).

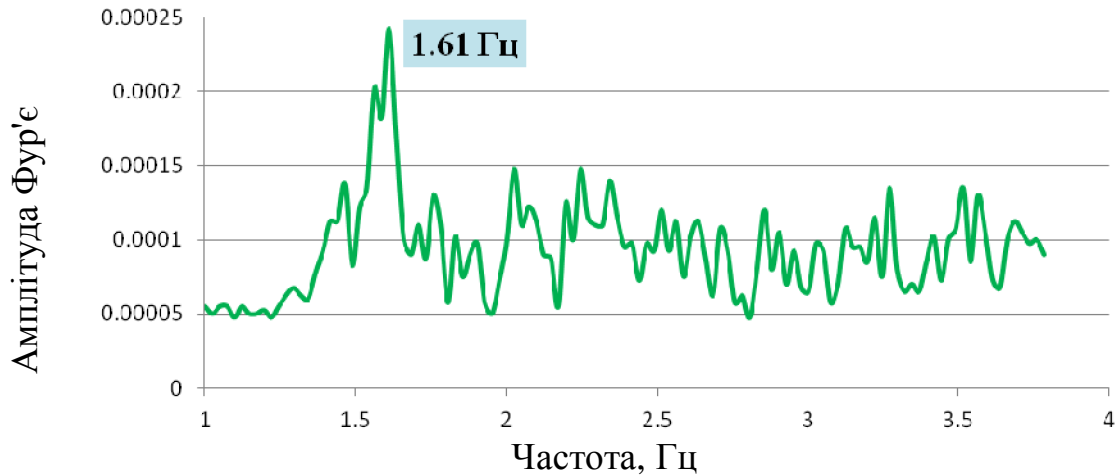


Рис. 4.15. Спектр Фур'є впливів фонового шуму на поверхні ґрунтового масиву

Також для верифікації чисельної моделі була визначена передаточна функція ґрунтового масиву. У даному випадку передаточна функція описує співвідношення між спектром реакції скальної основи та спектром реакції вільної поверхні ґрунту. Розрахунки виконувались із використанням програми Shake. В основу роботи програми покладено метод вирішення Канаї хвильового рівняння і алгоритми швидкого Фур'є-перетворення. У ході обчислень визначається частотна характеристика середовища для випадку нормального падіння плоскої поперечної хвилі на горизонтально-шарувату товщу.

Дана програма дозволяє здійснювати рішення як для випадку лінійного пружного середовища, так і враховувати непружні і нелінійні особливості поведінки ґрунтів. Для врахування особливостей нелінійного поведіння ґрунтів у програмі використовується еквівалентна лінійна модель. Еквівалентна лінійна модель основана на припущенні, що модуль зсуву і коефіцієнт загасання є функціями деформації зсуву. У програмі Shake

значення модуля зсуву і коефіцієнта загасання визначаються на підставі ітераційного процесу так, щоб вони відповідали рівням деформацій у кожному шарі. Залежності модуля зсуву і коефіцієнта загасання від деформації зсуву для кожного інженерно-геологічного елемента, що складає розріз, вибираються на підставі моделей, отриманих для різних порід.

На рисунку 4.16 представлена визначена передаточна функція ґрунтового середовища майданчика розташування досліджуваної будівлі.

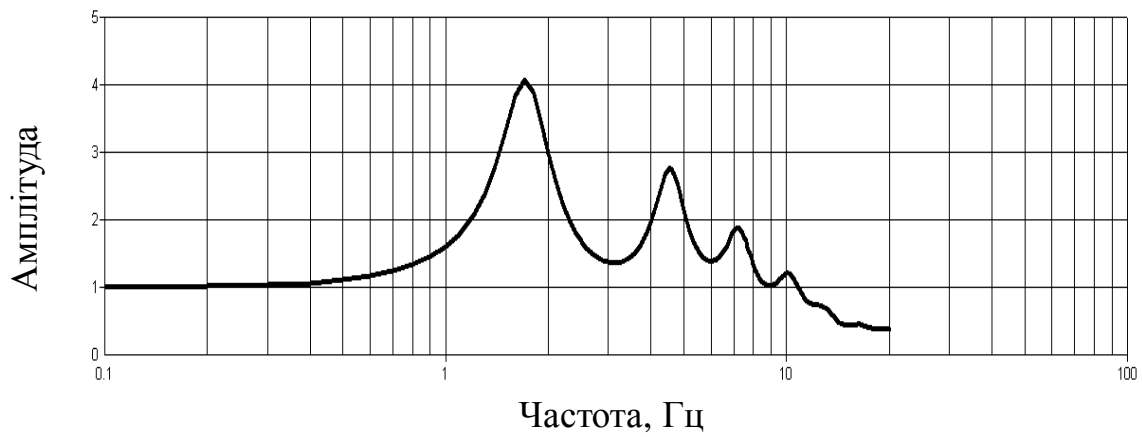


Рис. 4.16. Передаточна функція ґрунтового середовища досліджуваної будівлі

Аналіз побудованого спектру Фур'є та передаточної функції показує, що власна частота ґрунтового масиву лежить в області частот між 1,6...1,7 Гц, що узгоджується з чисельним дослідженням, де власна частота дорівнює 1,56 Гц.

Для верифікації скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі був проведений порівняльний аналіз власних частот будівлі, отриманих за даними чисельного та натурного експерименту.

На рис. 4.5 представлений усереднений спектр Фур'є в діапазоні досліджуваних частот, який відповідає записаним впливам фонового шуму на відмітках будівлі.

За допомогою модального аналізу в розрахунковому комплексі Ansys були отримані власні частоти досліджуваної будівлі.

Порівняння власних частот досліджуваної будівлі, отриманих за результатами натурального експерименту та чисельного дослідження, представлені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11

### Порівняння власних частот головних форм коливань

Тип дослідження	Частота власних форм коливань, Гц		
	Форма 1	Форма 2	Форма 3
Натурний експеримент	1,78	2,29	2,88
Чисельне дослідження. Розрахунковий комплекс Ansys	1,75	2,15	2,70

Аналіз отриманих результатів свідчить про належну збіжність натурних та чисельних досліджень. Похибка становить 6.1 %.

У результаті розрахунку були отримані кінематичні параметри (переміщення, швидкості, прискорення) у контрольних точках будівлі.

Таблиця 4.12

### Порівняння власних частот головних форм коливань

Контрольна точка №	Напрямок	Натурні дослідження, $m/c^2$	Чисельні дослідження. Ansys, $m/c^2$	Порівняння, %
4	E	0,055	0,061	10,9
	N	0,042	0,049	16,6
	Z	0,041	0,043	4,8
5	E	0,051	0,058	13.73
	N	0,039	0,045	15.38
	Z	0,04	0,042	5.00
6	E	0,026	0,028	7.69
	N	0,022	0,024	9.09
	Z	0,038	0,040	5.26
7	E	0,024	0,027	12.50
	N	0,019	0,022	15.79
	Z	0,038	0,040	5.26

У результаті порівняння максимальних амплітуд коливань чисельних даних і даних експериментального польового дослідження виявлено, що максимальна похибка складає 16,6 %.

Прямий динамічний метод взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" показує найбільшу збіжність результатів з експериментальними дослідженнями серед усіх розглянутих методів взаємодії ґрунтової основи зі спорудою, однак його використання є трудомістким з обчислювальної точки зору та вимагає вирішення ряду специфічних задач, таких як реалізації штучних меж, моделювання демпфування та ін.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1) Розроблено і програмно реалізовано динамічну модель досліджуваної будівлі, яка враховує в'язко-пружні властивості ґрунтової основи та представляє основні динамічні характеристики будівлі. Верифіковано динамічну модель досліджуваної будівлі за допомогою використання порівняльного аналізу власних частот перших трьох форм коливань, отриманих за результатами чисельних та натурних досліджень.

2) Виявлено, що при використанні удосконаленого методу взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" з урахуванням обчислення еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи за методикою проф. Дж. Газетаса різниця в результатах порівняно з даними натурального дослідження не перевищує 28,5 %, у той час при використанні методики проф. Бірбраера А. Н., максимальна різниця в результатах становить 38 %.

3) Встановлено, що спектри Фур'є, які були побудовані за результатами експериментального та чисельного дослідження (удосконалений метод), досить близькі в усіх контурних точках. Розбіжність в амплітудах не перевищує 35 %.

4) Виявлено, що при використанні скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі з урахуванням об'ємного ґрунтового масиву різниця у максимальних амплітудах коливань порівняно з натурними дослідженнями не перевищує 16,6%.

5) Встановлено, що використання скінченно-елементної моделі будівлі з урахуванням об'ємного ґрунтового масиву демонструє найбільшу збіжність результатів з експериментальними дослідженнями, однак являє собою складну комплексну задачу, що вимагає вирішення ряду специфічних завдань.

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Результати науково-дослідної роботи, а саме удосконалений метод розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" для конструкцій АЕС, були впроваджені в роботи з розрахунку кінематичних характеристик будівель і продовження ресурсу надійної експлуатації основних будівель і споруд таких атомних електростанцій:

- Запорізька атомна електростанція;
- Южно-українська атомна електростанція.

У даному розділі в якості прикладу представлені матеріали щодо отримання кінематичних параметрів і розрахунку сейсмостійкості будівлі реакторного відділення (РВ) Запорізької атомної електростанції (ЗАЕС) у системі "основа – фундамент – споруда". Розрахунки були зроблені в комплексі робіт і забезпечення сейсмостійкості елементів, систем і споруд, важливих для безпеки Запорізької атомної електростанції [47, 49, 50].

Для обґрунтування сейсмостійкості та розрахунку кінематичних параметрів будівель і споруд АЕС чеська компанія проводила дослідження взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" для будівель ЗАЕС. Зокрема проводились дослідження взаємодії ґрунтової основи зі спорудою для будівлі реакторного відділення. У результаті розрахунку були отримані спектри реакції на підшві фундаменту РВ з врахуванням взаємодій споруди з ґрунтовою основою [48].

В даному розділі наведено порівняння результатів взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" реакторного відділення, отриманих фахівцями чеської компанії, та результатів, отриманих за допомогою удосконаленого методу, який був представлений у даній науково-дослідній роботі.

Згідно з удосконаленим методом оцінка взаємодії ґрунтової основи з будівлею реакторного відділення (РВ) розділена на п'ять етапів.

- 1) Побудова скінченно-елементної моделі будівлі РВ.
- 2) Розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи.
- 3) Розробка динамічної моделі будівлі РВ.
- 4) Розрахунок динамічної моделі будівлі РВ з накладеними динамічними параметрами ґрунтової основи з метою отримання розрахункового впливу на рівні підшви фундаменту конструкції.
- 5) Розрахунок скінченно-елементної моделі будівлі РВ на сейсмічний вплив, який був отриманий на основі попередніх етапів.

Схема врахування динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" за удосконаленим методом для будівлі реакторного відділення представлена на рисунку 5.1.

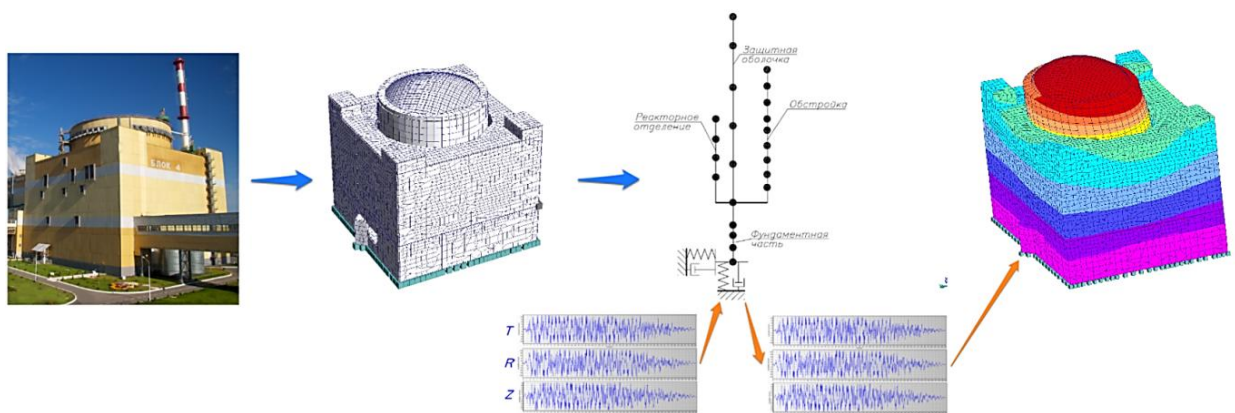


Рис. 5.1.Схема методу врахування динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" на прикладі реакторного відділення

У якості вихідних даних сейсмічного впливу використовуються розрахункові акселерограми на поверхні ґрунту.



## **5.1 Описання інтенсивності сейсмічного впливу**

Врахування впливу місцевих (локальних) умов на трансформацію сейсмічних коливань здійснювалось за результатами сейсмічного мікрорайонування. Сейсмічне мікрорайонування виконувалося для отримання уточнених даних про сейсмічну небезпеку майданчика ЗАЕС, параметрів проектного землетрусу (ПЗ) і максимального розрахункового землетрусу (МРЗ), пікових прискорень для ПЗ і МРЗ, розрахункових акселерограм на поверхні ґрунту (з метою подальшого проведення розрахунків поверхових спектрів, а також продовження ресурсу надійної експлуатації основних будівель і споруд ЗАЕС). Роботи із сейсмічного мікрорайонування виконувались комплексом методів:

- методом інженерно-геологічних аналогій;
- методом сейсмічних жорсткостей;
- розрахунковим методом.

Для розрахунку динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" будівлі реакторного відділення використовувались трикомпонентні акселерограми, які були отримані для максимального розрахункового землетрусу на вільній поверхні ґрунту [49].

## **5.2 Розробка скінченно-елементної та динамічної моделі досліджуваної будівлі**

Метод отримання поверхових спектрів у точках конструкції передбачає вирішення завдання обчислення історії зміни прискорень у цих точках. Це завдання вирішується шляхом побудови чисельної скінченно-елементної моделі споруди і подальшого її аналізу МСЕ шляхом прямого інтегрування рівнянь руху елементів чисельної моделі (прямий динамічний аналіз).

Чисельна модель являє собою будівлю реакторного відділення й елементи фундаменту. У якості основних джерел інформації, необхідних для побудови розрахункової скінченно-елементної моделі використовувалась технічна документація на будівельні конструкції. Фрагменти об'ємно-планувального рішення наведені на рисунку 5.2.

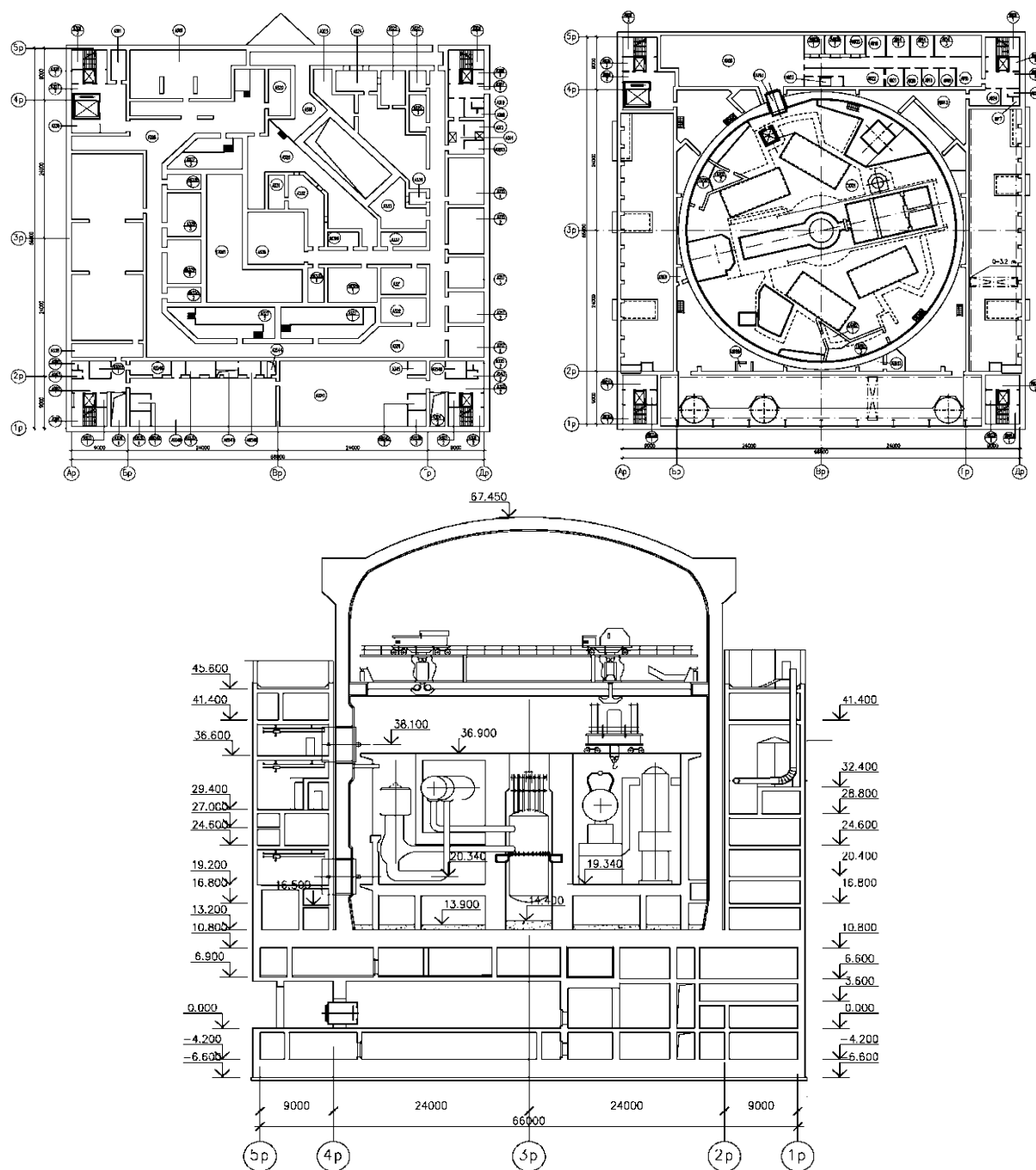


Рис. 5.2. Фрагмент об'ємно-планувального рішення:

а) план на відм. +6,600, б) план на відм. + 33,600; +36,600, в) розріз.

Побудова скінченно-елементної моделі проводилась у середовищі розрахункового комплексу Robot. Скінченно-елементна модель реакторного відділення представлена на рисунку 5.3.

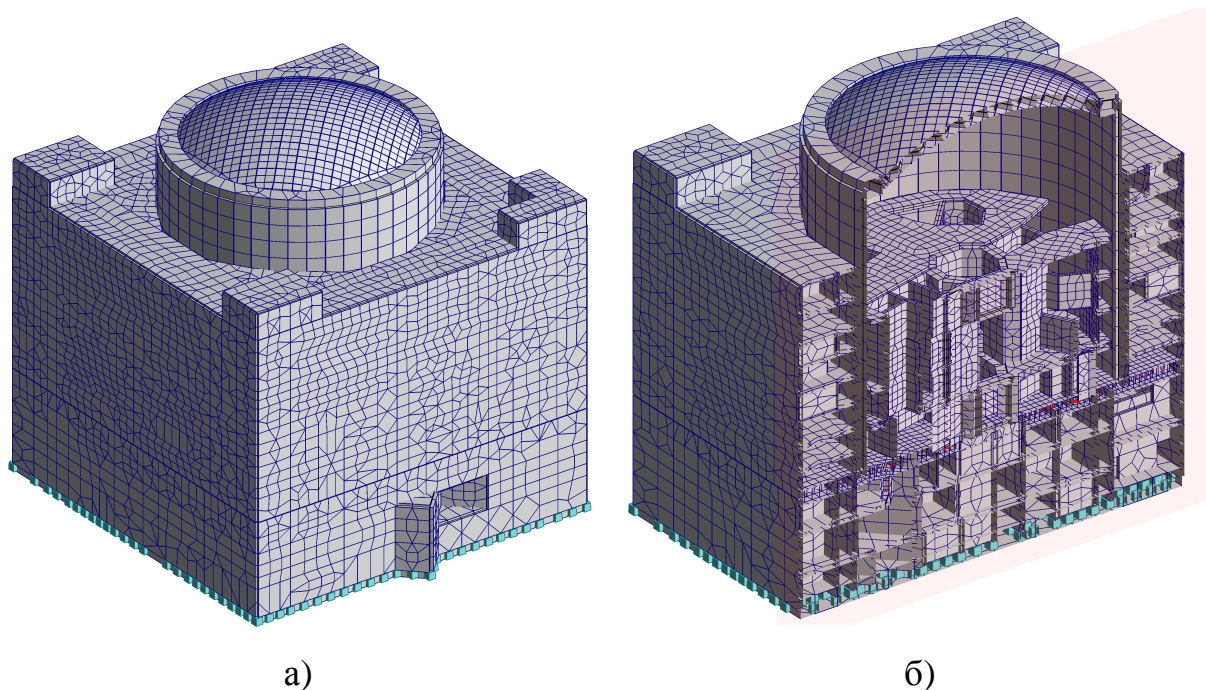


Рис. 5.3. Скінченно-елементна модель реакторного відділення:

а) загальний вигляд, б) розріз

Розробка динамічної моделі будівлі проводилась з метою отримання розрахункових впливів на рівні фундаменту споруди. Динамічна модель слугує для врахування взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" й отримання результуючих записів розрахункових впливів з врахуванням даних взаємодій.

Для збору мас, жорсткостей елементів і моделювання динамічної роботи досліджуваної споруди будівля реакторного відділення була умовно розділена на чотири частини: фундаментну частину, оббудову, захисну оболонку і герметичну зону (рис. 5.4).

У якості зосереджених мас, прикладених у рівні перекриттів, приймалися: маса самих перекриттів, маса обладнання, маса частини будівлі

між перекриттями і вертикальні статичні навантаження (сніг, технологічні і т.п.).

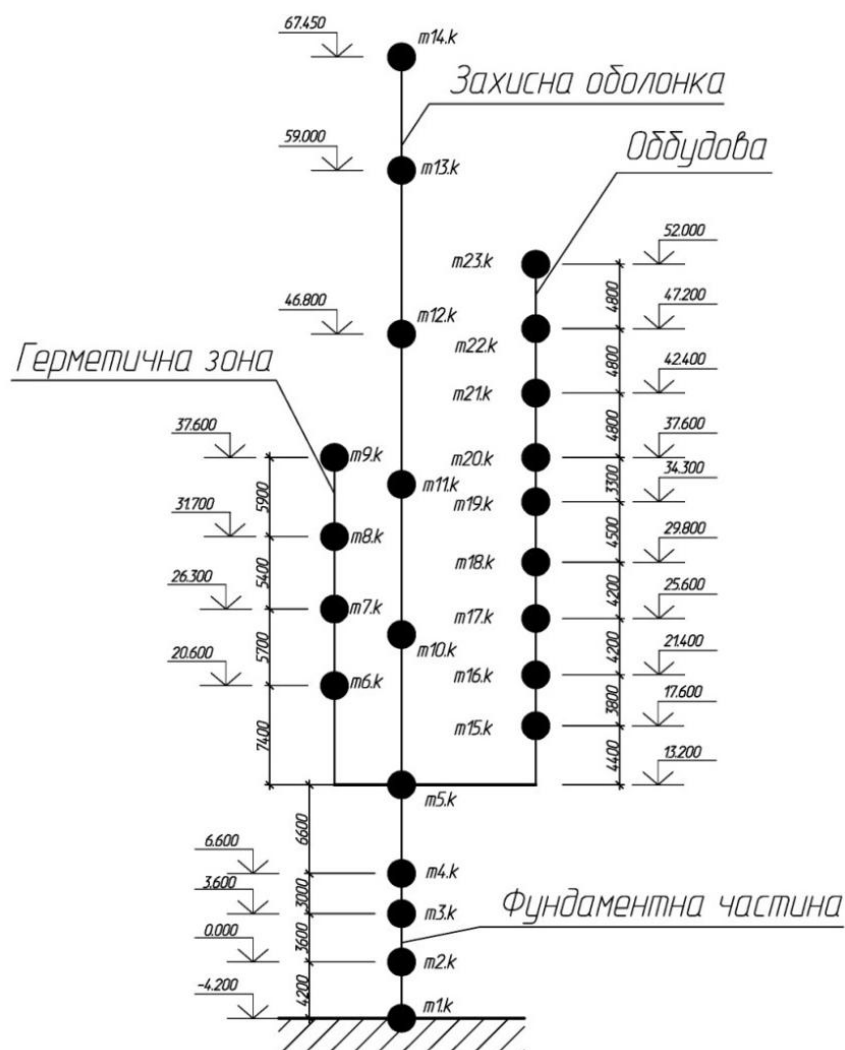


Рис. 5.4. Стрижнева розрахункова динамічна модель реакторного відділення

Валідація динамічної моделі будівлі реакторного відділення складається з двох різних аналізів, а саме із статичного аналізу та модального аналізу. Статичний аналіз визначає загальну масу досліджуваної споруди. Модальний аналіз визначає власні коливання споруди.

Отримані дані в подальшому порівнюються з результатами тривимірної скінченно-елементної моделі досліджуваної будівлі, яка була побудована на попередніх етапах.

### 5.3 Розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи

Так як до будівель і споруд АЕС застосовуються суворі вимоги щодо забезпечення міцності будівельних конструкцій, а також недопущення виходу з ладу і порушень функціонування технологічних систем, важливих для безпеки, розрахунок еквівалентних динамічних параметрів ґрунтової основи проводився з використанням більш консервативної методики, а саме методики Дж. Газетаса (Gazetas). Обчислення узагальнених характеристик ґрунтової основи проводилось із урахуванням особливостей масиву ґрунту (глибина закладення фундаменту і фізико-динамічні властивості ґрунту під подошвою фундаменту).

Еквівалентні динамічні параметри ґрунтової основи, які були розраховані методом Дж. Газетаса, наведені в таблиці 5.1.

Узагальнений інженерно-геологічний розріз промислового майданчика, на якому розташована будівля РВ, представлений у таблиці 5.2.

Таблиця 5.1

#### Еквівалентні динамічні параметри ґрунтової основи

Режим переміщення	Еквівалентні жорсткості	Еквівалентні затухання
Горизонтальний	$K_x = 29300000, \text{кН/м}$ $K_y = 29300000, \text{кН/м}$	$C_x = 2759900, \text{кНс/м}$ $C_y = 2759900, \text{кНс/м}$
Вертикальний	$K_z = 36200000, \text{кН/м}$	$C_z = 4255400, \text{кНс/м}$
Коливання в вертикальній площині	$K_t = 47284000000, \text{кНм}$	$C_t = 1030451000, \text{кНсм}$
Кручення	$K_{rx} = 28359500000, \text{кНм}$ $K_{ry} = 28359500000, \text{кНм}$	$C_{rx} = 741907200, \text{кНсм}$ $C_{ry} = 741907200, \text{кНсм}$

Для отримання розрахункового сейсмічного впливу був проведений аналіз взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда". Даний аналіз проводився шляхом об'єднання отриманих узагальнених параметрів ґрунтової основи та динамічної моделі будівлі, яка еквівалентна за масою і частотою реальній розглянутій системі (розрахунковій схемі конструкції), і отримання відкоригованого сейсмічного впливу для даної системи на рівні підшви фундаменту конструкції (рис. 5.5).

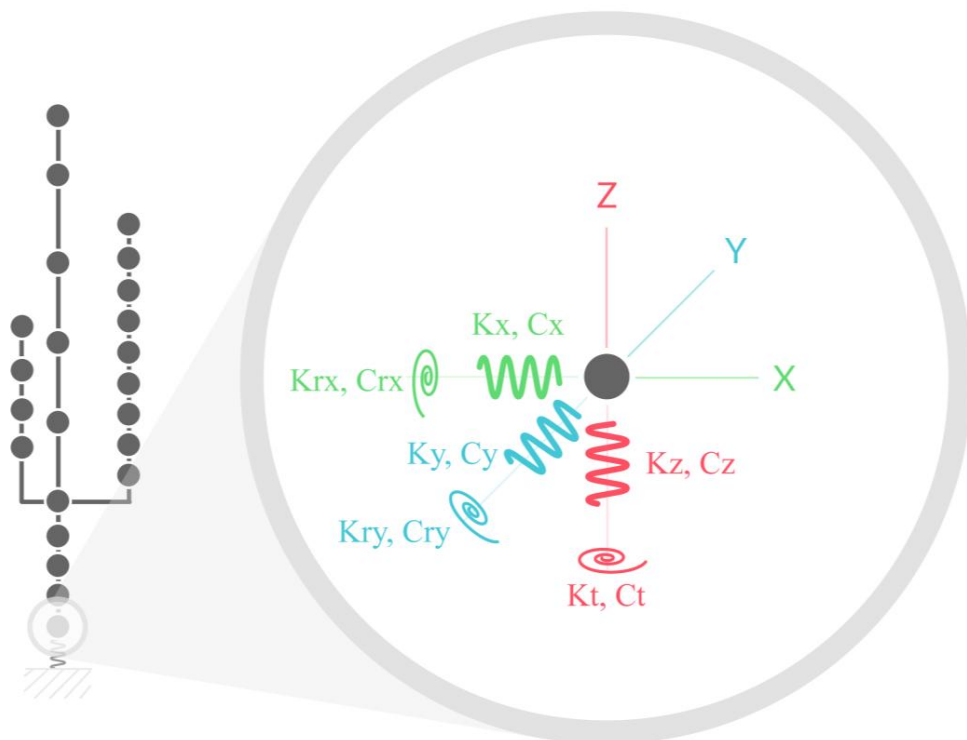


Рис. 5.5. Схема об'єднання еквівалентних параметрів ґрунтової основи та динамічної моделі

Розрахунок динамічної моделі будівлі реакторного відділення з накладеними в рівні підшви фундаменту коефіцієнтів жорсткості та демпфування проводився в розрахунковому комплексі Robot.

Таблиця 5.2

## Узагальнений інженерно-геологічний розріз промайданчика реакторного відділення

№ шару	Характеристика ґрунту	Глибина м / абс. відм., м		Міцність	Абс. позначка підлоги фундаменту	Розрахункові значення основних характеристик ґрунтів				
		від	до			$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\nu$	E, МПа	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с
1	Насипні ґрунти – пісок, дрібний, пухкий, маловологий	<u>0,0</u> 22	<u>4,8</u> 17,2	4,8		1,92	0,35	11,6	450	230
4	Піски дрібні, світло- і жовтувато-сірого кольору, вологі та водонасичені	<u>4,8</u> 17,2	<u>12,4</u> 9,6	7,6	15,2	1,95	0,31	30	880	300
7	Суглинки буро-жовті від твердої до м'якопластичної консистенції	<u>12,4</u> 9,6	<u>13,1</u> 8,9	0,7		2,02	0,35	20	985	385
4	Піски дрібні, світло- і жовтувато-сірого кольору, вологі та водонасичені	<u>13,1</u> 8,9	<u>18</u> 4	4,9		1,95	0,31	30	880	300
5	Піски середньої крупності, жовто-сірі водонасичені середньо-щільного і щільного складання	<u>18</u> 4	<u>23,4</u> -1,4	5,4		2,12	0,32	40	1240	435
4	Піски дрібні, світло- і жовтувато-сірого кольору, вологі та водонасичені	<u>23,4</u> -1,4	<u>31,7</u> -9,7	8,3		2,12	0,3	45	880	320
9	Глина зеленувато-сіра, темна тонкошарована, місцями опіщанена, від твердої до напівтвердої консистенції	31,7 -9,7	35,8 -13,8	4,1		1,91	0,42	20	1400	470

Розрахунок дозволив урахувати ефекти взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда", причому проходження сейсмічного впливу через стисливе середовище з урахуванням геофізичних умов майданчика враховувалось шляхом використання в якості вихідних даних сейсмічного впливу на рівні вільної поверхні.

#### 5.4 Розрахунок поперкових спектрів реакції та напружено-деформованого стану досліджуваної будівлі

Розрахунок скінченно-елементної моделі проводився шляхом прямого динамічного аналізу в розрахунковому комплексі Robot. Для цього до моделі прикладалися динамічні навантаження, що моделюють сейсмічну дію заданої інтенсивності в трьох напрямках (x, y, z). Вихідними даними були акселерограми в рівні підшви фундаменту з урахуванням взаємодії споруди та ґрунтової основи (рис. 5.6).

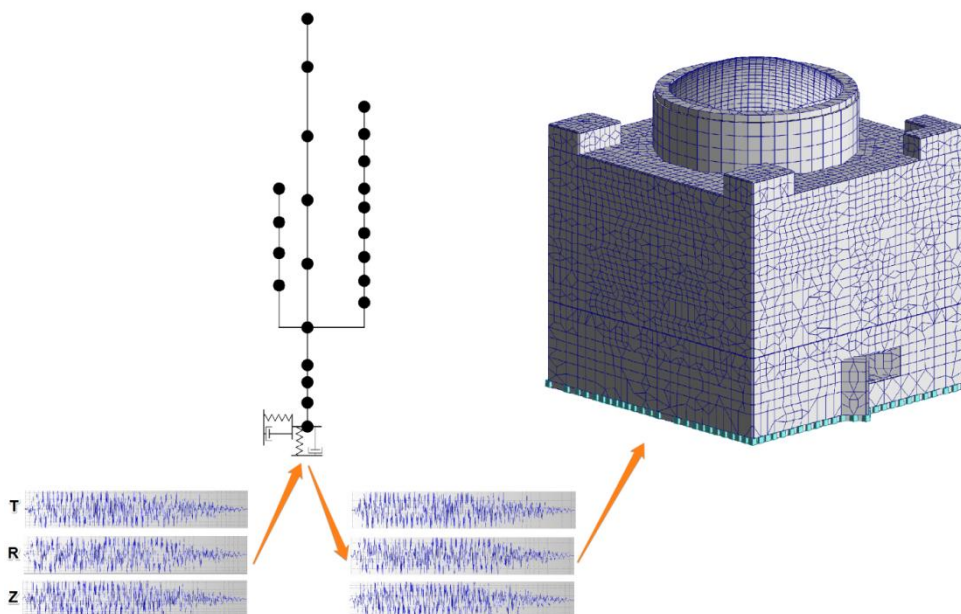


Рис. 5.6. Схема отримання відкоригованого сейсмічного впливу з урахуванням ефектів взаємодії ґрунтової основи та споруди



Результати, отримані у процесі даного розрахунку, представляються у вигляді графіків для кожної з точок установки обладнання і кожного напрямку впливу. Графіки спектрів побудовані для коефіцієнтів демпфування 1 %, 2 %, 5 % від критичного (рис. 5.7).

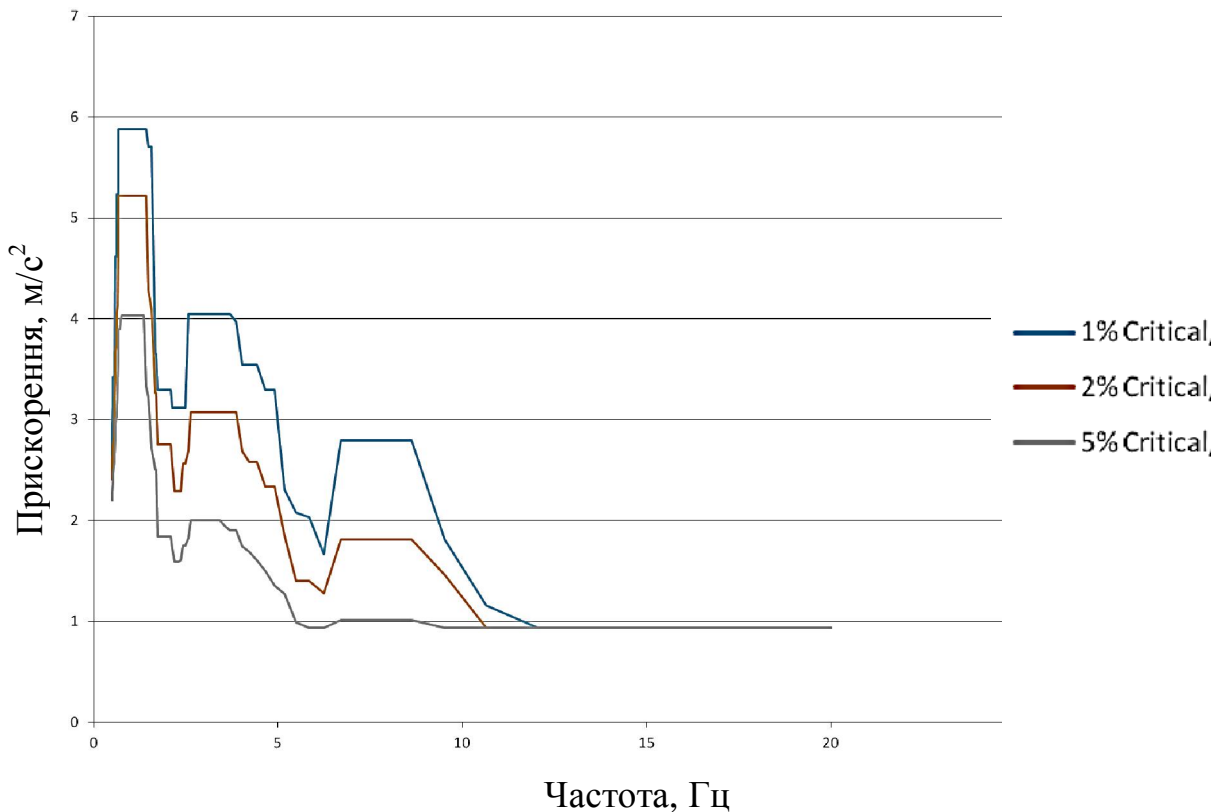


Рис. 5.7. Приклад отриманого спектру реакції на відмітці будівлі РВ

При визначенні НДС реакторного відділення використовується метод прямого динамічного аналізу конструкції (інтегрування рівнянь руху). При цьому в якості вихідних даних сейсмічного впливу приймається відкоригований запис динамічної дії на рівні підшви фундаменту реакторного відділення з урахуванням взаємодії будівлі з ґрунтовою основою, які представляються у вигляді трьохкомпонентної акселерограми.

У результаті розрахунку були отримані деформації, компоненти внутрішніх зусиль, які служать вихідними даними для перевірки працездатності елементів конструкцій розглянутої будівлі та подальшої

оцінки технічного стану будівлі з урахуванням ефектів взаємодії ґрунтової основи і споруди.

На рисунку 5.8 представлено повне (сумарне) переміщення, яке є результатом у глобальній системі координат від сейсмічної дії та розраховується як корінь квадратний із суми квадратів переміщень в напрямках X, Y, Z.

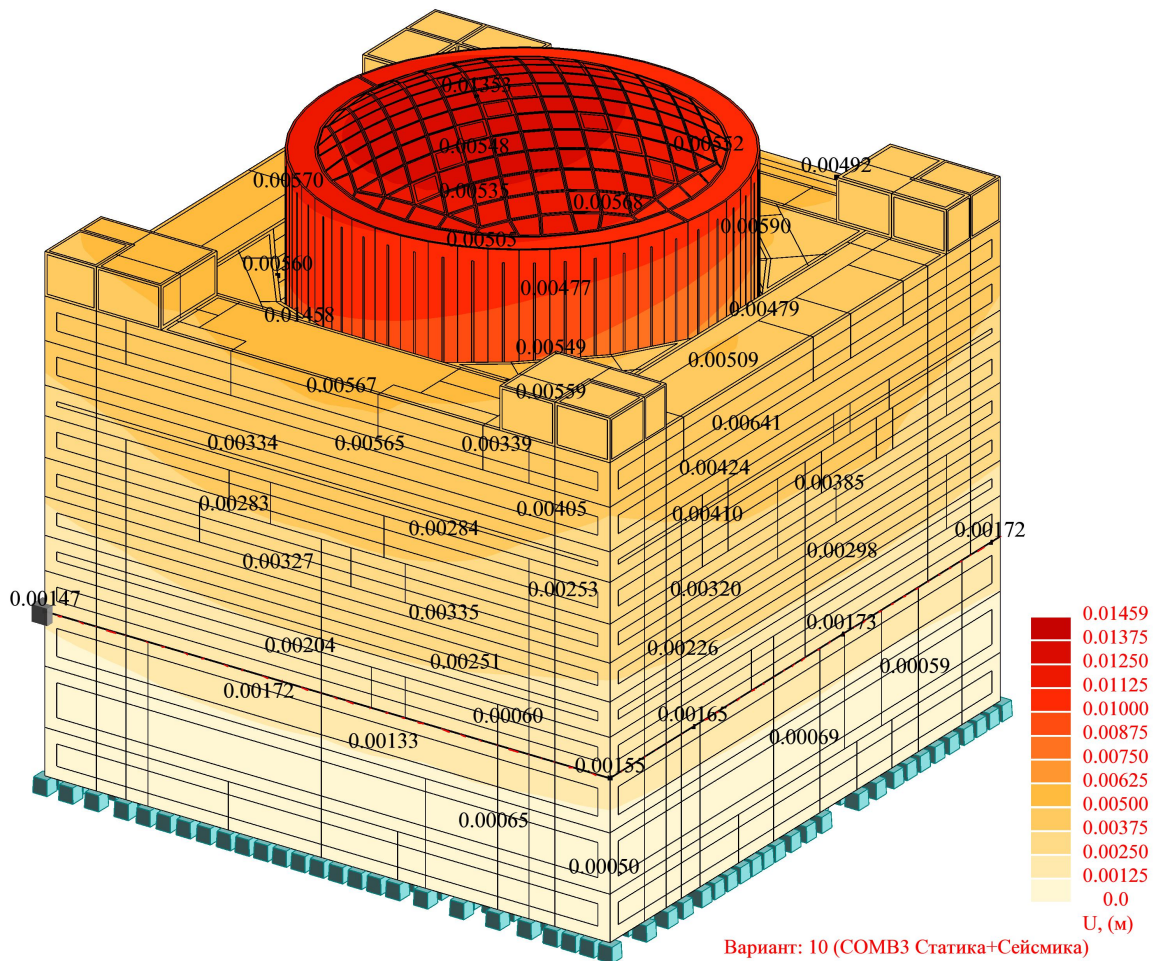


Рис. 5.8. Повне переміщення за результатами моделювання

Аналіз повного переміщення від комбінації "статичні навантаження + сейсмічна дія" показав, що максимальні переміщення виникають в купольній частині захисної оболонки та складають 1,4 см.

На рисунку 5.9 наведено ізополя згинальних моментів в елементах перекриттів оббудови від комбінації "статичні навантаження + сейсмічна дія".

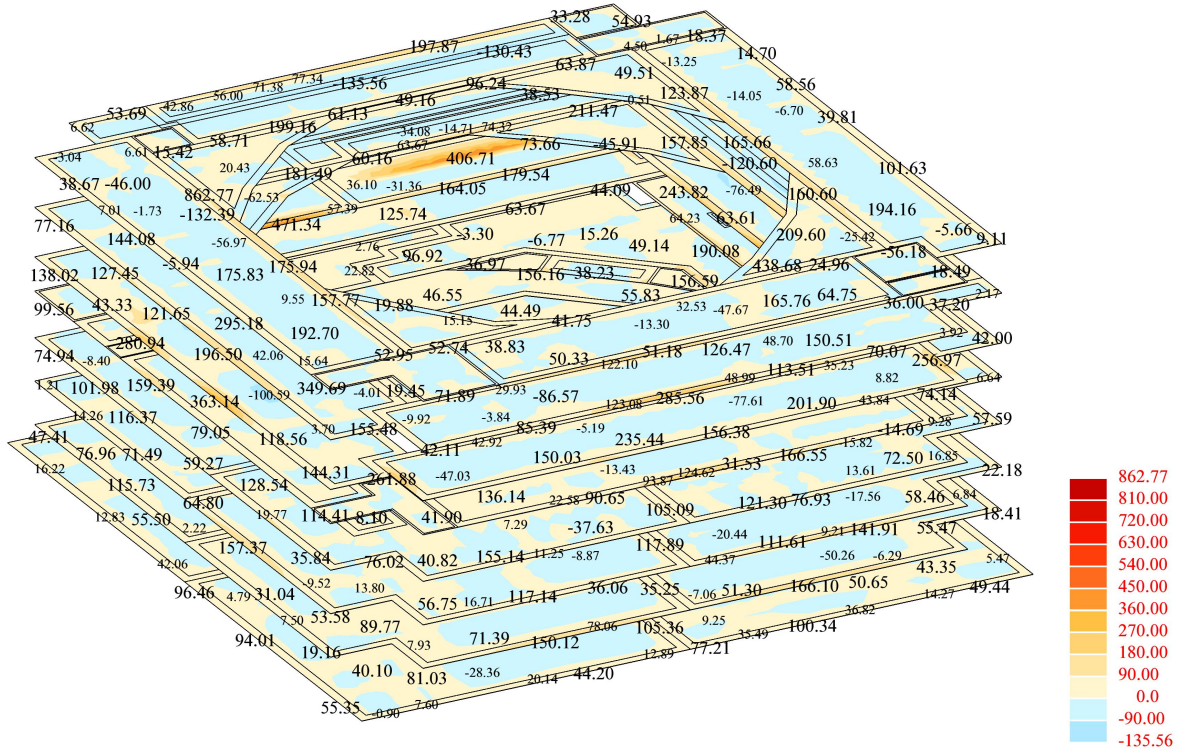


Рис. 5.9. Згинальні моменти в елементах перекриттів оббудови при сейсмічному впливі

Максимальні значення згинальних моментів в опорних і прольотних перерізах елементів перекриттів реакторного відділення спостерігаються на відмітці +32,400, що пояснюється жорсткими закріпленнями на опорах (жорсткими вузлами з'єднання) і наявністю на цій відмітці масивного технологічного обладнання.

На рисунку 5.10 наведено ізополя згинальних моментів конструкцій герметичного об'єму від сейсмічного навантаження.

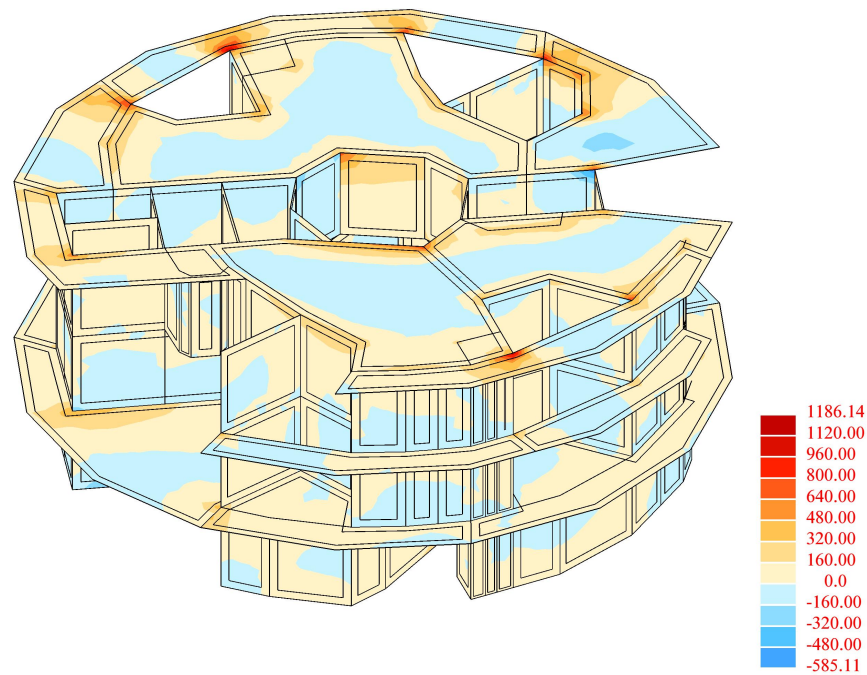


Рис. 5.10. Згинальні моменти конструкцій гермооб'єму реакторного відділення при сейсмічному впливі

Максимальні значення згинальних моментів в опорних перерізах елементів перекриттів герметичного об'єму виникають на відмітці +36,900, що пояснюється жорстким закріпленням стін із перекриттями та наявністю консольних ділянок, які запроектовані для забезпечення зазору між герметичним об'ємом та захисною оболонкою будівлі реакторного відділення.

### 5.5 Порівняння методів врахування ґрунтової основи в системі "основа – фундамент – споруда"

Для обґрунтування сейсмостійкості та розрахунку кінематичних параметрів будівель і споруд АЕС чеська компанія проводила дослідження взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" для конструкцій

ВП ЗАЕС. Зокрема проводились дослідження взаємодії ґрунтової основи зі спорудою для будівлі реакторного відділення [48].

У результаті розрахунку фахівцями чеської компанії були отримані спектри реакції на підшві фундаменту РВ із урахуванням взаємодій споруди з ґрунтовою основою.

Розрахунок взаємодії споруди з ґрунтовою основою представниками чеської компанії виконувався за допомогою методу скінчених елементів із використанням комп'ютерного коду Sassi (system for analysis of soil-structure interaction), який призначений спеціально для проведення такого роду розрахунків, а саме: взаємодії ґрунтової основи і споруди при сейсмічній дії. Використання цієї програми передбачає, що геотехнічне середовище складається з в'язко-пружного горизонтального ґрунтового шару, який залягає вище пружного напівпростору. Розрахунок взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" в обчисленнях фахівців чеської компанії був заснований на таких припущеннях:

- ґрунт моделювався в декількох горизонтальних шарах на напівпросторі. Для майданчика ЗАЕС напівпростором є скельна порода. Решта шарів ґрунту моделювалися як окремі шари. Поверхневий шар ґрунту не враховувався при розрахунку взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" (ґрунт моделювався починаючи з першого підтримуючого шару ґрунту);

- спорудження моделювалось скінченими елементами як повноцінна тривимірна SE модель, проте будівельні конструкції, які розташовані вище відм. +13,200 м, представлені спрощено у вигляді балкових і частково оболонкових моделей. Фундамент моделювався об'ємними твердими елементами. Конструкція будівлі РВ розділена на основні частини і моделювалась як система стрижневих елементів. Маса фундаменту моделювалась як об'ємна маса матеріалу, маса окремих частин конструкції (включаючи технологічні й експлуатаційні навантаження) – як зосереджені маси в центрі ваги даної частини конструкції. Маса окремих частин були



визначені за допомогою деталізованої моделі будівлі, розробленої для розрахунку поперкових спектрів реакції. Поперчні перерізи окремих стрижневих елементів, які моделюють конструкцію будівлі РВ, були визначені з геометрії основних несучих конструкцій. Характеристики елементів моделі будівлі РВ ґрунтувались на порівнянні передавальних функцій і частот детальної моделі будівлі та моделі, яка використовувалась при розрахунку взаємодії споруди з ґрунтовою основою [48].

Спрощена СЕ-модель реакторного відділення представлена на рисунку 5.11.

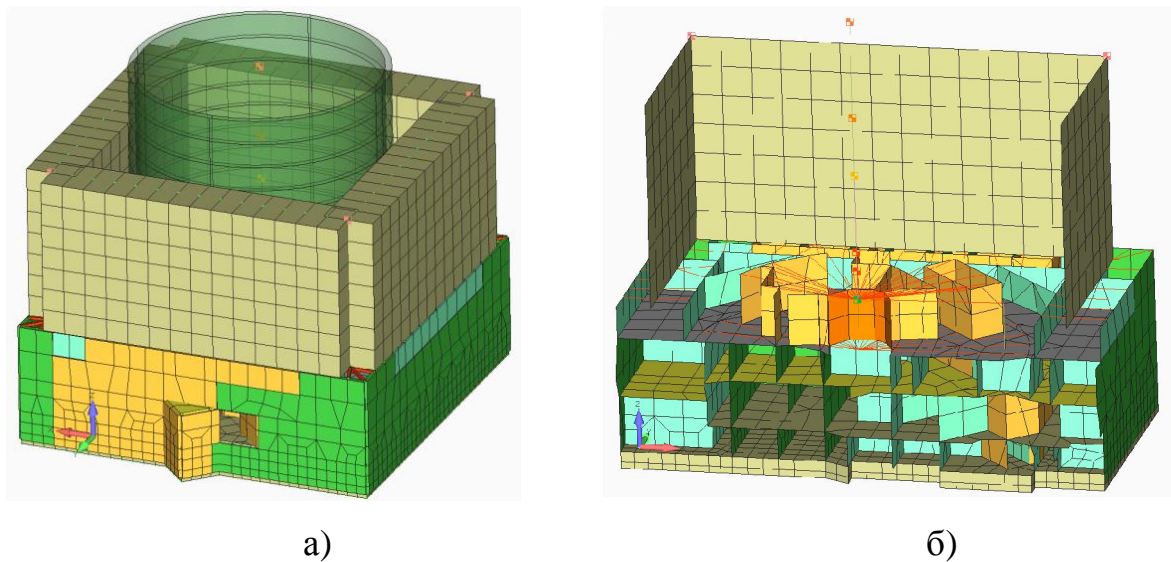


Рис. 5.11. Скінченно-елементна модель РВ (ПК Sassi):

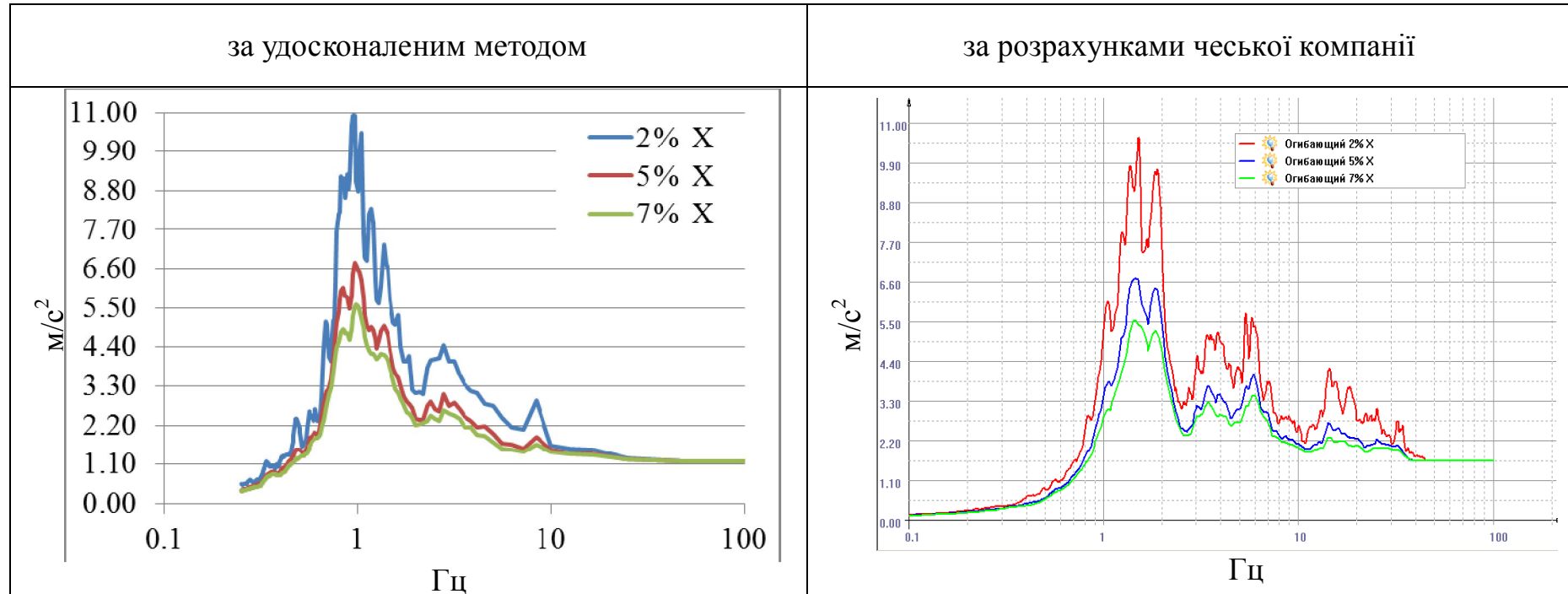
а) загальний вигляд, б) розріз.

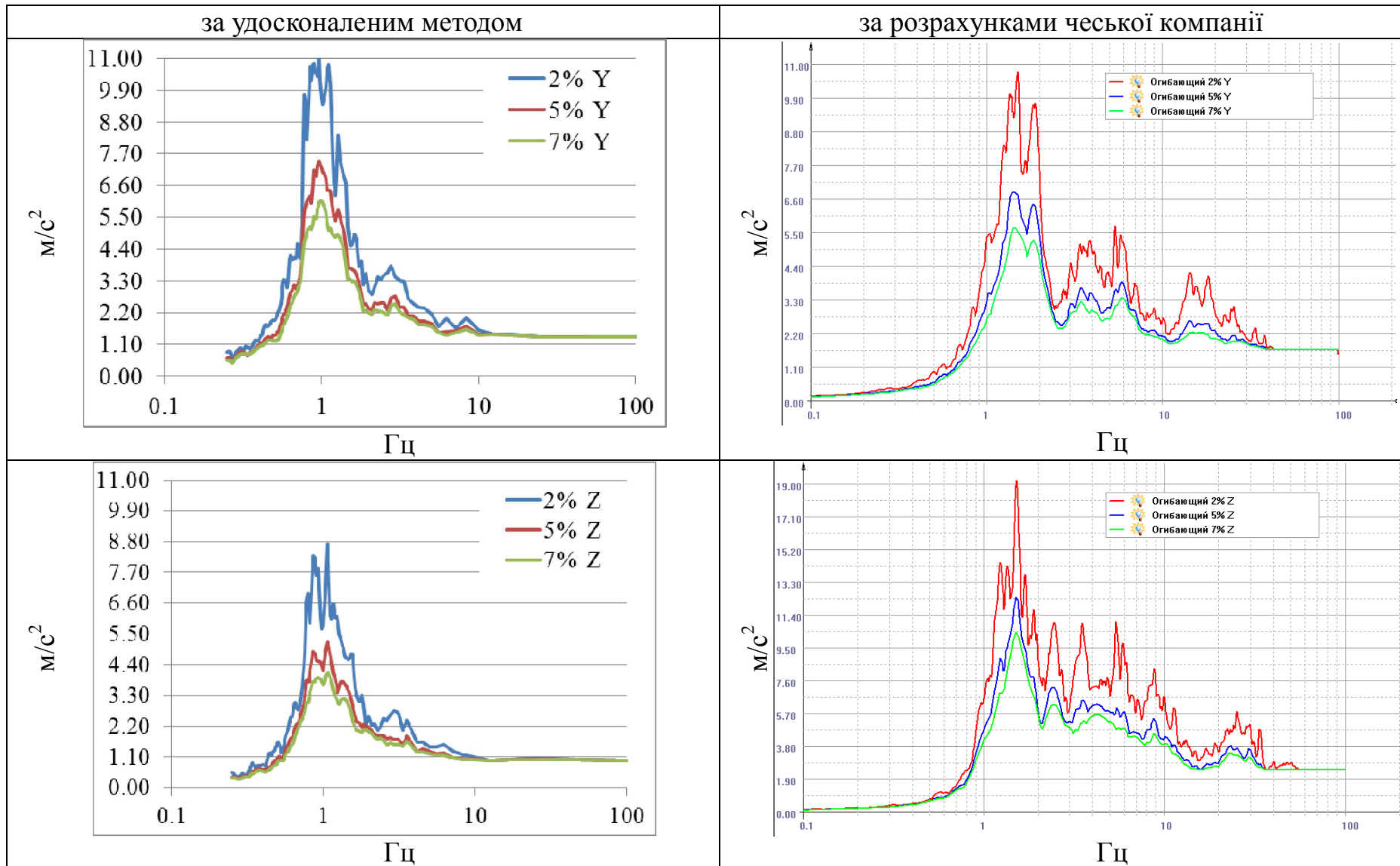
В результаті розрахунку взаємодії системи "основа – фундамент – споруда" фахівцями чеської компанії були отримані спектри реакції на підшві фундаменту реакторного відділення.

Отримані результати порівнюються зі спектрами реакції, які були розраховані згідно з удосконаленим методом.

Порівняння спектрів реакції, розрахованих для підшви фундаменту реакторного відділення, представлено в таблиці 5.3.

Порівняння спектрів реакції на підшві фундаменту за удосконаленим методом та за розрахунками чеської компанії







Аналіз порівняння спектрів реакції отриманих на підшві фундаменту РВ у результаті розрахунку системи "основа – фундамент – споруда" показав, що в горизонтальних напрямках Х і Y основний пік прискорення знаходиться в рамках 1 Гц та дорівнює близько  $11 \text{ м/с}^2$ . Різниця максимального піку горизонтальних спектрів реакції отриманих фахівцями чеської компанії й отриманих за допомогою удосконаленого методу, не перевищує 5 %. Форми спектрів реакції в горизонтальному напрямку, які були отримані за результатами обох методів, достатньо близькі по всім контурним точкам.

Порівняльний аналіз результатів у горизонтальному напрямку показав, що спектри реакції, які були отримані за допомогою розрахункового комплексу Sassi, містять незначні піки в області високих частот (10...30 Гц).

Аналіз отриманих спектрів реакції в вертикальному напрямку показує значну розбіжність результатів, що пояснюється різницею в методах аналізу системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі. Максимальний пік спектра, отриманий за удосконаленим методом у вертикальному напрямку, нижчий за максимальний пік, який був отриманий за допомогою розрахункового комплексу Sassi. Це пояснюється використанням коефіцієнтів жорсткості та демпфування, які обчислюються за допомогою методики Газетаса. Згідно з проведеною науково-дослідною роботою обчислення поповерхових спектрів реакції за удосконаленим методом з використанням методики Газетаса призведе до зниження отриманих результатів в вертикальному напрямку, у зв'язку з використанням уточнених фізико-динамічних характеристик ґрунтової основи.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1) Розроблено деталізовану, геометрично наближену до реальної споруди скінченно-елементну модель реакторного відділення атомної електростанції, яка враховує її проектні особливості (зокрема, параметри купольної частини, особливості стикування купольної і циліндричної частин будівлі, з'єднання циліндричної частини захисної оболонки з опорною плитою, геометричні особливості герметичного об'єму).

2) Розроблено динамічну модель реакторного відділення атомної електростанції, яка включає в себе чотири частини: фундаментну частину, оббудову, захисну оболонку і герметичну зону, що дозволило врахувати основні динамічні характеристики досліджуваної будівлі та взаємний вплив конструкцій одна на одну.

3) Розраховано поповерхові спектри реакції та напружено-деформований стан реакторного відділення з урахуванням взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда", які є вихідними даними для подальшої кваліфікації обладнання та перевірки працездатності елементів конструкцій досліджуваної споруди.

4) Виявлено, що результати, отримані при використанні удосконаленого методу порівнянні за точністю з більш складним і трудомістким існуючим методом. Обґрунтовано, що запропонований удосконалений метод може використовуватись для аналізу системи "основа – фундамент – споруда" з метою розрахунку поповерхових спектрів реакції жорстких масивних будівель із плитним фундаментом.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведені в дисертаційній роботі дослідження вирішують актуальну науково-прикладну задачу удосконалення алгоритму динамічного аналізу системи "основа – фундамент – споруда". Отримані в роботі рішення ґрунтуються на загальноприйнятих теоретичних положеннях і узгоджуються з результатами експерименту та чисельними розрахунками. Це свідчить про достовірність результатів виконаного дослідження та дозволяє зробити наступні висновки:

1) Встановлено, що при розрахунку поповерхових спектрів реакції будівель і споруд АЕС необхідно враховувати взаємодію елементів системи "основа – фундамент – споруда". Під час досліджень слід проводити опис методів розрахунку й обґрунтовувати застосування цих методів.

2) Удосконалено метод розрахунку системи "основа – фундамент – споруда" при сейсмічних навантаженнях і розроблено його алгоритм. Метод дозволяє розрахувати поповерхові спектри реакції масивних будівель із плитним фундаментом у конкретних точках встановлення обладнання з урахуванням в'язко-пружних властивостей ґрунтової основи. Удосконалений метод в порівнянні з використанням тривимірної скінченно-елементної моделі разом із об'ємним ґрунтовим масивом знижує трудомісткість і скорочує час розрахунків.

3) Складено рекомендації щодо розробки та верифікації динамічних моделей будівель і споруд та розроблено блок-схеми обчислення динамічних параметрів ґрунтової основи.

4) Обґрунтовано удосконалений метод розрахунку взаємодії ґрунтової основи зі спорудою на основі результатів повномасштабного польового дослідження взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" при ударному впливі на ґрунт.

5) Доведено, що динамічний розрахунок жорстких масивних будівель із плитним фундаментом в системі "основа – фундамент – споруда" з використанням удосконаленого методу дозволяє врахувати ефекти взаємодії ґрунтової основи зі спорудою. Встановлено, що різниця в результатах чисельних досліджень і натурального експерименту не перевищує 28,5 %.

б) Виявлено, що розрахунок поповерхових спектрів реакції з використанням тривимірної скінченно-елементної моделі разом з об'ємним ґрунтовим масивом демонструє найбільшу збіжність, однак являє собою складну комплексну задачу, яка вимагає вирішення ряду специфічних завдань.

7) Розраховано поповерхові спектри реакції та досліджено НДС реакторного відділення АЕС при дії сейсмічного навантаження з урахуванням в'язко-пружних властивостей ґрунтового масиву. Результати, отримані при використанні удосконаленого методу, відповідні за точністю з більш складним і трудомістким існуючим методом.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александрович В. А. Экспериментальні дослідження осадок пісчаних основ фундаментів при дії динамічних навантажень, що підпорядковуються гармонічному закону / В. А. Александрович, Ю. Л. Винников // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту / Півн.-схід. наук. центр трансп. акад. України, Укр. держ. ун-т. залізн. трансп. – Харків, 2015. – Вип. 151, т. 2. – С. 147–152.
2. Александрович В. А. Осадки песчаных оснований штампа от динамических нагрузок, подчиняющихся гармоническому закону / В. А. Александрович, Ю. Л. Винников // Збірник наукових праць. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава, 2015. – Вип. 2 (44). – С. 160–176.
3. Амосов А. А. Основы теории сейсмостойкости сооружений / А. А. Амосов, С. Б. Сеницын. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : АСВ, 2010. – 134 с.
4. Ананченко М. Ю. Применение геофизических методов при оценке сейсмического разжижения грунтов (состояние вопроса) / М. Ю. Ананченко, М. М. Довбнич // Збірник наукових праць Національного гірничого університету / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2014. – № 45. – С. 95–101.
5. Банах В. А. Моделирование работы строительных конструкций эксплуатируемых зданий при передаче динамических воздействий через грунтовой массив / В. А. Банах // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Л. – 2011. – № 39. – С. 18–22.
6. Баркан Д. Д. Динамика оснований и фундаментов / Д. Д. Баркан. – Москва : Стройвоенмориздат, 1948. – 411 с.

7. Бирбраер А. Н. Прочность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А. Н. Бирбраер, С. Г. Шульман. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.
8. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – Санкт-Петербург : Наука, 1998. – 255 с.
9. Бойко І. П. Дослідження взаємодії багатоповерхових будівель як елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції» при статичних та динамічних – навантаженнях / І. П. Бойко, В. О. Сахаров // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : зб. наук. пр. / Вінн. нац. техн. ун-т. – Вінниця, 2009. – № 1. – С. 53–59.
10. Бойко І. П. Дослідження динамічних властивостей конструкцій системи «основа – фундамент – надземні конструкції» / І. П. Бойко, В. О. Сахаров, С. О. Сахаров // Основи і фундаменти : міжвідом. наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ, 2006. – Вип. 30.
11. Бойков В. Г. Ударные взаимодействия. – 2005. – 12 с. – Режим доступа: <http://www.euler.ru/distr/euler/simulation/impacts.pdf>.
12. Винников Ю. Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при зведенні та наступній роботі : монографія / Ю. Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2016. – 280 с.
13. Гарагаш Б. А. Надежность пространственных регулируемых систем "основание – сооружение" при неравномерных деформациях основания. В 2 т. / Гарагаш Б. А. – Москва : АСВ, 2012. – Том 1. – 416 с.
14. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971. – 368 С.
15. Горбунов-Посадов М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – Москва : Стройиздат, 1953. – 627 с.
16. Горбунов-Посадов М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1984. – 679 с.

17. Гордиенко А. В. Численное исследование динамического взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / А. В. Гордиенко, Н. С. Дюкина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – Вып. 4, ч. 4 : Механика деформируемого твердого тела. – С. 1454–1456.
18. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций : монография / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – Москва : АСВ, 2009. – 357 с.
19. Гриб Н. Н. Анализ сейсмических эффектов от массовых взрывов разреза "нерюнгринский" / Н. Н. Гриб, А. Ю. Пазынич // Современные проблемы науки и образования. – 2010. – № 1. – С. 71–76.
20. Динамический расчет зданий и сооружений / М. Ф. Барштейн, В. А. Ильичев, Б. Г. Коренев, Кохманюк С. С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1984. – 95 с.
21. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия (Справочник проектировщика) / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – Москва : Стройиздат, 1981. – 215 с.
22. Дубровский В. Б. Строительство атомных электростанций / В. Б. Дубровский, П. А. Лавданский, И. А. Енговатов. – Москва : АСВ, 2010. – 358 с.
23. Дубровский М. П. К оценке несущей способности системы «Причальное сооружение – грунтовая среда» / М. П. Дубровский, Н. Н. Хонелия, Н. В. Кострец // Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. пр. / Одес. нац. мор. ун-т. – 2013. – № 2. – С. 54–62.
24. Защита от опасных геологических процессов, вредных эксплуатационных влияний, от пожара. Строительство в сейсмических районах Украины : ДБН В.1.1-12:2014. – [Введ. 01.10.2014]. – Киев : М-во стр-ва, архитектуры и жилищ.-коммунал. хоз-ва Украины, 2014. – 110 с.
25. Зоценко М. Л. Дослідження динамічних характеристик коливань ґрунту від відстані при забиванні паль / М. Л. Зоценко, О. В. Бандуріна //

Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні. – Львів : 2006. №40. С.127–133.

26. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлєв [та ін.]. – 2-ге вид. – Полтава : ПНТУ, 2004. – 568 с.

27. Использование сейсмологических данных при расчете и анализе напряженно-деформированного состояния оползневых склонов в сейсмически активных районах Украины / Ю. И. Калюх, К. А. Хавкин, В. П. Берчун и др. // Современные методы обработки и интерпритации сейсмологических данных. – Обниск : [б.и.], 2012. – С. 138–143.

28. Кендзера А. В. Определение параметров сейсмических воздействий для сейсмостойкого проектирования в г. Одессе / А. В. Кендзера, Ю. В. Лесовой, В. К. Егунов и др // Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах: матер. наук. конф. (3 – 5 червня 2014, Львів). – С. 79–92.

29. Кириллов А. П. Взаимодействие фундаментов сооружений электростанций с основанием при динамических нагрузках / А. П. Кириллов, В. В. Крылов, А. Е. Саргсян. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 214 с.

30. Кірічек Ю. О. Взаємодія комбінованих масивно-плитних фундаментів із ґрунтовою основою при різних видах навантажень : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.23.02 / Ю. О. Кірічек ; Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – Дніпропетровськ, 2001. – 34 с.

31. Комплексная модель "сооружение – спайный фундамент" для оценки сейсмостойкости многоэтажных зданий / Дорофеев В. С., Сорока Н. Н., Егунов К. В., Егунов В. К. // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій. – Київ, 2016. – Вип. 83. – С. 44–54.

32. Конструктивные способы снижения вибраций фундаментов машин с динамическими нагрузками / Н. С. Швец, В. Л. Седин, Ю. А. Киричек. – Москва : Стройиздат, 1987. – 152 с.



33. Контрольные инженерно-геологические изыскания по объектам строительства: "Газовый корпус: Азотно-кислородная станция № 2, Водородно-кислородная станция № 2, Санитарно – бытовые помещения" : ИГ-604-175/13-178 : техн. отчет / Запорожская атомная электростанция. – Энергодар, 2013. – 59 с.

34. Котляревский В. А. Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология : в 3 т. / В. А. Котляревский, В. И. Ларионов, С. П. Сущев. – Москва : АСВ, 2010.

35. Кулябко В. В. Развитие и внедрение альтернативных расчетных моделей и методов в задачах динамики сооружений / В. В. Кулябко, В. Н. Кущенко, А. Е. Нечитайло, Д. С. Ярошенко, А. В. Макаров, А. В. Масловский // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – 2014. – Вып. 78. – С. 143 – 149.

36. Кулябко В. В. Нелинейные инерционные упруго-диссипативные (фрикционные) статико-динамические модели оснований и задач взаимодействия сооружений, грунтов и нагрузок / В. В. Кулябко, В. А. Банах, А. В. Банах [та ін.] // V Савиновские чтения, червень 2007 р. : тези доповідей. – СПб., 2007. – С. 2–3.

37. Кулябко В. В. Особенности применения пространственной статико-динамической модели основания для учета его взаимодействия со зданиями и сооружениями / В. В. Кулябко, В. А. Банах // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Стародубовские чтения. – 2014. – Вып. 74. – С. 82–86.

38. Кулябко В. В. Плоские и пространственные динамические модели каркасного здания при расчете на промышленную сейсмику / В. В. Кулябко, О. Л. Мухачева, С. П. Камягин // Энергосберегающие технологии, эффективные строительные материалы и конструкции для промышленного и гражданского строительства : (аннотации работ обл.

конкурса-выставки передов. опыта в строит. индустрии) / Днепрпетр. инж.-строит. ин-т. – Днепропетровск, 1991. – С. 25–31.

39. Кулябко В. В. Варианты моделирования колебаний многоэтажных каркасных зданий и сооружений / В. В. Кулябко, И. И. Давыдов // *Modern Building Materials, Structures and Techniques : Proc. 5th Intern. Conf. / Vilnius Gediminas Technical University, International Association for Bridge and Structural Engineering, Lithuanian Academy of Sciences.* – Vilnius, 1997. – Vol. 3. – P. 175–180.

40. Литвинский Г. Г. Основы горной геомеханики. Т. 1 : Механические свойства горных пород и массивов / Г. Г. Литвинский. – Алчевск : ДонДТУ, 2012. – 312 с.

41. Немчинов Ю. И. Особенности строительства в сейсмических районах Украины и совершенствование норм проектирования зданий и сооружений / Ю. И. Немчинов // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.* – 2000. – № 1. – С. 8–15.

42. Немчинов Ю. И. Сейсмостойкость зданий и сооружений : в 2 ч. / Ю. И. Немчинов. – Киев : [б.и.], 2008. – 480 с.

43. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций : ПНАЭ Г-05-006-87 : утв. Госатомэнергонадзором СССР от 30 декабря 1987 г. – Введ. с 01.07.88. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 28 с.

44. Ньюмарк Н. Основы сейсмостойкого строительства / Н. Ньюмарк, Э. Розенблют ; под ред. Я. М. Айзенберга. – Москва : Стройиздат, 1980. – 344 с.

45. О возможности использования эмпирических передаточных функций среды при микрорайонировании территорий со сложным геологическим строением / А. В. Кендзера, А. М. Скляр, А. А. Роман, Е. С. Исичко, И. И. Илиеш, Г. Р. Стародуб, В. С. Князева // *Вопросы инженерной сейсмологии.* – 1989. – Вып. 30 : Оценка эффекта сильных землетрясений. – С. 82–89.

46. Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення. Основи та фундаменти будинків і споруд. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. – Додано Зміну №1-2 від 1 липня 2012 р. – Замість СНиП 2.02.01-83 ; [чинні від 2009-07-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 161 с.

47. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Анализ динамического взаимодействия грунт-конструкция энергоблоков №1, 2 ОП "Запорожская АЭС" : 75.120-00.01.01-10-14-ПР : техн. отчет / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – 331 с.

48. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности»(выполнение вероятностного анализа сейсмической опасности площадки запорожской АЭС согласно рекомендациям МАГАТЭ SSG-9 по процедуре PSHA. Анализ взаимодействия грунта и конструкции для зданий и сооружений энергоблоков № № 1, 2, содержащих оборудование СВБ) ЗАЭС : 75/137-13.ОТ.03: техн. отчет / UNIX CZ s.r.o, 2014. – 130 с.

49. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Построение комплекса поэтажных спектров ответа и максимальных ускорений зданий и сооружений энергоблоков №№ 1, 2 ОП "Запорожская АЭС". Книга 2. Результаты расчета поэтажных спектров реакции сооружений РО-1, РО-2 : 75.120-00.03.02-11-14-ПР : техн. отчет / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – 308 с.

50. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Расчеты и оценка сейсмостойкости зданий и сооружений энергоблоков №№ 1, 2 ОП "Запорожская АЭС" Книга 2. Здания РО-1, РО-2. Результаты анализа сейсмостойкости : 75.120-00.05.02-12-14-ПР : техн. отчет / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2015. – 112 с.

51. Организация и технология строительства атомных станций / Ю. Н. Доможилов, Э. Л. Кокосадзе, О. В. Колтун, А. Л. Крыжановский ; под ред. В. И. Теличенко ; Моск. гос. строит. ун-т. – Москва : МИСИ – МГСУ, 2012. – 400 с.

52. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* : СП 22.13330.2011 / М-во регион. развития Рос. Федерации. – Введ. 20.05.2011. – Изд. офиц. – Москва, 2011. – 159 с.

53. Особенности взаимодействия комбинированного свайно-плитного фундамента с грунтом при сейсмических воздействиях / Червинский Я. И., Домбровский Я. И., Моргунова Н. В., Ващук С. В. // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій. – Київ, 2008. – Вип. 69. – С. 331–334.

54. Пастернак П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак. – Москва : Госстройиздат, 1954. – 56 с.

55. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.

56. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / Ю. И. Немчинов, Н. Г. Марьенков, А. К. Хавкин, К. Н. Бабики ; под ред. Ю. И. Немчинова ; Гос. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций. – Киев : Гудименко С.В., 2012. – 384 с.

57. Проектирование сейсмостойких конструкций с комплектными системами сухого строительства / А. Кусаинов, В. Ильичев, А. Ботабеков, О. Хенкель, М. Шальк, Д. Холь. – Москва : АСВ, 2013. – 272 с.

58. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные загрузки / Н. Н. Белов, Д. Г. Копаница, О. Г. Кумпяк, Н. Т. Югов. – Томск : Нортхэмптон, 2004. – 465 с.

59. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона (проблемы, опыт, возможные решения и

рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии) / А. С. Городецкий, Л. Г. Батрак, Д. А. Городецкий, М. В. Лазнюк, С. В. Юсипенко. – Киев : Факт, 2004. – 106 с.

60. Рауш Э. Фундаменты машин / Э. Рауш ; пер. с нем. В. И. Бутескула, А. З. Кравченко. – Москва : Стройиздат, 1965. – 420 с.

61. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О. А. Савинов. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1979. – 200 с.

62. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и расчет / О. А. Савинов. – Ленинград ; Москва : Стройиздат, 1964. – 346 с.

63. Савицкий О. А. Динаміка фундаментів на складних основах : авториф. дис. докт. техн. наук : 05.23.02 / О. А. Савицький ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2012. – 43 с.

64. Самедов А. М. Податливые виброизолирующие основания подземных сооружений на слабых или перегруженных грунтах, подверженных динамическим воздействиям / А. М. Самедов, Д. В. Ткач // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер. : Гірництво. – 2014. – Вип. 23. – С. 48–57.

65. Сахаров В. А. Взаимодействие инженерных конструкций с нелинейным основанием при сейсмических нагрузках : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.23.02 / В. А. Сахаров ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Киев, 2015. – 41 с.

66. Сахаров В. А. Взаимодействие конструкций Зимненского монастыря с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / В. А. Сахаров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий . – 2014. – № 6/7. – С.18–23.

67. Сахаров В. О. Дослідження впливу сейсмічних навантажень на взаємодію комплексу висотних будівель з в'язко-пружно-пластичною ґрунтовою основою / В. О. Сахаров // Збірник наукових праць. Серія:

Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 3 (38). Т2. – С. 302–312.

68. Сахаров В. О. Дослідження сейсмічної реакції багатоповерхової будівлі з урахуванням нелінійного деформування середовищ / В. О. Сахаров // Світ геотехніки. – Запоріжжя: НДІБК, 2014. – №4 (44). – С. 4–8.

69. Сахаров В. О. Застосування спектральних суперелементів в задачах динаміки системи "основа – фундамент – будівля" / В. О. Сахаров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д.: ПДАБА, 2015. – №1(202). – С. 37–46.

70. Седин В. Л. Взаимодействие основания и сооружения при анализе сейсмостойкости зданий повышенной категории ответственности / В. Л. Седин, В. А. Загильский, А. Г. Ефименко // Савиновские чтения : сб. науч. тр. и программа междунар. конф. (1-4 июля 2014 г.) / Петербург. гос. ун-т путей сообщения императора Александра I ; под ред. А. М. Уздина, Т. А. Белаш. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 22–23.

71. Седин В. Л. Взаимодействие основания и сооружения при анализе сейсмостойкости зданий повышенной категории ответственности / В. Л. Седин, В. А. Загильский, А. Г. Ефименко // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2015. – № 2. – С. 17–20.

72. Седин В. Л. Моделирование основания в системе "основание-сооружение" при статических нагрузках в расчетном комплексе robot structural analysis professional / В. Л. Седин, В. А. Загильский, А. Г. Ефименко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2013. – № 8. – С. 9–13.

73. Седин В. Л. Мониторинг и расчет деформационного состояния сложной формы фундаментов реакторов и турбоагрегатов энергоблоков с целью обеспечения общей надежности эксплуатации АЭС / Седин В. Л., Бауск Е. А., Киринос Е. А. // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій. – Київ, 2011. – Вип. 75, кн. 1. – С. 457–463.

74. Седин В. Л. Натурная оценка взаимодействия основания и сооружения при ударном воздействии на грунт / В. Л. Седин, Е. А. Бауск, В. А. Загильский // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 85 : Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – С. 62–67.

75. Седин В. Л. Развитие аналитических методов расчета фундаментов сложной формы для энергооборудования / В.Л. Седин. – Днепропетровск : ПГАСА, 1996.–38 с.

76. Сейсмостойкие многоэтажные здания с железобетонным каркасом / Я. М. Айзенберг, Э. Н. Кодыш, И. К. Никитин, В. И. Смирнов, Н. Н. Трекин. – Москва : АСВ, 2012. – 264 с.

77. Седін В. Л. Аналіз НДС конструкцій будівель і споруд АЕС в системі "грунтова основа – фундамент – споруда" / В. Л. Седін, В. А. Загільський // Основи та фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2015. – Вип. 37. – С. 340–351.

78. Седін В. Л. Верифікація чисельної моделі будівель АЕС при динамічному аналізі системи "основа – фундамент – споруда" / В. Л. Седін, В. А. Загільський // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. н.-д. ін.-т. буд. конструкцій. – Київ, 2016. – Вип. 83. – С. 153–160.

79. Седін В. Л. Взаємодія основи і споруди при аналізі сейсмостійкості на прикладі головного корпусу АЕС / В. Л. Седін, В. А. Загільський, А. Г. Єфіменко // Основи і фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2014. – Вип. 35. – С. 21–28.

80. Система обеспечения надежности строительных конструкций АЭС и ТЭС Украины для продления их сроков службы / Н. В. Савицкий, В. Б. Швец, В. Л. Седин, Ю. А. Киричек, Е. А. Бауск, А. Н. Станкевич, А. В. Шавлаков, И. Е. Гевцы, Г. Г. Фаренюк, А. Н. Бамбура // Строительство,

материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стро-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 65 : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – С. 531–540.

81. Справочник по механике и динамике грунтов / В. Б. Швец, Л. К. Гинзбург, В. М. Гольдштейн [и др.]. – Київ : Будівельник, 1987. – 232 с.

82. Ставницер Л. Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов : монография / Л. Р. Ставницер. – Москва : АСВ, 2010. – 448 с.

83. Строительство атомных электростанций / В. Б. Дубровский, А. П. Кириллов, В. С. Конвиз, П. А. Лавданский, Ф. С. Нешумов, Ю. В. Пономарев, А. Б. Пуховский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.

84. Суммирование импульсных нагрузений в задачах о динамическом взаимодействии бетонных плотин со скальным основанием / Храпков А. А., Цейтлин Б. В., Скворцова А. Е., Костылев В. С. // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій. – Київ, 2008. – Вип. 69. – С. 370–377.

85. Тер-Мартирисян З. Г. Взаимодействие сооружений конечной жесткости с двухслойным основанием при сейсмических нагрузках / З. Г. Тер-Мартирисян, М. Н. Джаро // Вестник МГСУ. – 2012. – № 4. – С. 121–125.

86. Тер-Мартирисян З. Г. Некоторые проблемы подземного строительства / З. Г. Тер-Мартирисян, А. З. Тер-Мартирисян // Жилищное строительство. – 2013. – № 9. – С. 2–5.

87. Тер-Мартирисян З. Г. Обоснование использования свайно-оболочечных фундаментов с предварительно напряженным грунтовым основанием / З. Г. Тер-Мартирисян, Я. А. Пронозин, М. А. Степанов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2012. – № 4. – С. 2–5.

88. Терцаги К. Теории механики грунтов / К. Терцаги. – Москва : Госстройиздат, 1961. – 507 С.



89. Технічне обстеження будівельних конструкцій» об'єкту незавершеного будівництва: «Запорізька АЕС. Газовий корпус у тому числі азотно-киснева станція №2. Нове будівництво. Завершення будівництва та прийняття в експлуатацію Запорізької АЕС у цілому : 12436-2014-00-ИД : техн. отчет / Фундаментстроймакс – Дніпропетровськ, 2014 – 91 с.

90. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности АС с реакторами типа ВВЭР : НП-006-98 (ПНАЭ Г-01-036-95) / Госатомнадзор России. – Введ. 01.08.95. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 510 с.

91. Трофимчук А. Н. Сейсмостойкость сооружений с учетом их взаимодействия с грунтовым основанием / А. Н. Трофимчук. – Киев : Полиграф Консалтинг, 2004. – 72 с.

92. Тяпкин А. Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием / А. Г. Тяпкин. – Москва : АСВ, 2013. – 392 с.

93. Уздин А. М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А. М. Уздин, Т. А. Сандович, Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. – Санкт-Петербург : Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. – 176 с.

94. Учет основания и сейсмических условий площадки при анализе сейсмостойкости реакторного отделения / В. Л. Седин, Е. А. Бауск, М. М. Довбнич, В. А. Загильский // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2015. – № 11. – С. 42–51.

95. Филоненко-Бородич М. М. Простейшая модель упругого основания, способная распределять нагрузку / М. М. Филоненко-Бородич // Сборник трудов Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II. – Москва, 1945. – № 53. – С. 92–108.

96. Филоненко-Бородич М. М. Некоторые приближенные теории упругого основания / М. М. Филоненко-Бородич // Ученые записки

Московского государственного университета. – Москва, 1940. – Вып. 46. – С. 1–18.

97. Флорин В. А. Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – Ленинград : Госстройиздат, 1959. – Т. 1. – 357 с.

98. Фундаменты машин с динамическими нагрузками : СНиП 2.02.05-87 / Госстрой СССР. – Введ. 01.07.1988. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 32 с.

99. Холопов И. С. Расчет конструкций зданий и сооружений при динамических воздействиях (курс лекций) / И. С. Холопов. – Москва : АСВ, 2012. – 262 с.

100. Чернов Ю. Т. Вибрации строительных конструкций: Аналитические методы расчета. Основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкции, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям / Ю. Т. Чернов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : АСВ, 2011. – 384 с.

101. Шаблинский Г. Э. Мониторинг уникальных высотных зданий и сооружений на динамические и сейсмические воздействия / Г. Э. Шаблинский. – Москва : АСВ, 2013. – 328 с.

102. Шаблинский Г. Э. Сейсмостойкость строительных конструкций атомных электростанций : [монография] / Г. Э. Шаблинский, Г. А. Джинчвелашвили, Д. А. Зубков. – Москва : АСВ, 2010. – 216 с.

103. Экспериментальные исследования осадок зданий при динамических нагрузках и результаты восстановительных работ / Бикус Е. М., Головки А. С., Головки С. И., Седин В. Л., Шехоркина Н. Е., Лазебник А. Ю. // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій. – Київ, 2011. – Вип. 75, кн. 2. – С. 356–363.

104. Ahmed Y. Seismic Design of Buildings of Eurocode 8 / Ahmed Y. – [New York] : Spon Press, 2009. – 314 p.

105. Ananchenko M. Y. Innovation approaches in seismic microzonation tailing dump designing / M. Y. Ananchenko, M. M. Dovbnich, I. V. Mendrii

// Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпро, 2013. – № 42. – С. 54-59.

106. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Verification Manual Version 5.2, March 2014 according to “Guide de validation des progiciels de calcul de structures” AFNOR, 1990. – 73 p. – [http://download.autodesk.com/us/support/files/robot\\_structural\\_analysis\\_pro\\_2015\\_verification\\_manuals/Verification\\_Manual\\_AFNOR\\_5.2.pdf](http://download.autodesk.com/us/support/files/robot_structural_analysis_pro_2015_verification_manuals/Verification_Manual_AFNOR_5.2.pdf).

107. Bathe K. J. Finite Element Procedures In Engineering Analysis / K. J. Bathe. – New Jersey : Prentice Hall, 1982. – 735 p.

108. Biot M. Theory of vibration of buildings during earthquake / M. Biot // Journal of applied mathematics and mechanics. – 1934. – Vol. 14, iss. 4. – P. 213–223.

109. Chopra A. K. Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering / A. K. Chopra. – 4th edition. – New Jersey : Pearson Prentice Hall, 2014. – 794 p. – (Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics).

110. Clough R. W. Dynamics of Structures / R. W. Clough, J. Penzien . – 3rd edition. – Berkeley :Computers & Structures, 1995. – 752 p.

111. Collaborative Study of NUPEC seismic field test data for NPP structures : NUREG/CR-6822 / Brookhaven National Laboratory U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research. – Washington, 2003. – 222 p. – Available at: <http://www.nrc.gov/docs/ML0319/ML031910007.pdf>.

112. Consideration of external events in the design of nuclear facilities other than nuclear power plants, with emphasis on earthquakes : IAEA-TECDOC-1347 / International Atomic Energy Agency. – Vienna : IAEA, 2003. – 107 p.

113. Datta T. K. Seismic analysis of structures / T. K. Datta. – Singapore : Print Media Pte Ltd, 2010. – 464 p.

114. Design of structures for earthquake resistance : Eurocode 8 / The European Union Per Regulation, European Committee for Standardization. –

Brussels, 2004. – Part 5 : Foundations, retaining structures and geotechnical aspects <https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1998.5.2004.pdf>. – EN 1998-5:2004. – 47 p. – Available at: <https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1998.5.2004.pdf>.

115. Design of structures for earthquake resistance : Eurocode 8 / The European Union Per Regulation, European Committee for Standardization. – Brussels, 2005. – Part 6 : Towers, masts and chimneys : EN 1998-6:2005. – 49 p. – Available at: <https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1998.6.2005.pdf>.

116. Dutta S. C. A critical review on idealization and modeling for interaction among soil-foundation-structure system / S. C. Dutta, R. Roy // *Computers & Structures*. – 2002. – Vol. 80, iss. 20/21. – P. 1579–1594.

117. Earthquake engineering. From engineering seismology to performance-based engineering / eds. : Y. Bozorginia, V. V. Bertero. – Boca Raton : CRC Press, 2004. – 1268 p.

118. Experimental Study on Nonlinear Soil Structure Interaction of Nuclear Power Plants using Large Scale Blast Excitations / Osamu Kontani, Atsushi Suzuki, Yoshio Kitada, Michio Iguchi // *Proceedings Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction*, [March 29-30, 2004, Menlo Park, CA, USA] / edited by: M. Celebi, M. I. Todorovska, I. Okawa, M. Iiba. – California, 2010. – P. 1–13.

119. Foundation engineering. Handbook / ad. Hsai-Yang Fang. – London : Taylor & Francis, 1990. – 923 p.

120. Gazetas G. Analysis of machine foundation vibrations : State of the art / Gazetas G. // *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 1983. – Vol. 2, iss. 1. – P. 2–42.

121. Gazetas G. Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations / G. Gazetas // *Journal of geotechnical engineering*. – 1991. – Vol. 117, iss. 9. – P. 1363–1381.

122. Gazetas G. Horizontal damping of arbitrarily shaped embedded foundations / Gazetas G., Tassoulas L. // *Journal of geotechnical engineering*. – 1987. – Vol. 113, iss. 5. – P. 458–475.

123. Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants : Safety Guides NS-G-3.6 / International atomic energy agency. – Vienna, 2004. – 53 p.

124. Hughes Th. J. R. The Finite Element Method. Linear Static and Dynamic. FEM Analysis / Th. J. R. Hughes. – New York : Prentice-Hall, 1987. – 674 p.

125. Kawamata Y. Discussions on dynamic interaction between piles and large particle rockfill / Yohsuke Kawamata, Scott A. Ashford // 2010 – Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic, [May 24 – 29, 2010, San Diego, CA] / Missouri University of Science and Technology. – Rolla, Missury, 2010. – Session 6. – Paper No. 6.07a.

126. Kramer S. L. Geotechnical Earthquake Engineering / Kramer S. L. – New Jersey : Prentice Hall, 1996. – 672 p.

127. Lorenz H. Grundbau-Dynamik / H. Lorenz. – Berlin : Springer, 1960. – 308 p.

128. Lysmer J., Kuhlemeyer R. L. Finite Dynamic Model for Infinite Media / J. Lysmer, R. L. Kuhlemeyer // Journal of the Engineering Mechanics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. – 1969. – P. 859–865. – Available at: <https://ru.scribd.com/document/254460899/Lysmer-J-Kuhlemeyer-L-1969-Finite-Dynamic-Model-for-Infinite-Media>.

129. Mylonakis G. Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations / G. Mylonakis, S. Nikolaou, G. Gazetas // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2006. – Vol. 26, iss. 9. – P. 824–853.

130. Omori, F./ Seismic experiments on the fracturing and overturning of columns// Publications of the earthquake investigations in foreign languages. – 1900. – № 4. – P.69–141.

131. Parlett B. N. The Symmetric Eigenvalue Problem / B. N. Parlett. – New York : Prentice-Hall, 1980.

132. Phipps J. N. Experimental and numerical investigation of dynamic rocking foundation behavior : Graduate Theses and Dissertations / J. N Phipps ; Iowa State University. – Iowa, 2013. – 187 p. – Available at: <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4622&context=etd>.

133. Sartoretto F. Accelerated simultaneous iterations for large finite element eigenproblems / Flavio Sartoretto, Giorgio Pini, Giuseppe Gambolati // *Journal of Computational Physics*. – 1989. – Vol. 81, iss. 1. – P. 53–69.

134. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants : Safety Guides NS-G-1.6 / International atomic energy agency. – Vienna, 2003. – 67 p.

135. Solving large-scale problems in mechanics / ed. M. Papadrakakis. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 1993. – 475 p.

136. Stewart J. P. Empirical evaluation of inertial soil structure interaction effects : Report PEER-98/07 / J. P. Stewart, R. B. Seed, G. L. Fenves ; Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley. – 1998. – 233 p.

137. Syedin V. L. On the issue of "soil – foundation – structure" System interaction for the npp constructions Under seismic impact / V. L. Syedin, V. A. Zagilsky // *Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка*. – Полтава, 2016. – Вип. 1 (46). – С. 95–101.

138. Syedin V. L. Analysis of accounting methods for dynamic interaction in the system “soil – structure” for critical facilities / V. L. Syedin, V. A. Zagilsky // *Наука і техніка: перспективи ХХІ століття : міжнар. наук.-практ. конфер. молодих вчених, 11 квітня 2014 р. / Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури*. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 87–89.

139. Tassoulas J. L. On the dynamic stiffness of circular ring footings on an elastic stratum / J. L. Tassoulas, E. Kausel // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 1984. – Vol. 8, iss. 5. – P. 411–426.

140. Tileylioglu S. Dynamic stiffness and damping of a shallow foundation from forced vibration of a field test structure / S. Tileylioglu, J. P. Stewart,

R. L. Nigbor // Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2011. – Vol. 137, iss. 4. – P. 344–353.

141. Triaxial Broadband Seismometer : Operator's guide: Güralp Systems Limited – England, 2006. – 35 p.

142. Veletsos A. S. Vertical vibration of ring foundations / A. S. Veletsos, Y. Tang // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 1987. – Vol. 15, iss. 1. – P. 1–21.

143. Wolf J. P. Dynamic Soil-Structure Interaction / J. P. Wolf. – New Jersey : Prentice-Hall , Englewood Clis, 1985. – 466 p.

144. Wolf J. P. Some cornerstones of dynamic soil-structure interaction / J. P. Wolf, C. Song // Engineering Structures. – 2002. – Vol. 24, iss. 1. – P. 13–28.

145. Xianjian Y. Radiation damping of soil – foundations interaction systems / Y. Xianjian, J. Bei // International conference on case histories in geotechnical engineering / Missouri university of science and technology. – Missouri, 1998. – P. 1120–1124.

146. Zagilsky V. A. Soil modeling for seismic analysis of nuclear power plants / V. A. Zagilsky // Students Scientific Conference "Engineer of the 3-rd millennium" – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – С. 87-88.

## **ДОДАТОК А**

**Методика розрахунку коефіцієнтів жорсткості та демпфування ґрунтової основи проф. Дж. Газетаса**



## Еквівалентні динамічні характеристики і розсіювання енергії в основі для незагублених фундаментів

Режим переміщення	Динамічний коефіцієнт жорсткості $\bar{K} = K \cdot k(\omega)$			
	Статичний коефіцієнт жорсткості $K$		Динамічний коефіцієнт жорсткості $k$ (для розрахунку повного динамічного коеф.)	Демпферний коефіцієнт $C$ (для розрахунку повного демпфуючого коеф.)
	Прямокутна форма ( $L > B$ )	Квадратна форма ( $L = B$ )		
Вертикальний, $z$	$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} (0.73 + 1.54\chi^{0.75})$ де, $\chi = \frac{A_b}{4L^2}$	$K_z = \frac{4,54GB}{1-\nu}$	$k_z = k_z(L/B, \nu; a_0)$ рис. А.1(а)	$C_z = (pV_{La}A_b)\tilde{c}_z$ $\tilde{c}_z = \tilde{c}_z\left(\frac{L}{B}; \nu; a_0\right),$ рис. А.1 (с)
Горизонтальний, $y$	$K_y = \frac{2GL}{2-\nu} (2 + 2.50\chi^{0.85})$	$K_y = \frac{9GB}{2-\nu}$	$k_y = k_y\left(\frac{L}{B}; a_0\right),$ рис. А.1(б)	$C_y = (pV_sA_b)\tilde{c}_y$ $\tilde{c}_y = \tilde{c}_y\left(\frac{L}{B}; a_0\right),$ рис. А.1 (d)
Горизонтальний, $x$	$K_x = K_y - \frac{0.2}{0.75-\nu}GL\left(1 - \frac{B}{L}\right)$	$K_x = K_y$	$k_x \approx 1$	$C_x = pV_sA_b$
Коливання, $g_x$ Коливання, $g_y$	$K_{rx} = \frac{G}{1-\nu} I_{bx}^{0.75} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.25} \left(2.4 + 0.5\frac{B}{L}\right)$ $K_{ry} = \frac{3G}{1-\nu} I_{by}^{0.75} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.15}$	$K_{rx} = \frac{3,6GB^3}{1-\nu}$ $K_{ry} = K_{ry}$	$k_{rx} = 1 - 0.26a_0$ $k_{ry} = 1 - 0.30a_0$	$C_{rx} = (pV_{La}I_{bx})\tilde{c}_{rx}$ $\tilde{c}_{rx} = \tilde{c}_{rx}\left(\frac{L}{B}; a_0\right),$ рис. А.1 (е) $C_{ry} = (pV_{La}I_{by})\tilde{c}_{ry}$ $\tilde{c}_{ry} = \tilde{c}_{ry}\left(\frac{L}{B}; a_0\right),$ рис. А.1 (f)
Кручення, $t$	$K_t = 3,5GI_b^{0.75} \left(\frac{B}{L}\right)^{0,4} \left(\frac{I_b}{B^4}\right)^{0,2}$	$K_t = 8,3GB^3$	$k_t = 1 - 0.14a_0$	$C_t = (pV_sJ_b)\tilde{c}_t$ $\tilde{c}_t = \tilde{c}_t\left(\frac{L}{B}; a_0\right),$ рис. А.1 (g)

## Еквівалентні динамічні характеристики і розсіювання енергії в основі для заглиблених фундаментів

Режим переміщення	Статичний коефіцієнт жорсткості, $K_{emb}$	Динамічний коефіцієнт жорсткості, $k_{emb}(\omega)$ (для розрахунку повного динамічного коеф.)	Демпферний коефіцієнт, $C_{emb}(\omega)$ (для розрахунку повного демпфуючого коеф.)
Вертикальний, z	$K_{z,emb} = K_z [1 + (1/21)(D/B)(1 + 1.3\chi)] [1 + 0.2(A_w/A_b)^{2/3}]$ де $K_z \equiv K_{z,surface}$ знаходять з таблиці А.1 $A_w = (d) \times$ (периметр); $\chi = A_b/4L^2$	$(v \leq 0.40):$ $k_{z,emb} \cong k_z [1 - 0.09(D/B)^{3/4} a_0^2];$ $(v \cong 0.48): L/B = 1 - 2:$ $k_{z,emb} \cong k_z [1 - 0.09(D/B)^{3/4} a_0^2];$ $L/B > 3:$ $k_{z,emb} \cong k_z [1 - 0.35(D/B)^{1/2} a_0^{3.5}];$	$C_{z,emb} \cong C_z + \rho V_s A_w$ , де $C_z \equiv C_{z,surface}$ знаходять з таблиці А.1.
Горизонтальний, у	$K_{y,emb} = K_y \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{D}{B} \right)^{0.5} \right] \cdot \{1 + 0.52[(h/B)(A_w/L^2)]^{0.4}\}$ де $K_y \equiv K_{y,surface}$ знаходять з таблиці А.1	$k_{y,emb}$ та $k_{x,emb}$ знаходять в залежності від $L/B$ , $D/B$ , та $d/B$ для кожного $a_0$ з рис .2	$C_{y,emb} = C_y + 4\rho V_s B d + 4\rho V_{La} L d$ $C_{x,emb} = C_x + 4\rho V_{La} B d + 4\rho V_s L d$ где $C_y \equiv C_{y,surface}$ $C_x \equiv C_{x,surface}$ знаходять з таблиці А.1
Горизонтальний, х	$K_{x,emb} = K_x \cdot \left( \frac{K_{y,emb}}{K_y} \right)$ де $K_x \equiv K_{x,surface}$ знаходять з таблиці А.1	$k_{rx,emb} \cong k_{rx}$ $k_{ry,emb} \cong k_{ry} k_{rx}$ та $k_{ry}$ знаходять з таблиці А.1	$C_{rx,emb} = C_{rx} + \rho I_{bx} \left( \frac{d}{B} \right) \{ V_{La} (d^2/B^2) + 3V_s + V_s (B/L) [1 + (d^2/B^2)] \} \cdot \eta_r$ де $\eta_{rx} = 0.25 + 0.65\sqrt{a_0}$ $(d/D)^{-a_0/2} (D/B)^{-1/4}$ $C_{ry,emb}$ знаходять з $C_{ry}$ після заміни х на у, та перестановкою В з L у попередніх двох виразів. $a_0 = \omega B/V_s$

Продовження табл. А.2

Режим переміщення	Статичний коефіцієнт жорсткості, $K_{emb}$	Динамічний коефіцієнт жорсткості, $k_{emb}(\omega)$ (для розрахунку повного динамічного коеф.)	Демпферний коефіцієнт, $C_{emb}(\omega)$ (для розрахунку повного демпфуючого коеф.)
Коливання, $g_x$ Коливання, $g_y$	$K_{rx,emb} = K_{rx} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 1.26 \left(\frac{d}{B}\right) \cdot \\ \cdot [1 + (d/B)(d/B)^{-0.2}(B/L)^{0.5}] \end{array} \right\}$ $K_{ry,emb} = K_{ry} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0.92 \left(\frac{d}{L}\right)^{0.6} \cdot \\ \cdot [1.5 + (d/L)^{1.9}(d/L)^{-0.6}] \end{array} \right\}$ <p>де <math>K_{gx} \equiv K_{gx,surface}</math> та <math>K_{gy} \equiv K_{gy,surface}</math> знаходять з таблиці А.1</p>	$k_{x-ry,emb} \cong k_{y-rx,emb} \cong 1$	$C_{x-ry,emb} = (1/3)dC_{x,emb}$ $C_{y-rx,emb} = (1/3)dC_{y,emb}$
Кручення, $t$	$K_{x-ry,emb} \cong (1/3)dK_{x,emb}$ $K_{y-rx,emb} \cong (1/3)dK_{y,emb}$ $K_{t,emb} = K_t \cdot \Gamma_{tre} \text{ де } K_t = K_{t,surface} \text{ знаходять з таблиці А.1}$ $\Gamma_w = 1 + 0.4(D/d)^{0.5}(j_s/j_r)(B/D)^{0.6}$ $\Gamma_{tre} = 1 + 0.5(D/B)^{0.1}(B^4/I_{bz})^{0.13}$ $j_s = (4/3)d(B^3 + L^3) + 4BLd(L + B)$ $j_r = (4/3)BL(B^2 + L^2)$	$k_{r,emb} \cong k_{r,surface}$	$C_{t,emb} = C_t + 4\rho d[(1/3)V_{La}(L^3 + B^3) + V_sBL(L + B)] \cdot \eta_r$ <p>де <math>C_t \equiv C_{t,surface}</math> знаходять з таблиці А.1</p> $\eta_r \cong (d/D)^{-0.5} \cdot a_0^2/[a_0^2 + (1/2)(L/B)^{-1.5}]$

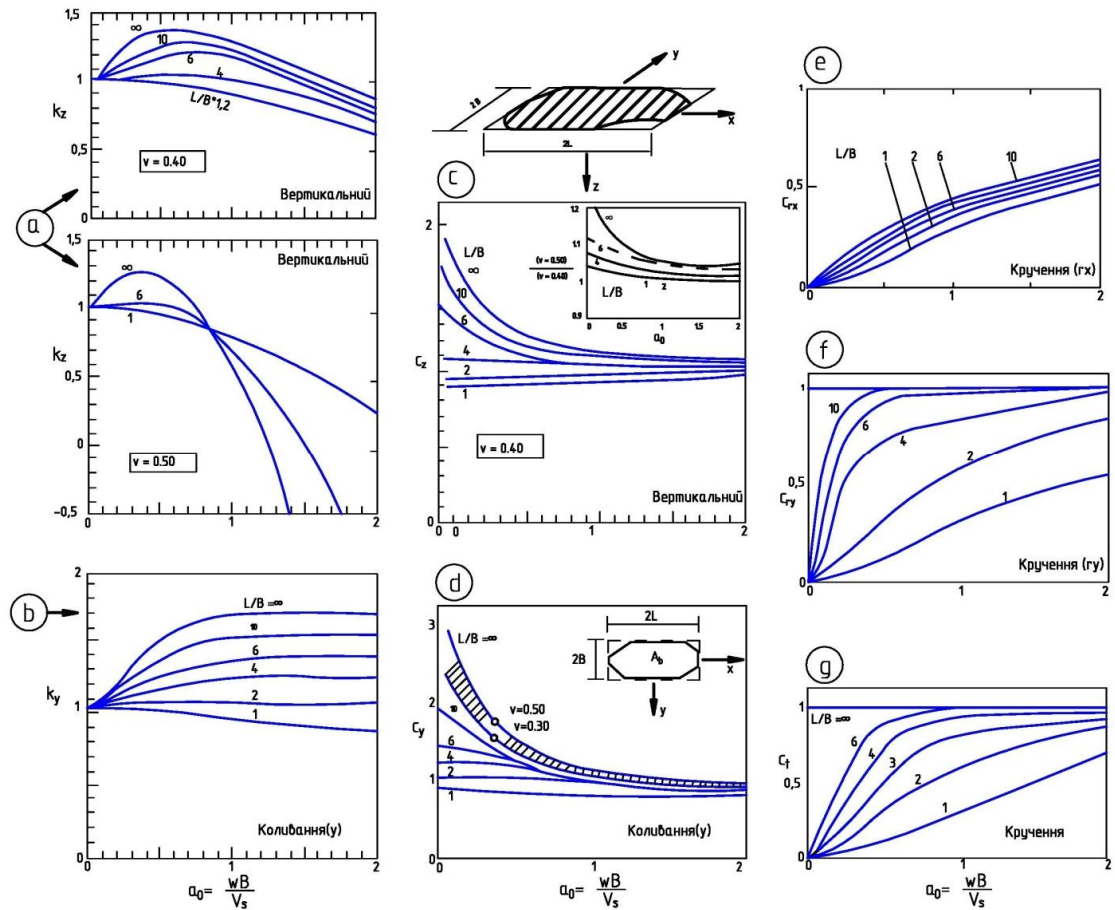


Рис. А.1 Графічний супровід таблиці А.1

Для визначення коефіцієнтів жорсткості ґрунтової основи для незаглиблених фундаментів необхідні такі значення:

$A_b, I_{bx}, I_{by}$  – площа, момент інерції відносно  $x$  і  $y$ ;

$B$  і  $L$  – напівширина і напівдовжина розглянутого прямокутника;

$G$  і  $\nu$  – модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона;

$\omega$  – кругова частота прикладеної сили (наприклад, максимальна частота акселерограми).

$V_s$  і  $V_{La}$  – швидкість поперечної хвилі та швидкість хвилі "Аналог Лісмера". Останній є видимою швидкістю поширення хвилі "стиснення – розтягнення" під фундаментом і залежить від  $V_s$  відповідно до формули:

$$V_{La} = \frac{3,4}{\pi(1 - \nu)} V_s \quad (\text{A.1})$$

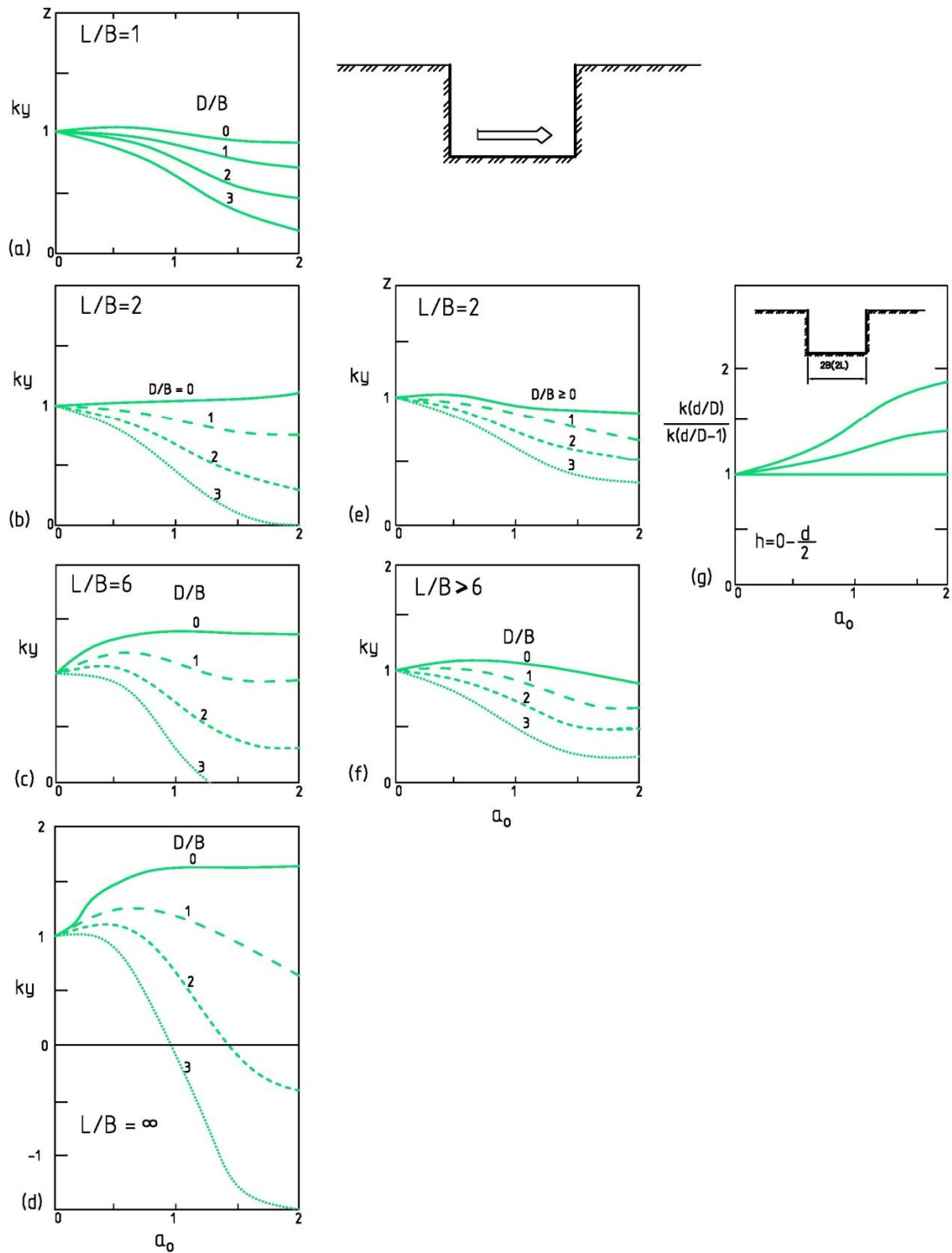


Рис. А.2 Графічний супровід таблиці А.2

Для визначення коефіцієнтів жорсткості ґрунтової основи для заглиблених фундаментів окрім вихідних даних, які використовуються для незаглиблених фундаментів необхідні такі значення:

$D$  – глибина залягання фундаменту;

$d$  – висота поверхні торкання з ґрунтовою основою.

**ДОДАТОК Б**  
**Об'ємно-планувальне і конструктивне рішення експериментально**  
**досліджуваної будівлі**

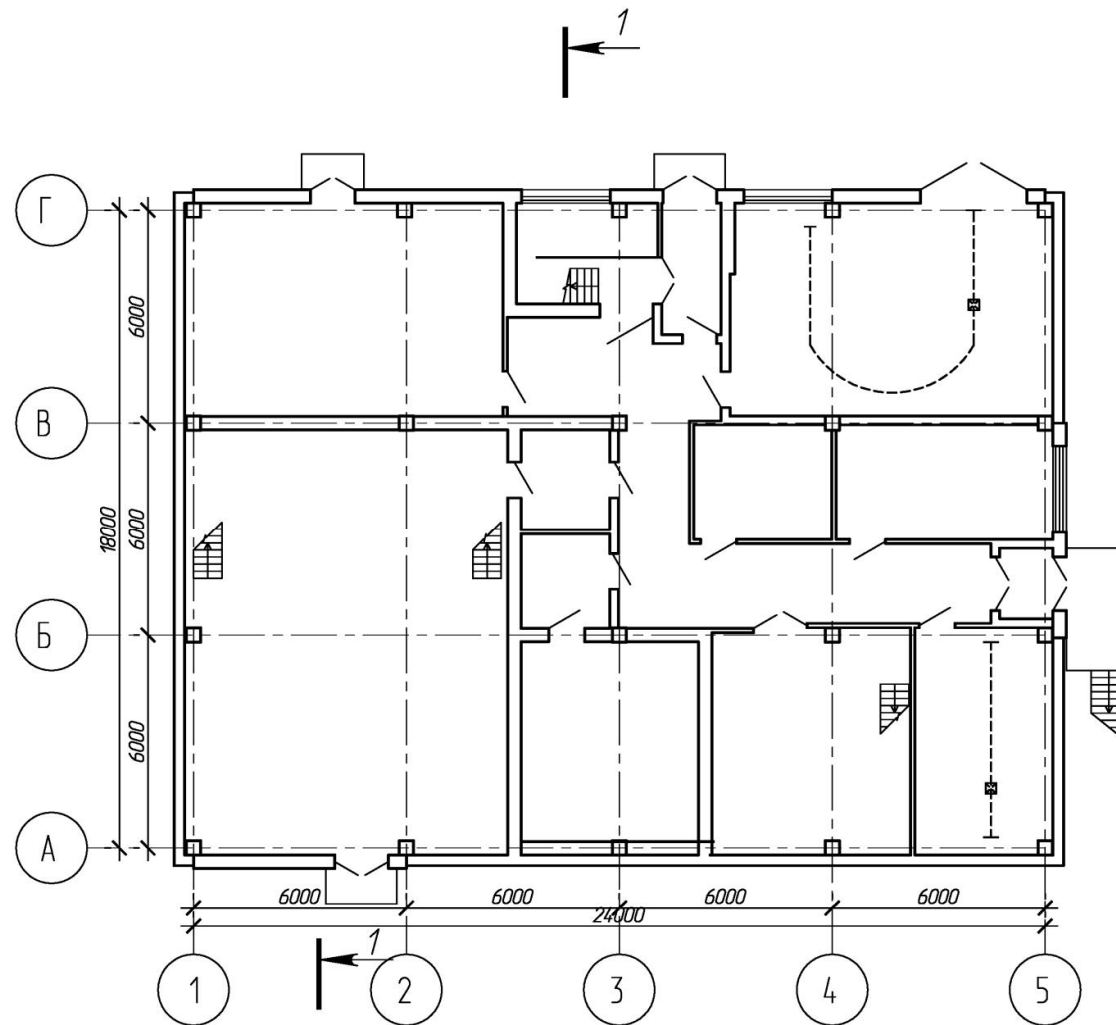


Рис. Б.1 План на відм.  $\pm 0,000$

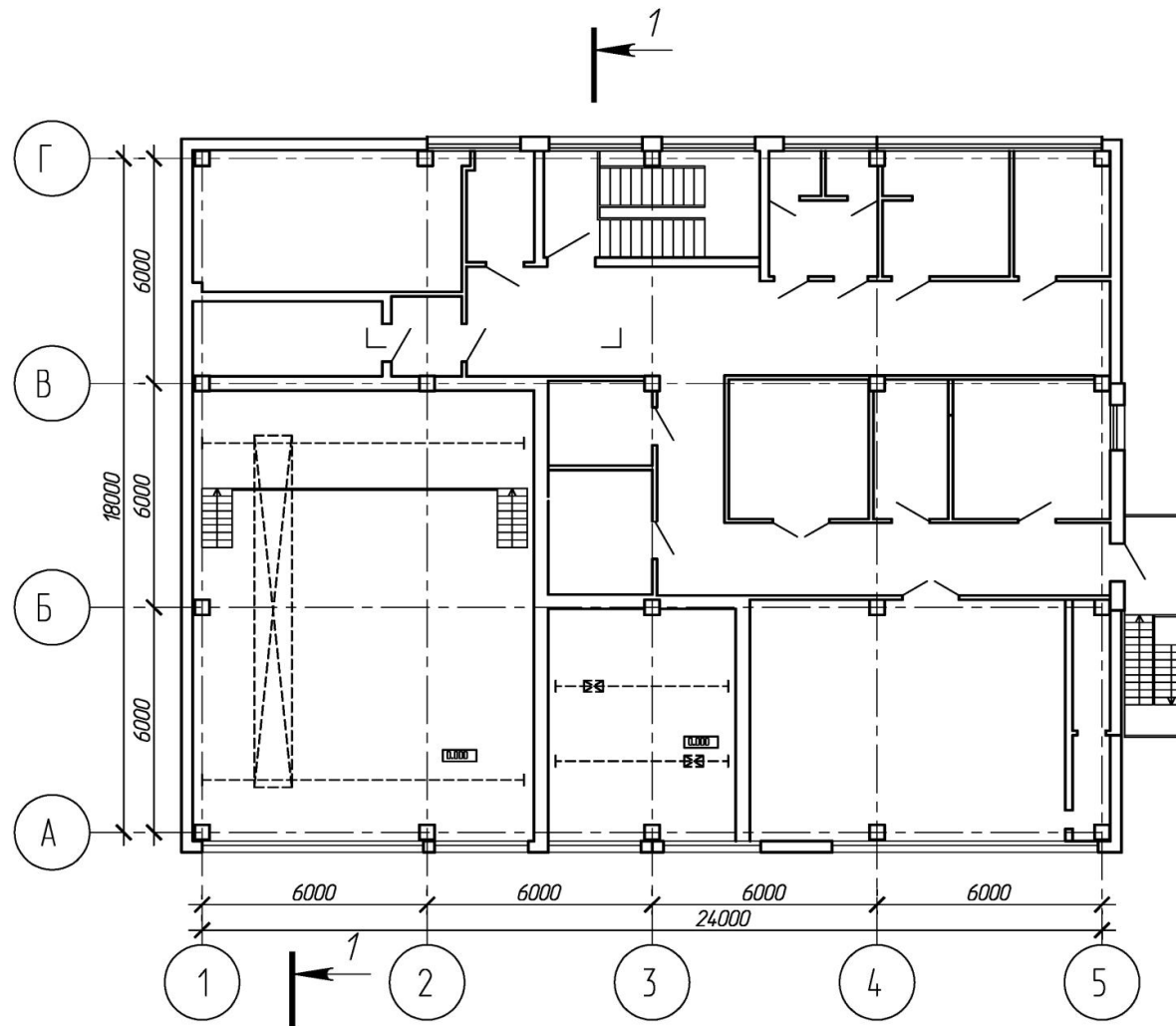


Рис. Б.2 План на відм. +4,200



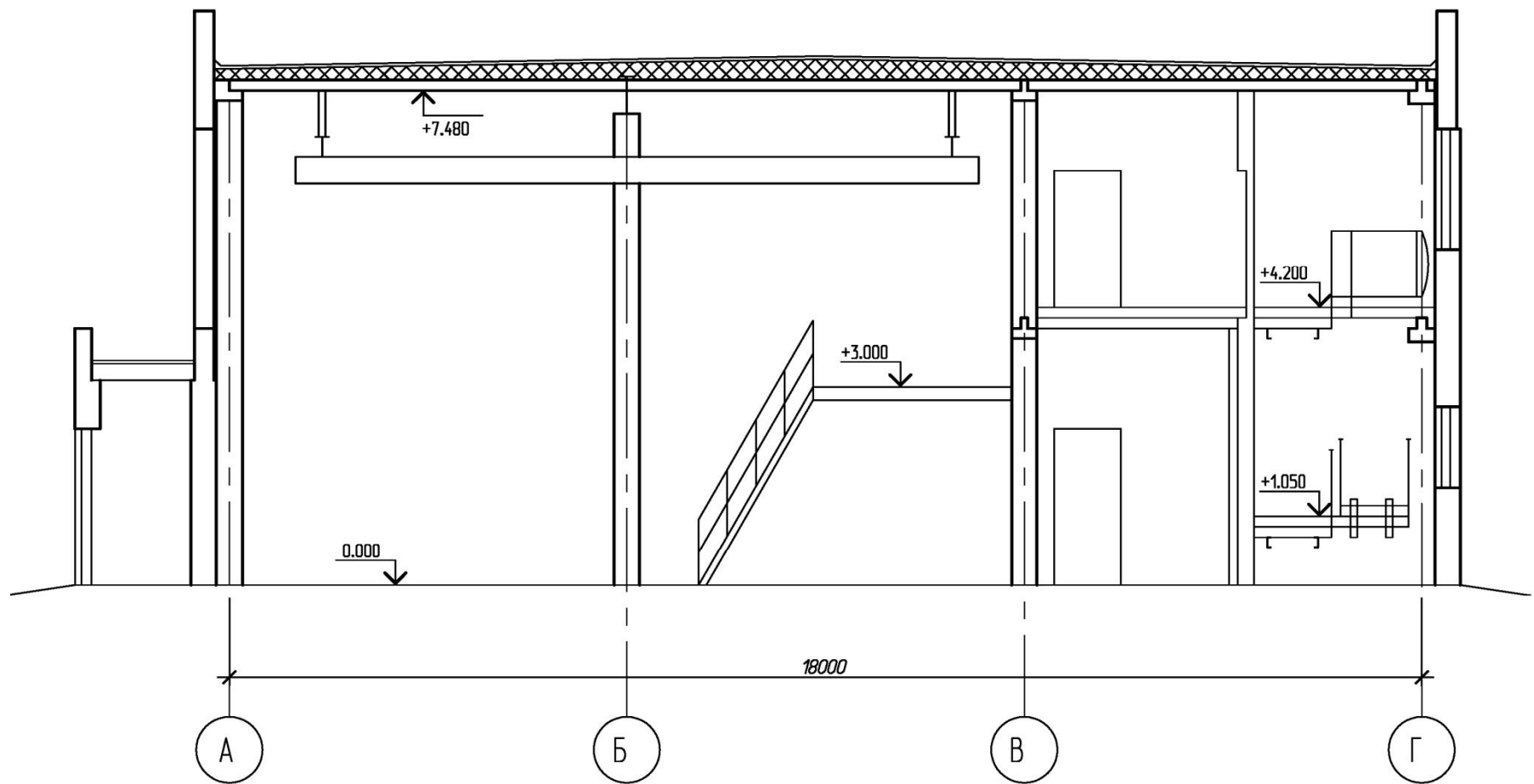


Рис. Б.3 Розріз 1-1

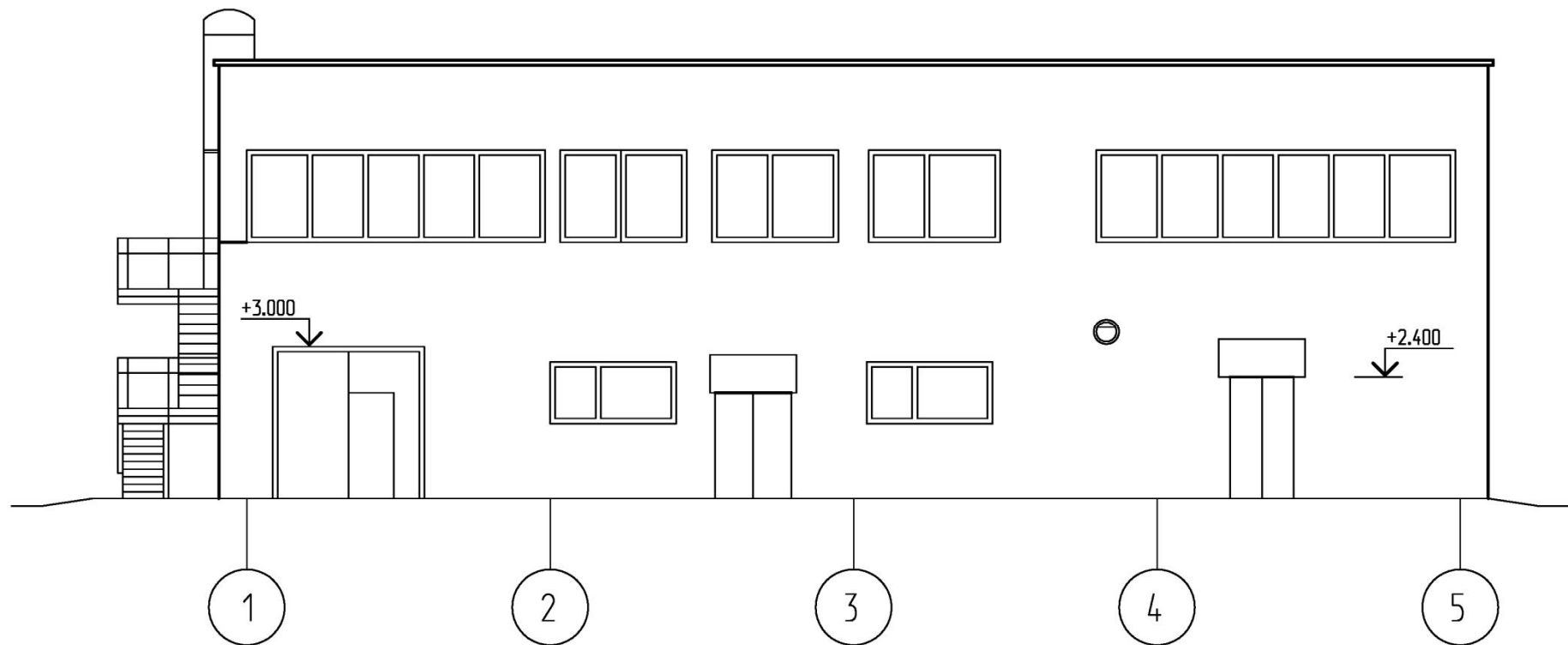


Рис. Б.4 Фасад 1-5

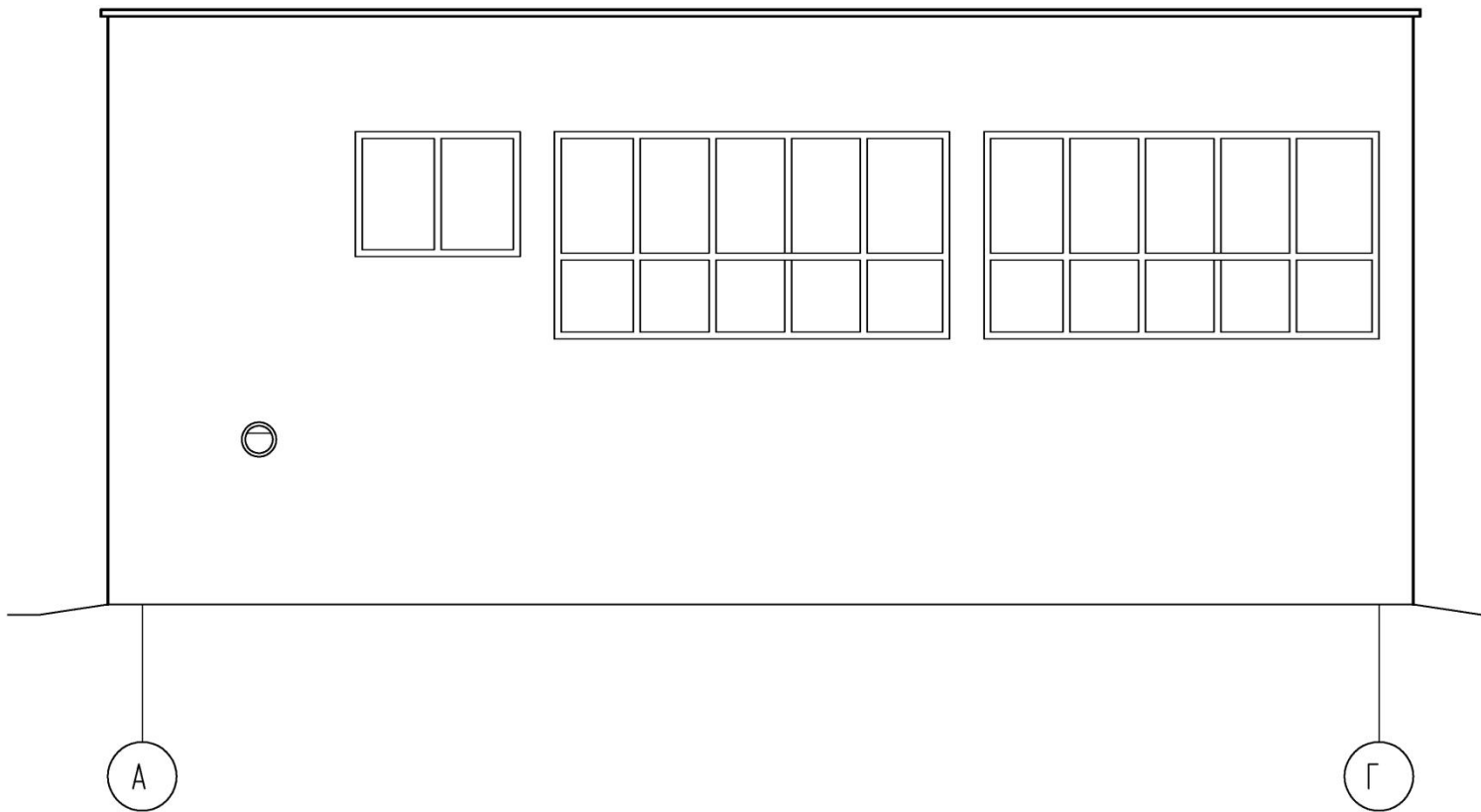


Рис. Б.5 Фасад А-Г

**ДОДАТОК В**  
**Порівняння результатів, отриманих чисельними та натурними**  
**дослідженнями**

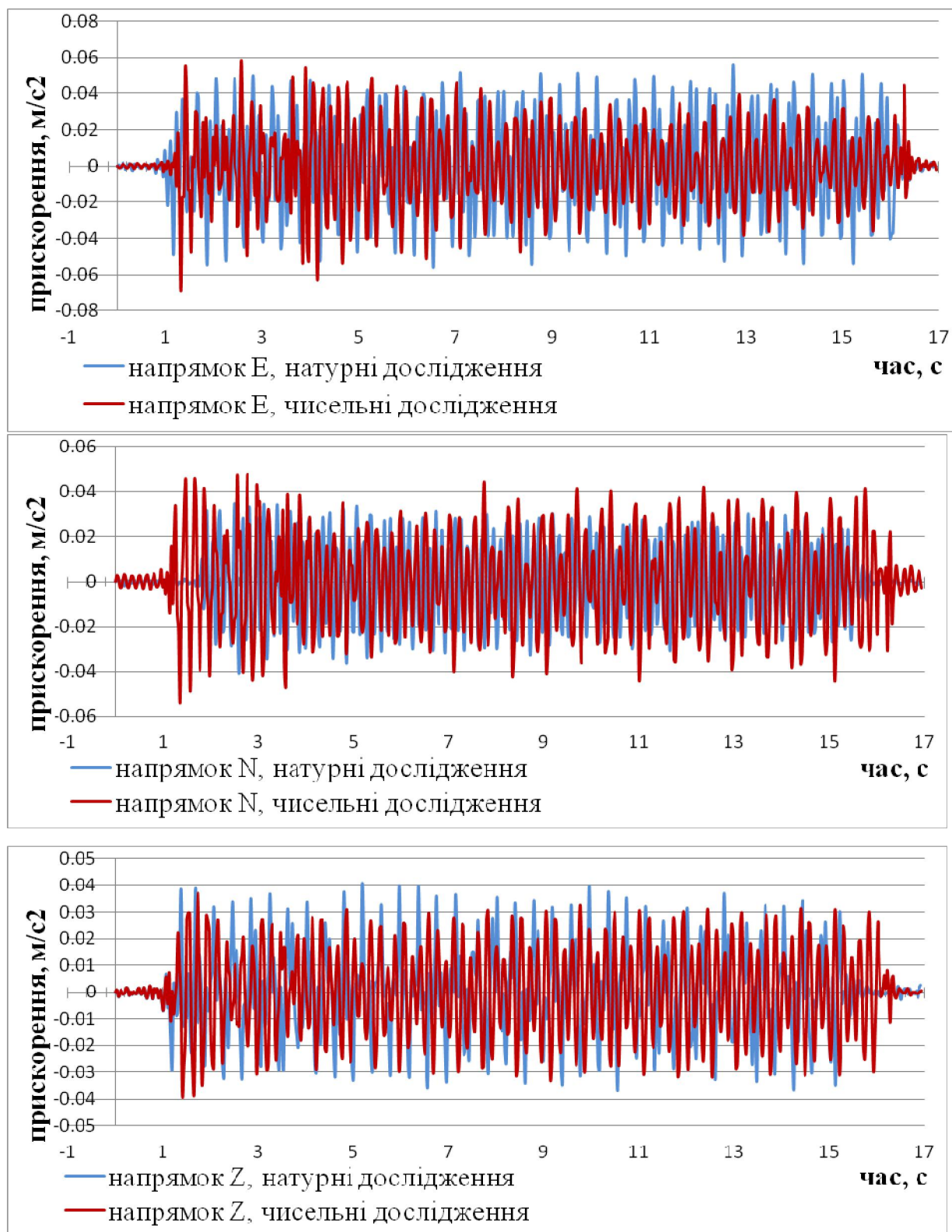


Рис. В.1. Порівняння характеру коливань прискорень натурних та чисельних досліджень. Метод проф. Дж. Газетаса.

Контрольна точка № 4

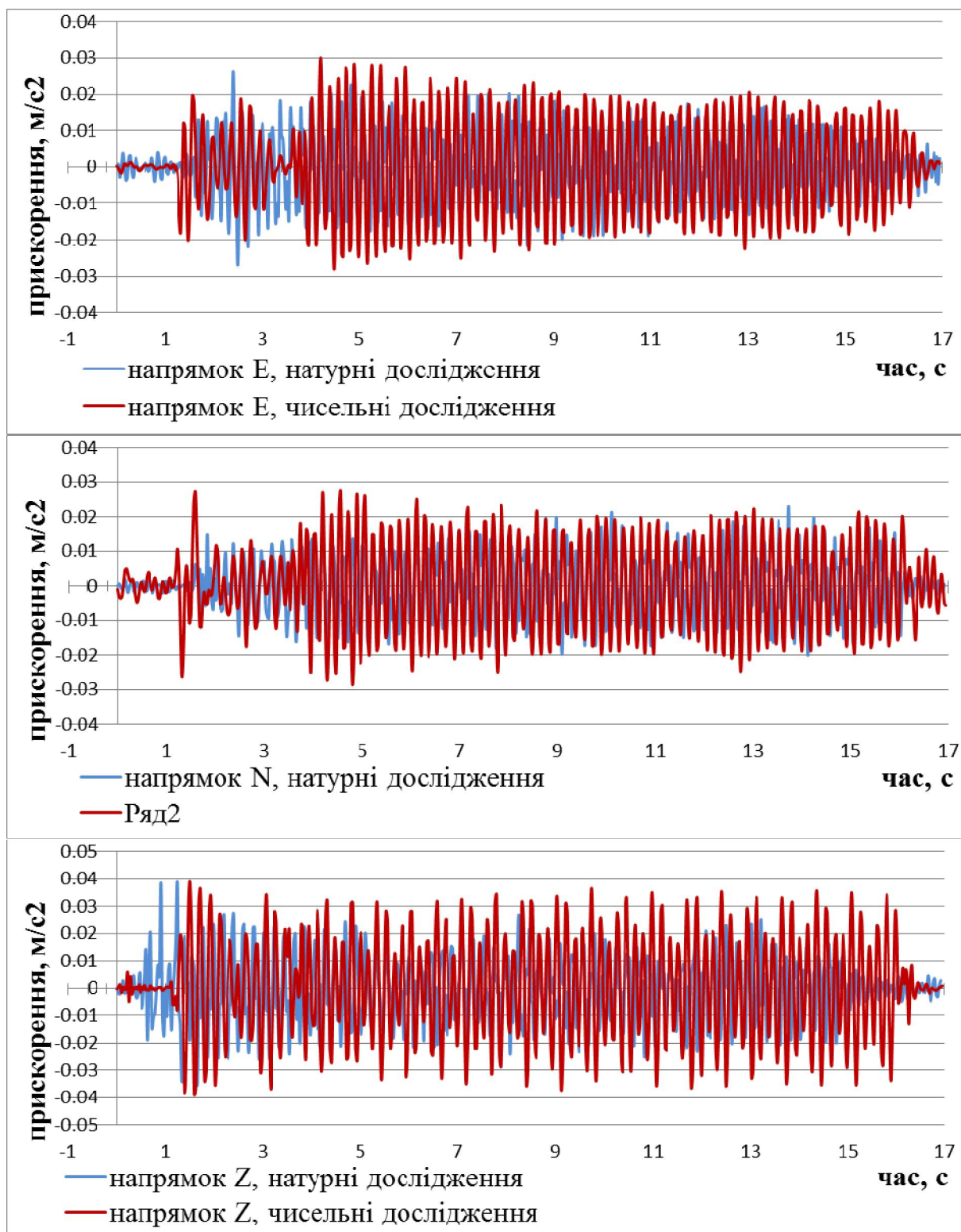


Рис. В.2. Порівняння характеру коливань прискорень натурних та чисельних досліджень. Метод проф. Дж. Газетаса.

Контрольна точка № 6

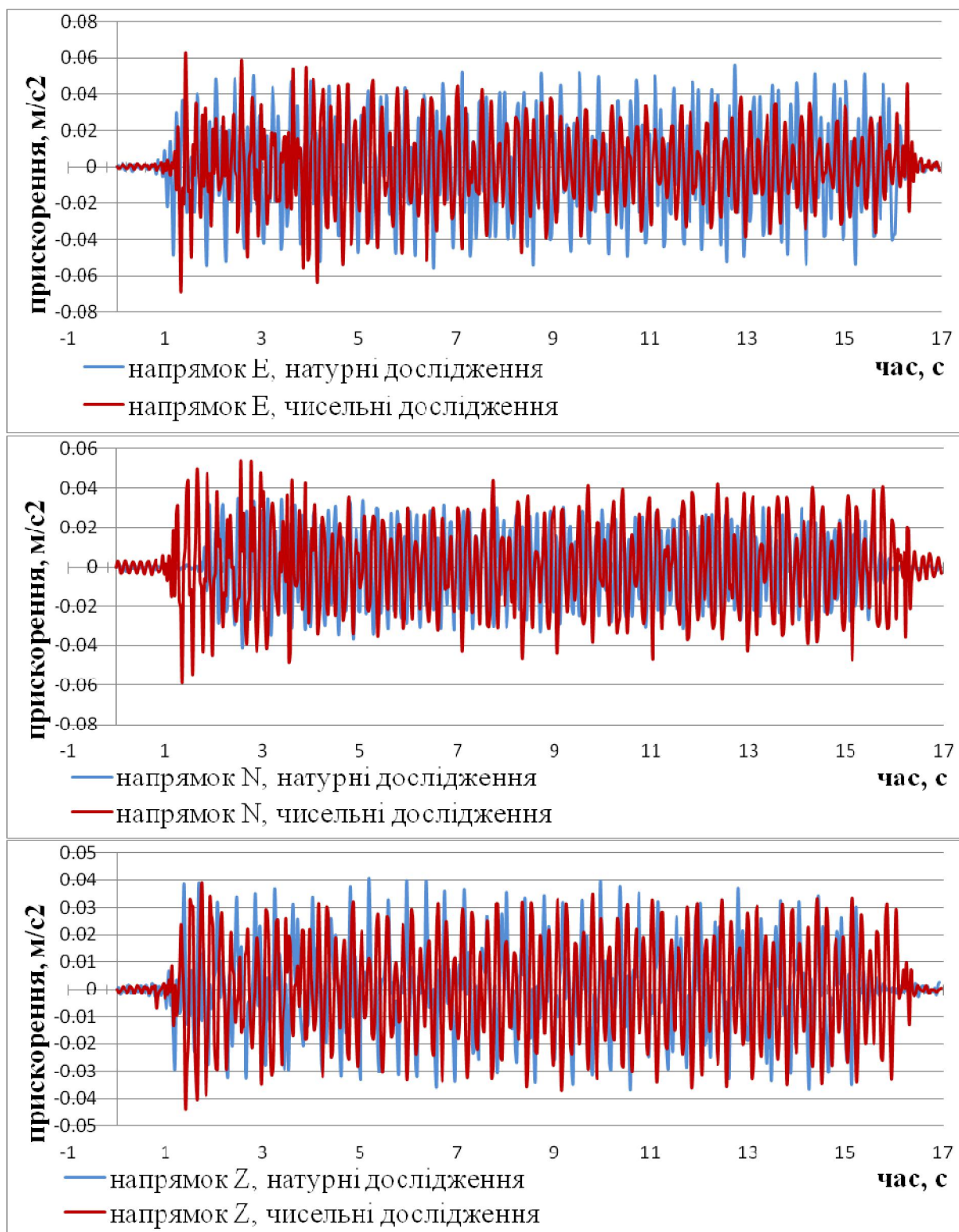


Рис. В.3. Порівняння характеру коливань прискорень натурних та чисельних досліджень. Методика проф. Бірбраєра.

Контрольна точка № 4



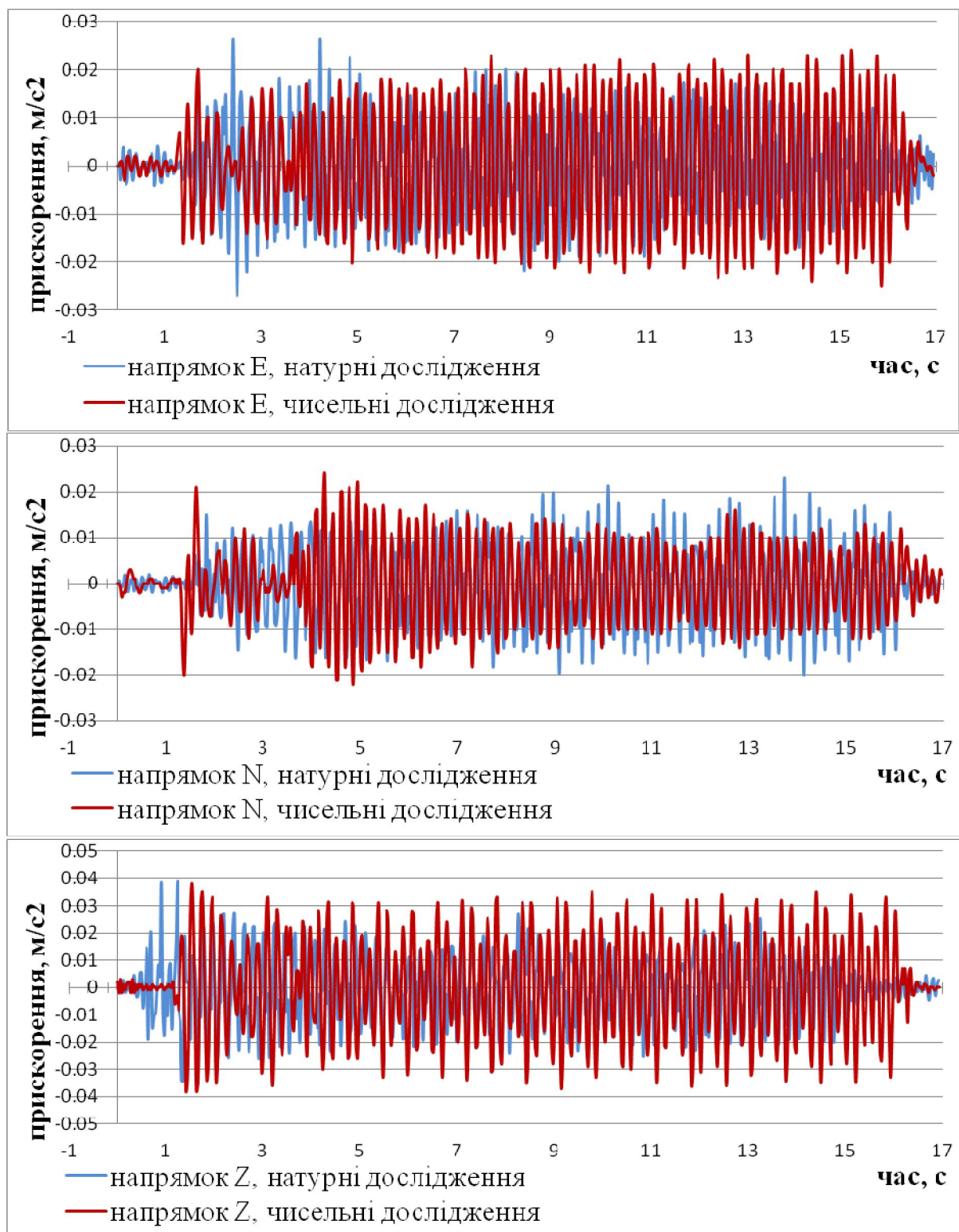


Рис. В.4. Порівняння характеру коливань прискорень натурних та чисельних досліджень. Методика проф. Бірбасера.

Контрольна точка № 6



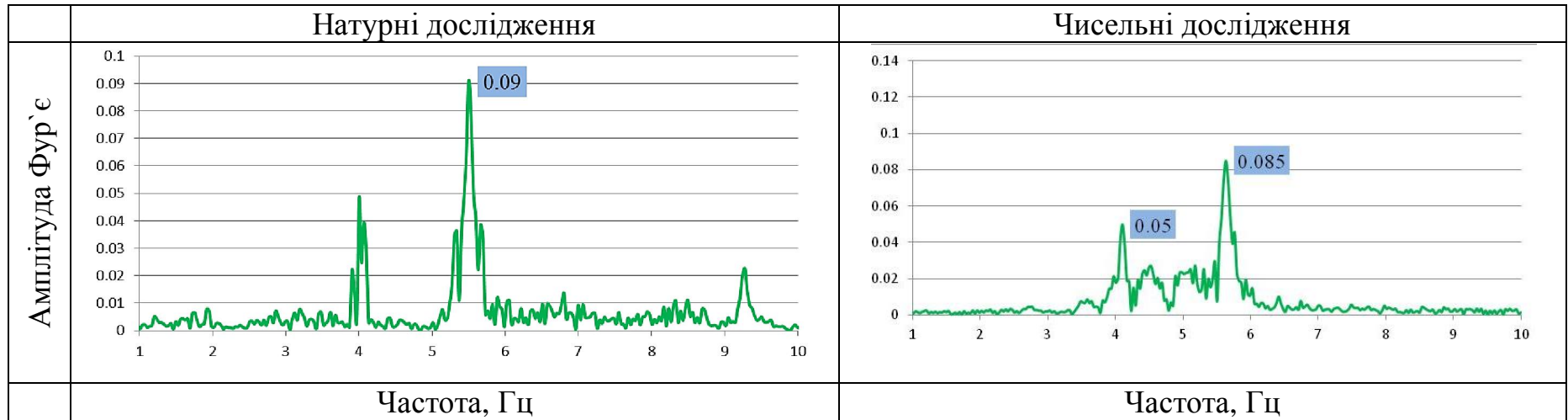
Графічне порівняння спектрів Фур'є отриманих за результатами чисельних (розрахунків ґрунтової основи за методикою Газетаса) та натурних досліджень по контрольній точці № 4 представлено в таблиці В.1.

Таблиця В.1

**Порівняння спектрів Фур'є отриманих за результатами чисельних і натурних досліджень**

	Натурні дослідження	Чисельні дослідження
Амплітуда Фур'є	<p>Graph showing the amplitude spectrum for natural investigation. The y-axis is labeled 'Амплітуда Фур'є' and ranges from 0 to 0.14. The x-axis is labeled 'Частота, Гц' and ranges from 1 to 10. Two peaks are highlighted with blue boxes: one at 0.06 Hz and a larger one at 0.1 Hz.</p>	<p>Graph showing the amplitude spectrum for numerical investigation. The y-axis ranges from 0 to 0.16. The x-axis is labeled 'Частота, Гц' and ranges from 1 to 10. Two peaks are highlighted with blue boxes: one at 0.07 Hz and a larger one at 0.13 Hz.</p>
Частота, Гц	<p>Graph showing the amplitude spectrum for natural investigation. The y-axis is labeled 'Амплітуда Фур'є' and ranges from 0 to 0.09. The x-axis is labeled 'Частота, Гц' and ranges from 1 to 10. Two peaks are highlighted with blue boxes: one at 0.05 Hz and a larger one at 0.082 Hz.</p>	<p>Graph showing the amplitude spectrum for numerical investigation. The y-axis ranges from 0 to 0.14. The x-axis is labeled 'Частота, Гц' and ranges from 1 to 10. Two peaks are highlighted with blue boxes: one at 0.06 Hz and a larger one at 0.11 Hz.</p>
Амплітуда Фур'є		
Частота, Гц		

Продовження табл. В.1



## **ДОДАТОК Г**

### **Обґрунтування густоти сітки скінченно-елементної моделі**

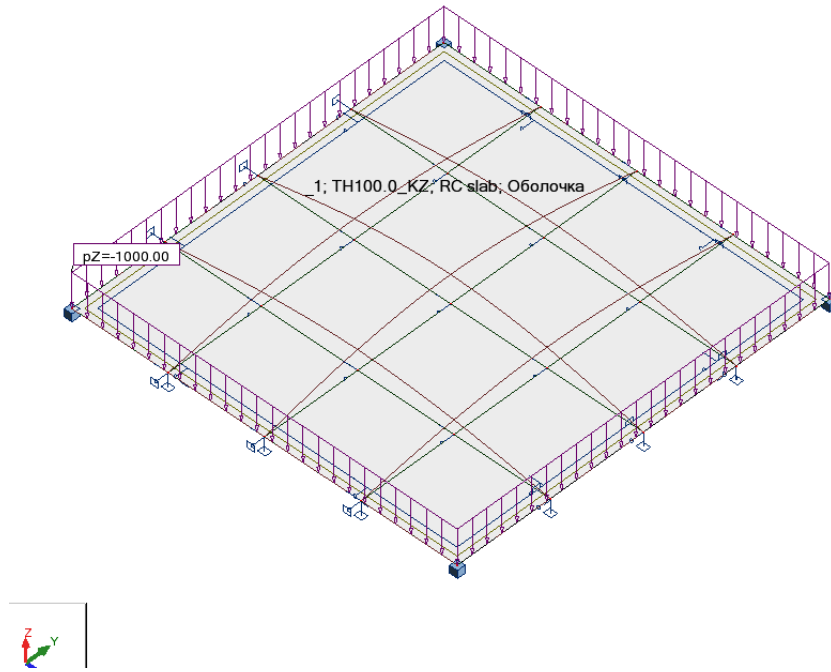


Рис. Г.1. Випробувальна модель для обґрунтування кроку сітки для RSA та ANSYS відповідно до верифікаційних тестів NAFEMS і AFNOR.

Перша форма коливань

Таблиця Г.1

**Порівняння похибок при різному кроці сітки скінченних елементів для RSA та ANSYS**

Номер форми коливань	Рішення NAFEMS (еталон)	Похиб %	Рішення вериф. тесту RSA	Рішення вериф. тесту ANSYS
	Гц		Гц	Гц
Шаг сітки 4×4				
1	45.897	<b>4.48</b>	43.84	46,3
2, 3	109.44	<b>7.36</b>	101.39	-
4	167.89	<b>16.83</b>	139.63	-
5, 6	204.51	<b>14.28</b>	175.30	-
Шаг сітки 8×8				
1	45.897	<b>1.13</b>	45.38	46,3
2,3	109.44	<b>1.00</b>	108.35	-
4	167.89	<b>1.13</b>	166.00	-
5, 6	204.51	<b>1.10</b>	202.26	-
Шаг сітки 16×16				
1	45.897	<b>0.36</b>	45.73	46,3
2,3	109.44	<b>1.38</b>	107.93	-
4	167.89	<b>1.00</b>	166.22	-
5, 6	204.51	<b>1.34</b>	210.56	-

Результати розрахунку показують, що прийнятна похибка (близько 1 %) порівнянно з еталонним аналітичним рішенням досягається при розбитті пластини з кроком сітки  $8 \times 8$ , що відповідає восьми скінченим елементам і семи вузлам скінчених елементів на відстані прольоту пластини, вільного від закріплення. Подальше ущільнення кроку сітки не дає істотного поліпшення результату.

Крім того, крок сітки скінчених елементів  $8 \times 8$  відповідає відношенню довжини скінченного елемента до висоти рівному 1,25.

Висновки розрахунку підтверджуються інженерною практикою, що викладена у відповідній літературі [18, 55, 58]

Таким чином, орієнтовні параметри сітки скінчених елементів прийняті відповідно до верифікаційних тестів [106], інженерної практики [107] і перевірочних розрахунків на даній моделі і склали середнє розбивання вільного прольоту елементів-пластин на 8 скінчених елементів.

**ДОДАТОК Д**  
**Довідки про впровадження**

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
 Головний інженер (перший заступник  
 генерального директора)  
 ВП «Запорізька АЕС»

"23" вересня 2016 р.

Оприлюднено



### АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи по удосконаленню методу розрахунку динамічної взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда" для атомних електростанцій

Ми, що підписалися нижче представники ВП «Запорізька АЕС: начальник СЕБтаС Гавриляк В.Д., провідний інженер Родна В.А.

представники ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»: Завідувач лабораторії дослідження атомних та теплових електростанцій Бауск Є. А., завідувач кафедри основ і фундаментів д.т.н., проф. Седін В. Л., аспірант кафедри основ і фундаментів Загільський В. А.

склали цей акт про впровадження результатів науково-дослідної роботи аспіранта кафедри основ і фундаментів Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Загільського Віталія Анатолійовича в практику виконання робіт по розрахунку сейсмічних параметрів (поверхових акселерограм і спектрів відгуку) та оцінці сейсмостійкості будівель і споруд, що містять устаткування СВБ енергоблоків №1, 2, 3, 4 ВП ЗАЕС.

Практична реалізація результатів науково-дослідної роботи полягає в визначенні динамічного відгуку об'єднаної системи "основа – фундамент – споруда" на вплив, який був викликаний землетрусом та в обчисленні набору спектрів відгуку і акселерограм на підшві фундаменту будівель і споруд ВП ЗАЕС. Отримані спектри відгуку на підшві фундаменту будівель і споруд ВП ЗАЕС в подальшому використовуються для розрахунків поверхових спектрів відповідей і визначення сейсмостійкості будівель і споруд Запорізької атомної електростанції, що містять обладнання систем важливих для безпеки.

Акт підписали:

від ДВНЗ ПДАБА

Зав. кафедри основ і фундаментів,  
 д.т.н., проф.

Седін В. Л.

Зав. ЛДАТАТЕ

Бауск Є. А.

Аспірант

Загільський В. А.

Від ВП ЗАЕС

Начальник СЕБтаС

Гавриляк В.Д.

Провідний інженер

Родна В.А.





МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ



НАЦІОНАЛЬНА АТОМНА  
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА КОМПАНІЯ  
Відокремлений підрозділ  
Южно-Українська АЕС

№ 42/12361 від 05.09 2016 р.

на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ р.

Україна, 55000, м. Южноукраїнськ, Миколаївської обл.  
тел.: (044) 287-26-61; (05136) 4-22-22  
факс: (05136) 4-11-70; 2-18-32  
E-mail: office@sunpp.atom.gov.ua

Р/р 26004103087001 в ЗАТ «Альфа-Банк»,  
МФО 300346, ЄДРПОУ 20915546,  
01025, м. Київ

Про направлення відгуку

Ректору ГВУЗ «Придніпровская  
государственная академия  
строительства и архитектуры»  
проф. В.И. Большакову  
49600, Украина, г. Днепропетровск  
ул. Чернышевского, 24-а  
тел./факс (0562) 47-02-63

**Уважаемый Владимир Иванович!**

Направляю Вам відгук про впровадження результатів науково-дослідної роботи по експериментальному обґрунтуванню розрахункових методів оцінки динамічної взаємодії в системі "основа – фундамент – споруда" для конструкцій АЕС.

Державним вищим навчальним закладом «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» була виконана науково-дослідна робота по отриманню поверхових спектрів відгуків та максимальних прискорень по нормованих акселерограмах більш 0,1 g. Вказані роботи отримали практичне використання при кваліфікації обладнання та оцінці запасу сейсмостійкості будівель і споруд ВП ЮУАЕС що містять обладнання систем важливих для безпеки:

- Реакторні відділення енергоблоків №№ 1, 2, 3;
- Резервна дизельна електростанція I та II черги;
- Загальностанційна дизельгенераторна станція ДГС ЗДГ 4;
- Спецкорпус енергоблоків №№ 1, 2, 3;
- Машзал. Деаераторне відділення енергоблоків №№ 1, 2, 3.

Практична реалізація результатів науково-дослідної роботи дало можливість:

- визначити напружено-деформований стан несучих конструкцій будівель і споруд під дією сейсмічного впливу в системі "основа – фундамент – споруда";
- розрахувати сейсмічні параметри (поповерхові акселерограми та спектри відгуку) для будівель і споруд під дією сейсмічного впливу в системі "основа – фундамент – споруда".

Отримані за допомогою врахування рекомендацій науково-дослідної роботи результати в подальшому використовуються для підтвердження можливості технологічного обладнання виконувати свої функції на сейсмічний вплив (кваліфікація обладнання).

**З повагою,  
заступник головного інженера  
з продовження терміну експлуатації,  
технології та інжинірингу**

Сухинін В.П.

  
**І. В. Кравченко**

\*13818(6)



## ДОВІДКА

Результати науково-дослідної роботи аспіранта кафедри основ і фундаментів Державного вищого навчального закладу "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури" Загільського Віталія Анатолійовича на тему: "Удосконалення розрахункового методу аналізу динамічної взаємодії системи "основа – фундамент – споруда" для атомних електростанцій" були впроваджені та отримали практичну реалізацію при розрахунку сейсмічних параметрів (поповерхові акселерограми та спектри відгуку) та визначення напружено-деформованого стану несучих конструкцій будівель і споруд ВП ЮУАЕС під дією сейсмічного впливу в системі "основа – фундамент – споруда".

Роботи виконувались в рамках договору на тему "Отримання поетажних спектрів відгуків та максимальних прискорень по нормованих акселерограмах більш 0,1g і оцінка запасу сейсмостійкості будівель і споруд ВП ЮУ АЕС, що містять устаткування СВБ".

Проректор з наукової роботи  
д.т.н., професор



Савицький М. В.

Зав. кафедри основ і фундаментів,  
д.т.н., проф.

Седін В. Л.

Зав. лабораторії дослідження  
атомних та теплових  
електростанцій

Бауск С. А.

# "ФУНДАМЕНТСТРОЙМАКС"

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

**LLC "FUNDAMENTSTROYMAKS"**

Юридична адреса:  
49000, м. Дніпропетровськ, пров. Добровольців, 15,  
Поштова адреса (місцезнаходження):  
52071, Дніпропетровська обл., Дніпропетровський  
район, с. Дослідне, вул. Наукова, 54а оф. 48,  
моб. телефон: +38(050)3429888  
E-mail: [stroymaks@ukr.net](mailto:stroymaks@ukr.net);  
Офіційний сайт: [www.stroymaks.com.ua](http://www.stroymaks.com.ua)  
Код ЄДРПОУ: 35267387  
DUNS: 365104128

Legal address:  
49000, 15 Dobrovoltsiv Lane, Dnipropetrovsk, Ukraine  
Actual address:  
52071, Dnipropetrovsk dist., Dnipropetrovsk reg., vil.  
Doslidne, Naukova str, 54a of. 48,  
mob. tel.: +38(050)3429888  
E-mail: [stroymaks@ukr.net](mailto:stroymaks@ukr.net);  
Web-site: [www.stroymaks.com.ua](http://www.stroymaks.com.ua)  
UA Company code: 35267387  
DUNS: 365104128

№ 9/5509-16 від 9 серпня 2016р

Ректору ДВНЗ "Придніпровська державна  
академія будівництва та архітектури"  
проф., д.т.н. Большакову В. І.

## ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

дисертаційної роботи

Загільського Віталія Анатолійовича на тему: "Удосконалення розрахункового  
методу аналізу динамічної взаємодії системи "основа – фундамент – споруда"  
для атомних електростанцій"

Результати досліджень, що викладені в дисертаційній роботі  
Загільського В. А., дозволили врахувати взаємодію елементів системи  
"грунтова основа – фундамент – споруда" при сейсмічному впливі та отримати  
поповерхові спектри реакції реакторних відділень № 1, 2 Запорізької атомної  
електростанції. Отримані результати в подальшому використовуються при  
визначенні максимальних сейсмічних навантажень при яких зберігається  
сейсмостійкість елементів трубопроводів та устаткування з урахуванням їх  
фактичного технічного стану.

Практичне використання результатів науково-дослідної роботи дало  
можливість виконати розрахунки елементів трубопроводів на сейсмічне  
навантаження з урахуванням їх фактичного розміщення на відмітках будівлі,  
що є важливим фактором для забезпечення експлуатаційної надійності  
енергоблоків № 1, 2 ВП ЗАЕС.

Директор ТОВ «Фундаментстроймакс»  Алексенко О. С.

Головний інженер проекту розрахунку  
сейсмостійкості трубопроводів  
будівель РВ-1, РВ-2 ВП ЗАЕС

 Прядка В. А.

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Ректор Державного вищого  
навчального закладу  
"Придніпровська державна  
академія будівництва та  
архітектури"



*В. І. Большаков*  
В. І. Большаков

" 08 " 2016 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційної роботи Загільського В. А.

"Удосконалення розрахункового методу аналізу динамічної взаємодії системи  
"основа – фундамент – споруда" для атомних електростанцій"

Ми, що підписалися нижче, начальник навчального відділу д. т. н., доц. Тріфонов І. В., завідувач кафедри основ і фундаментів д. т. н., проф. Седін В. Л., учений секретар кафедри основ і фундаментів к. т. н., доц. Левченко Г. М., склали даний акт про те, що результати досліджень Загільського В. А. були використані в навчальному процесі ДВНЗ ПДАБА при викладанні спецкурсу на випускаючій кафедрі та виконанні магістерських робіт зі спеціальності 192 "Будівництво та цивільна інженерія".

Начальник навчального відділу,  
д. т. н., доц.

Тріфонов І. В.

Завідувач кафедри основ і фундаментів,  
д. т. н., проф.

Седін В. Л.

Учений секретар кафедри  
основ і фундаментів, к. т. н., доц.

Левченко Г. М.

## **ДОДАТОК Е**

**Сертифікати відповідності для використовуваного розрахункового  
програмного забезпечення**



від 25 липня 2016 р.

## ДОВІДКА

Загільський Віталій Анатолійович, який працює на посаді наукового співробітника лабораторії досліджень атомних та теплових електростанцій НДЧ Придніпровського науково-освітнього інституту інноваційних технологій в будівництві ПДАБА, в розрахунках взаємодії елементів системи "основа – фундамент – споруда", користувався ліцензійним програмним комплексом для розрахунку та проектуванню конструкцій "Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2013", яка є в наявності в лабораторії ЛДАтаТЕ.

Проректор з наукової роботи  
д.т.н., професор



М. В. Савицький