

УДК 624.15

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ СУПЕРЕЛЕМЕНТІВ В ЗАДАЧАХ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ «ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – БУДІВЛЯ»

САХАРОВ В. О. *, к. т. н, доцент,

* Кафедра основ і фундаментів, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітрофлотський, 31, Київ, 03680, Україна, тел. +38 (044) 275-85-71, e-mail: vladland@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9381-3283

Анотація. Постановка проблеми. В сучасних умовах оцінка динамічної поведінки будівель і споруд проводиться на базі чисельного моделювання. Складність і трудомісткість розв'язку задач динаміки спонукає шукати шляхи обґрунтованого спрощення моделей та залучення передових алгоритмів із використанням сучасних комп'ютерних технологій. Для багатьох будівель характерним є наявність конструктивних структурних елементів, які багаторазово повторюються (наприклад типові поверхи). Цю властивість доцільно використовувати для підвищення ефективності чисельних методів за рахунок редукції системи рівнянь, яка також повинна задовольняти вимогам прямих методів інтегрування. Сучасні методи та комп'ютерні засоби дозволяють проводити розрахунки задач динаміки з урахуванням нелінійного деформування середовищ. Такі задачі мають систему рівнянь з мільйонами невідомих і потребують значних ресурсів та часу розрахунку. Для зменшення порядку систем рівнянь найчастіше використовуються методи динамічної редукції (наприклад редукції Гайана) або методи розв'язку підконструкцій. В роботі Ray W. Clough зазначається, що динамічні властивості СЕМ мають більш високий рівень апроксимації, ніж механічні. Для будівель і споруд найбільш зручно застосовувати метод підконструкцій з представленням переміщень через власні форми, запропонований Крейгом-Бемптоном (Craig Jr. R.R., Vampton M.) та ін. авторами. Проте запропоновані варіанти призводять до недиагональних матриць мас і обмежують ефективне використання явних схем інтегрування. **Мета.** В роботі запропоновано реалізацію методики розв'язку задач динаміки високого порядку на базі явних методів із використанням спектральних суперелементів для виділених підконструкцій. Застосування такого підходу дозволяє зменшити порядок системи алгебраїчних рівнянь та проводити динамічний, в т.ч. сейсмічний аналіз будівель і споруд з урахуванням нелінійного деформування ґрунтів основи. **Висновок.** В роботі представлено методику використання суперелементної технології розв'язку задач динаміки для дослідження взаємодії будівель з основою. На базі підходу Крейга-Бемптона запропоновано варіант отримання матриці редукції для розробленого суперелементу спектрального (SES) для прийнятої підконструкції, що забезпечує збереження діагональної матриці мас, і дозволяє використовувати ефективні явні методи інтегрування. Приведені результати дослідження взаємодії будівлі з нелінійною ґрунтовою основою при дії сейсмічних навантажень. Показано, що використання спектральних суперелементів (SES) забезпечило зменшення порядку системи рівнянь більш ніж в 2,8 рази, при збереженні необхідної точності результатів розрахунку. Представлена методика розв'язку динамічних задач із використанням запропонованих спектральних суперелементів (SES) дозволяє суттєво зменшити порядок системи рівнянь задач і дозволяє проводити дослідження динамічної поведінки будівель і споруд в складі системи «основа – фундамент – будівля» з урахуванням нелінійного деформування ґрунтів основи на базі явних схем чисельного інтегрування.

Ключові слова: метод скінченних елементів, явний метод, спектральний суперелемент, АСНД «VESNA-DYN», багатопверхові будинки, система «основа – фундамент – будівля».

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СУПЕРЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ - ФУНДАМЕНТ – ЗДАНИЕ»

САХАРОВ В. А. *, к. т. н, доцент,

* Кафедра оснований и фундаментов, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, пр. Воздухофлотский, 31, Киев, 03146, Украина, тел. +38 (044) 275-85-71, e-mail: vladland@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9381-3283

Аннотация. Постановка проблемы. В современных условиях оценка динамического поведения зданий и сооружений проводится на базе численного моделирования. Сложность и трудоемкость решения задач динамики побуждает искать пути обоснованного упрощения моделей, а также привлечения передовых алгоритмов с использованием современных компьютерных технологий. Для многих зданий характерно наличие конструктивных элементов, которые многократно повторяются (например, типовые этажи). Это свойство целесообразно использовать для повышения эффективности численных методов за счет редукции системы уравнений, которая при этом также должна удовлетворять требованиям явных методов интегрирования.

Современные методы и компьютерные средства позволяют проводить расчеты задач динамики с учетом нелинейного деформирования сред. Такие задачи имеют систему уравнений с миллионами неизвестных и требуют значительных ресурсов и времени расчета. Для уменьшения порядка систем уравнений чаще всего используются методы динамической редукции (например редукции Гайана) или методы с использованием подконструкций. В работах Ray W. Clough отмечается, что динамические свойства КЭМ имеют более высокий уровень аппроксимации, чем механические. Для зданий и сооружений наиболее целесообразно применять метод подконструкций с представлением перемещений через собственные формы, предложенный Крейгом-Бемптоном (Craig Jr. R.R., Bampton M.) и др авторами. Однако существующие варианты приводят к недиагональным матрицам масс и ограничивают использование эффективных явных схем интегрирования. **Цель.** В работе предложено реализация метода решения задач динамики высокого порядка на базе явных методов с использованием спектральных суперэлементов для выделенных подконструкций. Применение такого подхода позволяет уменьшить порядок системы уравнений и проводить динамический, в т.ч. сейсмический анализ поведения зданий с учетом нелинейного деформирования грунтов. **Выводы.** В работе представлена методика использования суперэлементной технологии решения задач динамики для исследования взаимодействия зданий с основанием. На базе подхода Крейга-Бемптона предложен вариант получения матрицы редукции разработанного суперэлемента спектрального (SES) для принятой подконструкции, что обеспечивает сохранение диагональной матрицы масс, и позволяет использовать эффективные явные методы интегрирования. Приведены результаты исследования взаимодействия здания с нелинейным грунтовым основанием при действии сейсмических нагрузок. Показано, что использование SES суперэлементов обеспечило уменьшение порядка системы уравнений более чем в 2,8 раза, при сохранении необходимой точности результатов расчета. Представленная методика расчета динамических задач с использованием SES суперэлементов позволяет существенно уменьшить порядок системы уравнений задач и позволяет проводить исследования динамического поведения зданий и сооружений в составе системы «основание – фундамент – здание» с учетом нелинейного деформирования грунтов основания на базе явных схем численного интегрирования.

Ключевые слова: метод конечных элементов, явный метод, спектральный суперэлемент, АСНИ «VESNA-DYN», многоэтажные здания, система «основание – фундамент – здание».

USE OF SPECTRAL SUPERELEMENTS IN DYNAMIC ANALYSIS OF “SOIL BASE - FOUNDATION - BUILDING” SYSTEMS

SAKHAROV V. O. *, Ass. Prof., PhD.

* Base and foundation department. Kyiv National University Construction and Architecture (KNUCA). 31, Povitroflotskiy avenue, Kyiv, 03680, Ukraine, tel: +38 (044) 275-85-71, e-mail: vladland@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9381-3283

Summary. Problem statement . Modern analysis of the dynamic conduct of constructions and structures relies on numerical modeling. The difficulty and complexity of dynamic problem solving encourages model simplification and the use of more advanced numerical modeling algorithms. Many buildings are characterized by the presence of repetitive structural elements (e.g. typical floors). This feature can be used to improve the efficiency of numerical methods by reducing the size of the equation system while meeting the requirements of direct integration methods. **Purpose.** The paper presents the theory and practical implementation of an improved technique for solving high-order dynamic problems using explicit methods and the help of spectral super-elements for selected substructures. This approach can reduce the order of the algebraic system and conduct dynamic (and thus - seismic) analysis of buildings and structures while taking into account nonlinear deformations of the soil foundation. **Analysis of recent research.** Modern methods and computer tools allow analysis of dynamic problems while taking into account nonlinear deformations. Such problems have systems of equations with millions of variables and require significant computational resources and time. To reduce the order of the system, commonly used approaches include dynamic reduction methods (e.g. Guyan reduction) or methods relying on reduced-order substructural models. In particular, a paper by Ray W. Clough suggests that the dynamic properties of FE have a higher level of approximation than mechanical properties. For buildings and structures, it is usually most convenient to use substructural models relying on eigenform-based motion representation, as proposed by Craig Jr. R.R., Bampton M. and other authors. However, the proposed options lead to a non-diagonal mass matrix and limit the effective use of explicit integration schemes. **Results.** The paper describes a method of use of superelement technology of solving tasks of dynamic for investigation of the interaction of buildings with the soil base. On the base Craig-Bampton approach, variant of getting reduction matrix for developed superelement of spectral is offered for taken subconstruction which is providing preservation diagonal mass matrix and allows the use of efficient explicit integration methods. The results of the study of a building interaction with a non-linear soil base under active seismic load are shown. Use an actual construction as an example, it is shown that the use

of spectral superelements reduced of the order of the equation system by a factor of more than 2.8 while maintaining the required accuracy of the calculation. **Conclusion.** The described method of solving dynamic problems, using the proposed spectral superelements, significantly reduces the order of the equation system while still allowing the use of explicit numerical integration schemes. This allows the more efficient dynamic analysis of the behavior of the “soil base - foundation - building” system.

Keywords: *finite element method, explicit method, spectral superelements, ASSR “VESNA-DYN”, high-rise buildings, “soil base – foundation – building” system.*

Постановка проблеми. В сучасних умовах для оцінки сейсмічного впливу дослідження динамічної поведінки несучих конструкцій будівель і споруд, в першу чергу, проводиться засобами чисельного моделювання. Ґрунтова основа відіграє значну роль у формуванні напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій і має нелінійно виражений характер деформування. При оцінці сейсмічного впливу найбільш повну інформацію можна отримати тільки методами прямого інтегрування в часі, що потребує значних розрахункових ресурсів. Складність і трудомісткість розв’язку задач динаміки прямими методами спонукає шукати шляхи підвищення ефективності чисельних методів за рахунок обґрунтованого спрощення моделей та залучення передових алгоритмів із використанням сучасних комп’ютерних технологій. До найбільш поширеного напряму спрощення можна віднести динамічну редукцію систем рівнянь МСЕ, яка полягає в суттєвому зменшенні порядку системи рівнянь внаслідок скорочення динамічних ступенів свободи.

Для багатьох будівельних споруд характерним є наявність структурних елементів, які багаторазово повторюються (наприклад типові поверхи). Максимально врахувати конструктивні особливості будівель та пом’якшити умови ефективного використання методів розв’язання задач динаміки дозволяє підхід, що будується на декомпозиції системи з виділенням підконструкцій, які часто зустрічаються, або мають однорідні властивості. Скінченно-елементні моделі підконструкцій – суперелементи будують незалежно з формулюванням контактних умов для спільної роботи в складі досліджуваної конструкції. Це дає змогу застосовувати

найбільш ефективні для відповідних суперелементів методи і завдяки такому комбінованому підходу значно покращити ефективність розрахунків в цілому.

В даній роботі основна увага приділена застосуванню динамічних суперелементів. Це обумовлено тим, що поряд із звичайним призначенням – редукції системи рівнянь підконструкції, – розроблені суперелементи повинні виконувати і іншу важливу роль. Вони повинні забезпечувати збереження діагональної структури вихідної матриці СЕМ після її редукції. Це дає змогу ефективного використання явних схем інтегрування динамічних рівнянь.

Слід відзначити, що найбільше розповсюдження метод суперелементів отримав в статичних задачах і значно менше – в задачах динаміки. Пояснюється це тим, що при формуванні статичного суперелементу в межах підконструкції вдається виключити велику кількість (внутрішніх) невідомих вузлових переміщень, залишаючи тільки (зовнішні) переміщення, які відносяться до вузлів контакту суперелементу з іншими елементами скінченно-елементної моделі (СЕМ). Для цього використовується методика статичної конденсації всіх внутрішніх ступенів свободи. Інші умови виникають при формуванні динамічного суперелементу, коли крім зовнішніх ступенів свободи – переміщень зовнішніх вузлів необхідно залишати достатню кількість внутрішніх динамічних ступенів свободи, які з необхідною точністю повинні зберегти основні динамічні властивості досліджуваних систем. Це призводить до зниження ефективності застосування суперелементів в задачах динаміки і не завжди виправдовується ускладнення відповідних алгоритмів і програм, особливо у випадку нелінійної постановки задач.

Аналіз публікацій. Сучасні комп'ютерні засоби та передові методики моделювання дозволяють проводити детальне дослідження поведінки будівлі з основою з урахуванням нелінійного деформування конструкцій та ґрунтів [12, 5]. Проте, такі задачі мають систему рівнянь з мільйонами невідомих, потребують значних ресурсів та часу розрахунку, що не завжди може бути застосовано для інженерних досліджень. Зменшення порядку систем рівнянь найчастіше проводиться по двом напрямкам – методом динамічної редукації та методом розв'язку підконструкцій. Останній, для геотехнічних задач, передбачає виділення в окремі частини ґрунтового масиву із фундаментами, або надземні конструкції з метою більш детального дослідження нелінійної поведінки матеріалів [9]. При взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля» нелінійні властивості основи в значній мірі визначають НДС будівлі, її осідання та ін.. Крім того властивості нашарування ґрунтів можуть значно відрізнитись між собою. Для надземних конструкцій зручно застосовувати методи редукації шляхом представлення переміщень через власні форми. Багаторічна практика показала, що далеко не всі власні форми коливань необхідні для відображення реальних динамічних процесів (включаючи сейсміку), що знайшло відображення в нормах [2]. При цьому варто враховувати, що власні форми верхньої частини спектру мають найбільші похибки, пов'язані з дискретизацією континуальних середовищ, і їх використання не завжди сприятиме підвищенню точності рішень задач динаміки. В монографії [3] відомих спеціалістів США по розробці і застосуванню МСЕ в задачах динаміки та сейсмостійкості споруд звернуто увагу на те, що динамічні властивості СЕМ мають більш високий рівень апроксимації, ніж механічні, і при розв'язанні задач динаміки доцільно притримуватись емпіричного правила «динамічний аналіз може виконуватись ефективно, якщо спочатку розроблено модель конструкції для аналізу

статичних напружень, а потім суттєво скорочено число ступенів свободи перед виконанням динамічного аналізу».

Побудові суперелементів, що забезпечують діагональну матрицю мас, задовольняє методика редукації на основі статичної конденсації з вибором базисних вузлів, в яких зосереджується вся маса. До недоліків такої методики слід віднести неоднозначність вибору динамічних ступенів свободи та відсутність критеріїв відносно способів заміни розподіленої маси зосередженими масами для забезпечення необхідної точності результатів, що в цілому потребує від проектувальника достатнього інженерного досвіду та інтуїції. Для більш обґрунтованого варіанту редукації можна застосовувати суперелементи, що базуються на динамічній редукації Гайана [1], або на залученні методу нормальних координат Крейга-Бемптона (будемо їх називати суперелементами спектральними (SES)) [4, 8]. Проте запропоновані варіанти призводять до недіагональних матриць мас і обмежують ефективне використання явних схем інтегрування.

Мета статті. Метою роботи є створення та реалізація методики розв'язку нелінійних задач динаміки високого порядку на базі явних методів із використанням спектральних суперелементів для виділених підконструкцій. Застосування такого підходу дозволить зменшити порядок системи алгебраїчних рівнянь та проводити динамічний, в т.ч. сейсмічний аналіз будівель і споруд з урахуванням нелінійного деформування ґрунтів основи.

Виклад матеріалу. В даній роботі запропонована методика використання суперелементної технології для дослідження взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля» при сейсмічних навантаженнях з урахуванням нелінійних властивостей основи. Практика показала, що найбільш ефективними з точки зору застосування явних методів є суперелементи, побудовані на власних формах коливань підконструкцій з діагональною матрицею мас. В основі

побудови суперелементу лежить метод нормальних координат Крейга-Бемптона, коли редукція проводиться шляхом використання неповного набору власних форм підконструкції.

Розглянемо основні етапи формування співвідношень суперелементів для будь якої заданої підконструкції. Для зручності, вузли, по яким відбувається контакт підконструкції з іншими частинами загальної конструкції, будемо називати зовнішніми (рис. 1), а елементи, які мають в своєму складі хоч один зовнішній вузол – зовнішніми елементами. Вузли та елементи, що залишились в підконструкції, будемо відносити до внутрішніх. У варіанті [4]

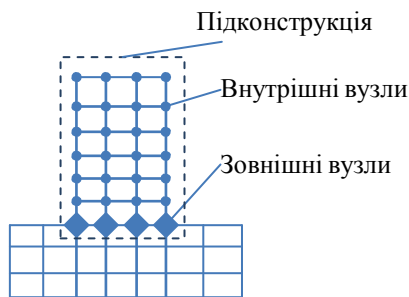


Рис. 1. Виділення зовнішніх та внутрішніх вузлів суперелементу для прийнятої підконструкції

матриця редукції $[S]$ формується методом нормальних координат із власних форм підконструкції для внутрішніх вузлів та методом статичної конденсації для зовнішніх вузлів. Для цього спочатку визначаються і нормуються власні форми підконструкції при закріпленні зовнішніх вузлах $[R_{ii}]$. Далі матриця $[S]$ доповнюється переміщеннями від одиничних переміщень зовнішніх вузлів $[X_{ei}]$:

$$[S]^T = \begin{bmatrix} [R_{ii}] & 0 \\ [X_{ei}] & [E_{ee}] \end{bmatrix} \quad (1)$$

де $[R_{ii}]$ – набір векторів-рядків нормованих власних форм підконструкції для внутрішніх вузлів, $[X_{ei}]$ – переміщення внутрішніх вузлів при одиничних зміщеннях зовнішніх, $[E_{ee}]$ – одинична матриця, порядок якої дорівнює кількості зовнішніх переміщень.

Проте, на етапі формування редукованої матриці мас $[M]$ на основі (1):

$$[\tilde{M}] = [S]^T [M] [S] \quad (2)$$

виникає «обрамлена» матриця мас, що не дозволяє ефективно використовувати явні схеми інтегрування.

В запропонованому варіанті передбачається, що матриці мас зовнішніх елементів підконструкції мають діагональну структуру, а матриця редукції $[S]$ має вигляд:

$$[S] = \begin{bmatrix} [R_{ii}] & 0 \\ 0 & [E_{ee}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

де $[R_{ii}]$ – набір векторів-рядків нормованих власних форм підконструкції для внутрішніх вузлів, отриманих при можливості зміни жорсткості зовнішніх елементів від заданої величини до нуля. При цьому, коли жорсткість зовнішніх елементів не дорівнює нулю, матриця $[R_{ii}]$ доповнюється рядками векторів жорстких зміщень внутрішніх вузлів; $[E_{ee}]$ – одинична матриця. Ніяких обмежень (крім симетрії) на структуру матриць мас внутрішніх елементів не накладається, і для них можна використовувати «погоджені» недіагональні матриці. Слід зазначити, що для зовнішніх елементів, які складають невелику частину підконструкцій, вказана умова може бути задовільнена шляхом застосування для них різних методик переходу від розподілених до зосереджених мас, в тому числі за рахунок використання погоджених за апроксимацією діагональних матриць мас.

Процес формування спектрального суперелементу зводиться до наступної послідовності дій:

1. Визначаються зовнішні та внутрішні переміщення і зовнішні та внутрішні елементи підконструкції.
2. Вузлові переміщення нумеруються по порядку – спочатку всі n_i внутрішніх, а потім n_e зовнішніх.
3. Формується матриця мас СЕМ підконструкції:

$$[M]_{cov} = \begin{bmatrix} [M_{ii}]_{n_i \times n_i} & [0] \\ [0] & [M_{ee}]_{n_e \times n_e} \end{bmatrix} \quad (4)$$

де $[M_{ii}]$ – позитивно визначена симетрична матриця мас внутрішніх переміщень;

$[M_{ee}]$ – діагональна матриця переміщень зовнішніх вузлів,

4. Матриці жорсткості зовнішніх елементів множаться на коефіцієнт k_z , який може приймати значення $0 \leq k_z \leq 1$ і формується відкоригована матриця жорсткості СЕМ підконструкції.

$$[K]_{CON} = \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [K_{ie}] \\ [K_{ei}] & [K_{ee}] \end{bmatrix} \quad (5)$$

Коефіцієнт k_z вибирається в залежності від особливостей взаємодії підконструкції з іншими частинами СЕМ. Наприклад, якщо формується SES достатньо жорсткої будівлі, що контактує з піддатливою ґрунтовою основою, то k_z доцільно прийняти рівним нулю, оскільки основа мало впливає на основні форми коливань будівлі. У випадку скальної основи k_z може прирівнюватися до одиниці. Але треба підкреслити, що вибір k_z не впливає на збіжність рішення задач. Незалежно від значення k_z при збільшенні кількості врахованих форм коливань збільшується точність відображення суперелементом властивостей СЕМ підконструкції і, якщо кількість форм буде рівною кількості внутрішніх ступенів свободи (тобто при відсутності редукції), то суперелемент буде точно відповідати підконструкції. Вдалий вибір k_z може лише скоротити кількість врахованих форм для досягнення необхідної точності результатів.

5. На зовнішні вузли накладаються в'язі і всі зовнішні переміщення прирівнюються нулю. Розв'язується часткова проблема визначення власних частот і форм коливань нижньої частини спектру підконструкції.

$$([K_{ii}] - \omega^2[M_{ii}])\{u_i\} = 0 \quad (6)$$

6. При $k_z > 0$ до отриманих форм додаються ще шість форм руху внутрішніх елементів, як жорсткого цілого, які ортогоналізуються між собою та формами визначеними раніше. У випадку лінійної залежності відповідна форма відкидається. В цілому отримані форми визначають базис (власні форми) і матрицю редукції для внутрішніх ступенів свободи [5]

7. Формується дійсна матриця жорсткості СЕМ $[K]_{CON}$ підконструкції шляхом доповнення раніше сформованої матриці $[K]_{CON}$ матрицями жорсткості зовнішніх елементів, помноженими на коефіцієнт $(1 - k_z)$.

$$[K]_{CON} = \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [K_{ie}] \\ [K_{ei}] & [K_{ee}] \end{bmatrix} \quad (7)$$

8. За допомогою матриці редукції обчислюється матриця жорсткості і матриця мас суперелементу.

$$[K]_{SES} = \begin{bmatrix} [R_{ii}] & [K_{ii}] & [R_{ii}]^T & [R_{ii}] & [K_{ie}] \\ & [K_{ei}] & [R_{ii}]^T & [K_{ee}] & \\ [R_{ii}] & [M_{ii}] & [R_{ii}]^T & [0] & \\ & [0] & [M_{ee}] & & \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[M]_{SES} = \begin{bmatrix} [R_{ii}] & [M_{ii}] & [R_{ii}]^T & [0] \\ [0] & [0] & [M_{ee}] & [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [E_{ii}] & [0] \\ [0] & [M_{ee}] \end{bmatrix} \quad (9)$$

де $[E_{ii}]$ – одинична матриця, розмірність якої дорівнює кількості внутрішніх вузлів.

Матриця жорсткості спектрального суперелементу є мало заповненою і в реалізованому варіанті зберігається у спеціальному форматі, зручному для застосування економічних алгоритмів виконання дій над матрицями. Матриця мас зберігається у вигляді вектора-діагоналі. Зберігається також матриця редукції [5] для обчислення через узагальнені переміщення суперелементу переміщень внутрішніх вузлів підконструкції.

Запропонована методика була застосована для дослідження варіанту висотного будинку на базі реального об'єкту в сейсмічно-небезпечному районі м. Одеси. Будинок має 24 надземних та 1 підземний поверх паркінгу і являє собою каркасно-монолітну конструкцію.

Інженерно-геологічна ситуація представлена шарами суглинків, глин та вапняку. Сейсмічність території оцінена в 7 балів. Фізико-механічні характеристики ґрунтів основи представлені у таблиці 1.

Будинок запроектовано на пальових фундаментах з бурових паль діаметром 620мм та довжиною 12 м із заведенням підшви в глину тверду ПГЕ-7. Палі об'єднані в ростверки, товщиною 1,5 м, розкріплені перехресними стрічками, товщиною 0,5 м. Матеріали конструкцій будинків розглядались, як в'язко-пружні тіла. Внутрішні втрати енергії

враховувались по моделі Релея, через декремент коливань, який для інженерних конструкцій приймався $\delta = 0,3$, та для ґрунтів основи $\delta = 0,6$ [2]. Для оцінки реальної поведінки будівель ґрунтовий масив розглядався як об'ємне нелінійно-в'язко-пружно-пластичне тіло з характеристиками у відповідності до нашарування ґрунтів основи. Описання деформування ґрунту при

сейсмічному впливі проводилось згідно моделі [6]. Розміри врахованого в розрахунках ґрунтового масиву склали 125×108 м в плані та 56 м по глибині. Для зменшення впливу граничних умов по бічним площинам використані в'язкі опори Лізмера [10].

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів основи

ПЕ	Назва ґрунту	E_{def} , МПа	ν	ρ , г/см ³	c , МПа	ϕ , град.	R_{ten} , МПа	e_0	E_v , МПа	γ_{sat} , МПа·с
4	Суглинок твердий	10	0,38	1,95	0,01	13	0,043	0,874	30	1,09
6	Суглинок твердий	21	0,35	1,89	0,025	20	0,067	0,742	105	3,81
7	Глина тверда	20	0,4	1,93	0,035	18	0,108	0,768	100	3,63
8	Вапняк зруйнований	25	0,2	2,00	0,06	30	0,104	0,35	125	605,17
10	Вапняк плитчастий	48	0,18	2,10	0,13	32	0,208	0,3	240	726,20
11	Вапняк ракушняк	50	0,15	2,20	0,14	35	0,200	0,25	250	968,27
12	Глина тверда	19	0,42	1,98	0,053	19	0,154	0,978	95	3,45

Створена СЕМ мала систему алгебраїчних рівнянь з 404 328 невідомими і представлена на рисунку 2. В якості навантаження використано фрагмент реальної акселерограми, розробленої для даного майданчика тривалістю 15 с. Для зменшення порядку невідомих та підвищення швидкості розв'язку в розрахунках були використані запропоновані суперелементи при $k_2 = 0$. Конструкції будинку утворюють значну кількість невідомих і мають зручну будову для виділення підконструкцій. Для ефективного проведення редукції як підконструкція була обрана ділянка, обмежена перерізами по вертикальним несучим конструкціям, які показані пунктирною лініями (рис. 2).

У даній роботі надземна частина будинку виділялись у підконструкцію, з якої утворювався суперелемент. Зовнішні вузли SES розташовувались на рівні стін паркінгу (рис. 2). При розрахунку для даної під конструкції було знайдено 390 власних

форм, які обмежувались частотою близько 30 Гц, що вважається достатнім для більшості будівель. Побудована таким чином суперконструкція до складу якої входить елементи ґрунту, фундаментів, частин будівлі, що не ввійшли до підконструкції, а також суперелементу будинку налічувала 142 920 невідомих, що забезпечило зменшення порядку системи рівнянь більш ніж в 2,8 рази.

Розрахунки проводились у нелінійній постановці шляхом прямого інтегрування в часі по методу центральних різниць з дискретним кроком по просторовим координатам [7] засобами автоматизованої системи наукових досліджень (АСНД) «VESNA-DYN». Час розрахунку 20 секунд динамічного навантаження (15 с сейсмічної дії та 5 секунд вільних коливань) з використанням ПК на базі процесора IntelCore I7 3.1 ГГц та RAM 16 Гб склав близько 7 годин.

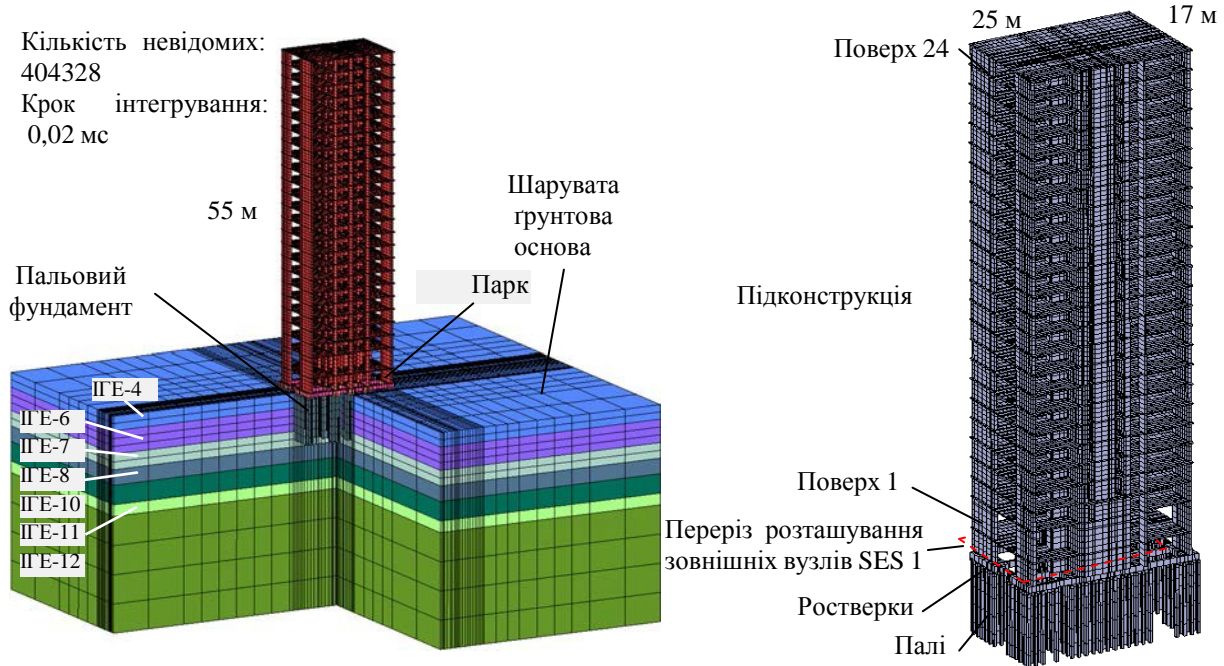


Рис. 2. Скінченно-елементна модель будівель в складі системи «основа – фундамент - будівля»

В результаті розрахунків було отримано, що частота коливань верху будівлі має меншу частоту, ніж ґрунтового масиву із фундаментами (рис. 3, а). Тобто сейсмічне навантаження не входить в резонанс з нижніми частотами будинку. Амплітуда коливань фундаменту в середньому склала близько 1 см в плані. Максимальне відхилення зафіксоване на 12,6 с у напрямку X_2 із значенням -1,9 см. Після закінчення активної фази навантаження

(після 15 с) спостерігається швидке згасання коливань. Характер коливань верху будівлі має свої особливості. На більшій частині навантаження амплітуда коливань не перевищувала 2,5 см. Як видно з (рис. 3, а), максимальні відхилення верху будівлі виникають у протифазі із фундаментами. Коли коливання ґрунту згасають, в будівлі виникають максимальні амплітуди до 5 см, які поступово згасають. Вертикальні коливання будівлі не перевищували 5 мм.

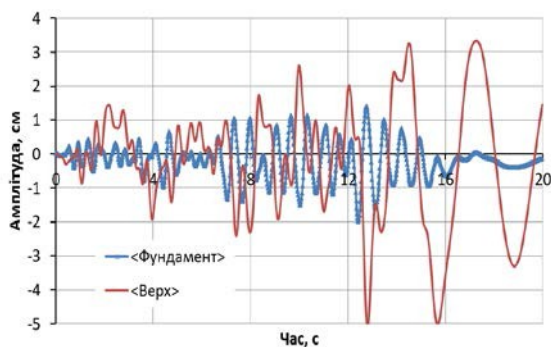


Рис. 3. Коливання будівлі в напрямку X_2 при дії сейсмічних навантажень

Для оцінки точності отриманих результатів з використанням спектральних суперелементів було проведено розрахунок

задачі без застосування редукції. Аналіз показав, що результати мають високу збіжність. Як видно на графіку (рис. 3, б),

похибки, переважно, виникають на короткочасних ділянках екстремумів коливань і при максимальних амплітудах не перевищують 12 %. Таким чином, проведені дослідження дозволяють рекомендувати використання суперелементів SES для моделювання динамічної поведінки будівель з ґрунтовою основою в т.ч. з урахуванням нелінійного деформування ґрунтів.

Висновки. За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Запропоновано новий варіант спектральних суперелементів SES, які розроблені на базі методу нормальних координат, враховують особливості граничних умов для виділених підконструкцій, забезпечують діагональність матриці мас суперелементу та дозволяють суттєво зменшити порядок системи рівнянь для задач дослідження динамічної взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля». Для даної задачі порядок системи рівнянь було зменшено більш ніж в 2,8 рази.

2. На прикладі реальної будівлі показано, що при коректному проведенні динамічної редукції із застосуванням SES суперелементів отриманий результат має високу збіжність із результатами, отриманими без редукції. Ступінь похибки залежить від кількості використаних форм.

3. Представлена методика розв'язку динамічних задач із використанням спектральних суперелементів дозволяє проводити динамічний, в т.ч. сейсмічний аналіз взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля» з урахуванням нелінійного деформування ґрунтів основи по явним схемам інтегрування.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гайан Р. Приведение матриц жёсткости и массы / Р. Гайан // Ракетная техника и космонавтика. – 1965. – Т. 3, № 2. – С. 287.
Idem. Guyan R. J. Distributed mass matrix for plate element bending / R. J. Guyan // AIAA Journal. – 1965. – Vol. 3, № 3. – P. 567-568.
2. Здания и сооружения. Проектирование высотных жилых и общественных зданий : ДБН В.2.2-24:2009. – Киев : Минрегионстрой Украины, 2009.
3. Клаф Р. Динамика сооружений : пер. с англ. / Р. Клаф, Дж. Пензиен. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с. – Перевод. изд.: Clough, Ray W. Dynamics of Structures / Ray W. Clough, Joseph Penzien. – New York, 1975.
4. Крэйг Р. Р. Сочленение подконструкций при динамическом расчёте конструкций / Р. Р. Крэйг, М. Бэмптон // Ракетная техника и космонавтика. – 1968. – Т. 6, № 7. – С. 113-121.
Idem. Roy R. Craig. Coupling of substructures for dynamic analyses / Roy R. Craig, Jr., Mervyn C. C. Bampton // AIAA Journal. – 1968. – Vol. 6, № 7. – P. 1313-1319.
5. Сахаров В. А. Взаимодействие конструкций Зимненского монастыря с ґрунтовым основанием при сейсмических воздействиях / В. А. Сахаров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/7(72) – С. 18-23.
6. Сахаров В. О. Модель нелінійного деформування ґрунтової основи при сейсмічних навантаженнях / В. О. Сахаров // Основи та фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури – 2013. – Вип. 33. – С. 34-46.
7. Сахаров, В. О. Модифікація явного методу для ефективного розв'язання нелінійних задач геотехніки / В. О. Сахаров // Основи та фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – 2014. – Вип. 35. – С. 116-126.
8. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лашеников, Н. Н. Шапошников. – М. : Стройиздат, 1984. – 416 с.
9. Influence of soil-structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings / L. Mengke, L. Xiao, L. Xinzheng, Y. Lieping // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2014. – Vol. 6, Issue 5. – P. 477-485.

10. Lysmer J. Finite Dynamic Model for Infinite Media / J. Lysmer, R. L. Kuhlemeyer // Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE. – 1969. – Vol. 95, № EM4. – P. 859-876,
11. NUREG – 0800. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for the Nuclear Power Plants / US Nuclear Regulatory Commission, 1987.
12. Sakharov V. An investigation of system „soil base-foundation-structure” response to seismic forces with provision for nonlinear properties of materials / V. Sakharov // Proceedings of the Xth Conference „Konstrukcje zespolone”, Poland. – Zielona Góra, 2014. – P. 407-426.

REFERENCES

1. Idem. Guyan R. J. Distributed mass matrix for plate element bending .AIAA Journal. 1965, Vol. 3, no. 3. pp. 567-568.
2. *Zdaniya i sooruzheniya. Proektirovanie vysotnyh zhilyh i vysotnyh zdaniy*. DBN V.2.2-24:2009. [Buildings and constructions. Designing of high-rise residential and public buildings]. Kiev, Minregionstroy Ukrainy, 2009. (in Russian).
3. Klaf R., Penzien Dzh. *Dinamika sooruzhenii [Structural dynamics]*. Moscow: Stroizdat. 1979. 320 P. – Transl.: Clough Ray W. , Joseph Penzien Dynamics of Structures. New York, 1975.
4. Roy Idem. Craig R., Mervyn C. C. Coupling of substructures for dynamic analyses .AIAA Journal. 1968. Vol. 6, no.7, pp. 1313-1319. .
5. Sakharov V. A. Vzaimodeistvie konstrukciy Zimmenskogo monastyrya s gruntovym osnovaniem pri seismicheskikh vozdeistviyah [The interaction of structures of Zimmensy cathedral with soil foundation under seismic actions]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologii-* East European Journal of advanced technologies. 2014, no. 6/7(72), pp. 18-23. (in Russian).
6. Sakharov V. O. Model' neliniynogo deformuvannia gruntovoi osnovy pry seismichnykh navantazheniakh [A model of nonlinear deformation of the ground basis is at the seismic loading]. *Osnovy ta fundamenti – Bases and foundations*. Mizhvid. nauk.-tekhn. zb. -Scientific-technical. coll. KNUCA, 2013, no.33, pp. 34–46. (in Ukrainian).
7. Sakharov V. O. Modyfikatsiia yavnogo metodu dlia efektyvnogo rozv'iazannia neliniinykh zadach geotekhniki [Modification of an explicit method for the efficient solution of nonlinear problems of geotechnics]. *Osnovy ta fundamenti – Bases and foundations*. Mizhvid. nauk.-tekhn. -Scientific-technical. coll. KNUCA, 2013, no.35, pp. 116–126. (in Ukrainian).
8. Smirnov A. F., Aleksandrov A. V., Lashhenikov B. Ja, Shaposhnikov N. N. *Stroitel'ya mehanika. Dinamika i ustojchivost' sooruzheniy*. [Structural mechanics. Dynamics and stability of structures]. Moscow, Strojizdat,1984, 416 p. (in Russian).
9. Influence of soil-structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014, Vol. 6, no.5, pp. 477-485.
10. Lysmer J. Finite Dynamic Model for Infinite Media .Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE.1969, Vol. 95, no. EM4. pp. 859-876.
11. NUREG – 0800. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for the Nuclear Power Plants / US Nuclear Regulatory Commission, 1987. Klaf. R. Penzien Dzh. *Dinamika sooruzheniy [Dynamics of structures]*. Moscow, Strojizdat, 1979. 320 p. Perevod izd. New York, 1975.
12. Sakharov V. A. An investigation of system „soil base-foundation-structure” response to seismic forces with provision for nonlinear properties of materials .Proceedings of the Xth Conference „Konstrukcje zespolone”, Poland. Zielona Góra, 2014, pp. 407-426.