

УДК 624.15

**І. П. Бойко**, д-р техн. наук, проф.;  
**В. О. Сахаров**, канд. техн. наук, доц.;  
**Г. В. Гетун**, канд. техн. наук, доц.;  
**В. А. Мельник**, асп.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ПОВЕРХІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ВИСОТНОГО БУДИНКУ ЗА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

*Наведено результати аналізу зміни напружено-деформованого стану несучих конструкцій у разі дії сейсмічного навантаження за різної кількості поверхів. Розрахунки проводилися за МСЕ прямим інтегруванням в часі за схемою Ньюмарка з урахуванням згасання коливань. Показано, що максимальні коливання будівлі можуть виникати за неповної висоти будівлі, що необхідно враховувати під час проектування.*

### Вступ

Зведення багатоповерхових будівель у поєднанні із підвищенням загального рівня сейсмічності територій зумовлює необхідність детальнішого аналізу поведінки конструкцій за сейсмічних навантажень. Відомо, що характер та амплітуда коливань істотно залежать від розмірів будівлі, її жорсткості, розподілу масових сил, ґрунтових умов та безпосередньо від параметрів сейсмічного навантаження. Тобто, реакція будівель, що зведені в однакових умовах, але мають різну поверховість, може мати різний характер коливань. Причому в конструкціях з меншою поверховістю внаслідок виникнення резонансних процесів можуть виникати більші зусилля та деформації, ніж у вищих будівлях. Нестабільне фінансування будівництва збільшує час будівництва від кількох років до десятиріч, не кажучи про відсутність робіт з «консервування» будівництва. Крім того, недостача інвестицій також може призводити до «конструктивного» зменшення поверховості будівлі через зміну його призначення.

Оцінювання впливу сейсмічного навантаження на конструкції будівлі, що здійснюється на етапі проектування будівель, зазвичай проводять тільки для вже повної «проектної» висоти будівлі. Не до кінця зведена споруда може мати критичні зусилля та деформації в елементах, які неможливо виявити під час розгляду цілої споруди.

*Метою роботи є дослідження зміни напружено-деформованого стану несучих конструкцій для будівель різної висоти у разі дії сейсмічного навантаження.*

### Постановка задачі

Дослідження розподілу НДС були проведені на базі реального висотного будинку, побудованого в Україні. Розміри в плані складають близько  $35 \times 38$  м, висота будівлі складає 150 м і має 45 наземних та 2 підземних поверхи. Будівля є монолітно-каркасною з несучим внутрішнім ядром жорсткості та пілонами по периметру. Фундаменти будівлі складаються з буронабивних паль діаметром 1 м, які об'єднані залізобетонним плитним ростверком товщиною 2 м. Ґрунтова основа складається з шарів супіску пластичного ( $W = 0,24$ ;  $I_p = 0,05$ ;  $I_L = 0,67$ ;  $\rho = 1,94$ ;  $e = 0,71$ ;  $E = 7$  МПа;  $c = 0,9$  кПа;  $\varphi = 18^\circ$ ), супіску твердого ( $W = 0,2$ ;  $I_p = 0,03$ ;  $I_L < 0$ ;  $\rho = 1,9$ ;  $e = 0,67$ ;  $E = 15$  МПа;  $c = 1,9$  кПа;  $\varphi = 26^\circ$ ) та піску дрібного, щільного малого ступеня водонасичення ( $W = 0,04$ ;  $\rho = 1,78$ ;  $e = 0,55$ ;  $E = 35$  МПа;  $c = 0,3$  кПа;  $\varphi = 33^\circ$ ).

Дослідження розподілу напружено-деформованого стану несучих конструкцій під дією сейсмічних навантажень проводилося для системи «основа—фундамент—будівля». Розрахунки виконувалися за МСЕ на базі автоматизованої системи наукових досліджень (АЧНД) VESNA в просторовій постановці за прямим динамічним методом.

Для оцінки взаємодії конструкції з ґрунтовою основою в складі системи «основа—фундамент—будівля» необхідно враховувати як об'ємну жорсткість, так і інерційні масові сили основи.

В процесі моделювання це вимагає використання об'ємного ґрунтового масиву з реальним нашаруванням ґрунтів та відповідним розподілом жорсткостей та мас.

Розроблена скінченно-елементна модель показана на рис. 1. Згідно з прийнятою концепцією ґрунтовий масив заданий об'ємними ізопараметричними скінченними елементами, отриманими на базі моментної схеми [2], з характеристиками відповідно до інженерно-геологічних вишукувань. Елементи конструкцій плитного розтертку, плит перекриттів та покриття моделювалися просторовими елементами, колони та палі — стрижневими. Інші вертикальні несучі елементи будівлі представлялися елементами оболонок згідно з геометричним та фізико-механічним параметрами.

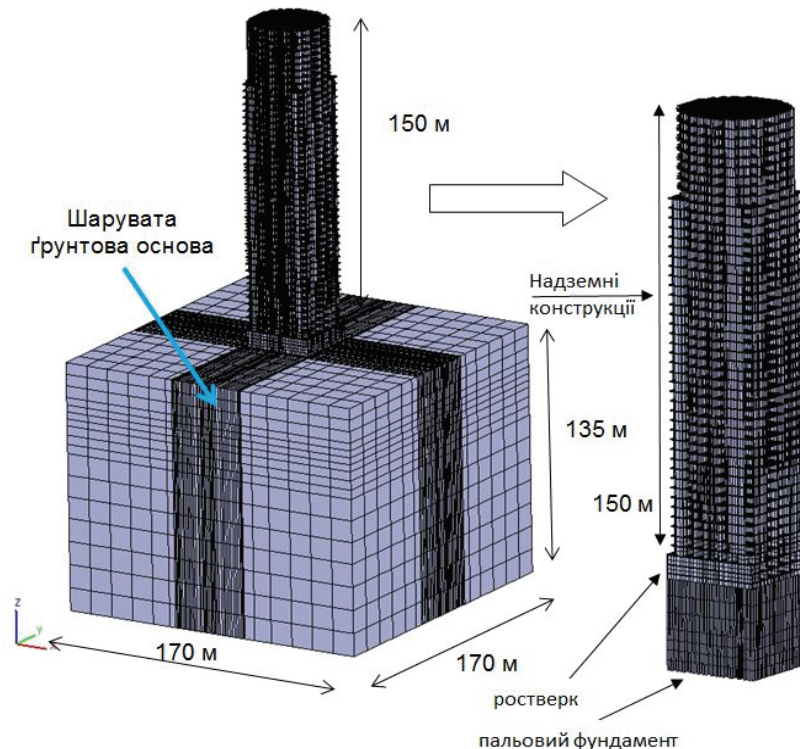


Рис. 1. Скінченно-елементна модель системи «основа—фундамент—будівля»

Під час дії сейсмічних навантажень коливання реальних середовищ з часом згасають. Ці процеси зумовлені внутрішнім опором за рахунок деформування матеріалу конструкцій, тертям у вузлах тощо, та зовнішнім опором через взаємодії із зовнішнім середовищем. Причому в першому випадку величина опору залежить від швидкості деформацій матеріалу, а в другому випадку — від швидкості його переміщення.

Таким чином, для опису процесів деформування системи під дією динамічного навантаження з урахуванням згасання для дискретних систем з багатьма ступенями свободи необхідно розв'язувати систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{U\} + [C] \frac{d}{dt} \{U\} + [K] \{U\} = \{Q(t)\}, \quad (1)$$

де  $[M]$  — матриця мас;  $[C]$  — матриця демпфування;  $[K]$  — матриця жорсткості;  $\{U\}$  — вектор переміщень;  $\{Q(t)\}$  — вектор навантаження як функція часу.

Для описання процесів згасання та формування матриці  $[C]$  необхідно використовувати залежності, отримані на базі експериментальних даних для відповідних середовищ. Однак, враховуючи складність і високу вартість, а в деяких випадках і неможливість проведення таких експериментів, можна скористатись нормативними даними [1].

Задачі з моделювання динамічної поведінки конструкцій пов'язані з багаторазовим розв'язанням СЛАУ високого порядку, що вимагає значних ресурсів комп'ютерної техніки та часу розрахунків. У багатьох випадках під час розв'язання задач за прямими динамічними методами використовують алгоритми, які дозволяють значно спростити задачу, наприклад, розкладаючи переміщення конструкції по неповному спектру власних форм коливань. Такий підхід передбачає застосування

однакових параметрів згасання для всіх середовищ, таких як ґрунт та інженерні конструкції, що не відповідає дійсності.

У цій роботі параметри згасання приймалися в залежності від прийнятих матеріалів у відповідності до теорії Фойгта за рекомендаціями норм [1]. Моделювання динамічної взаємодії проводилось прямим методом інтегрування в часі за схемою Ньюмарка.

Згідно з теорією Фойгта параметр коефіцієнт в'язкості ( $\chi$ ) знаходиться в лінійній залежності від частоти і визначається в залежності від характерної частоти ( $\omega_0$ ) [6]

$$\chi = \frac{\delta}{\pi \cdot \omega_0}, \quad (2)$$

де  $\omega_0$  — кругова частота (прийнята, як перша власна частота будівлі  $\omega_0 = 4,78 \text{ c}^{-1}$  (0,76 Гц)).

Значення параметрів визначались за декрементами коливань: для ґрунтів основи  $\delta_{\text{гр}} = 0,6$  для конструкцій будівлі  $\delta_{\text{к}} = 0,3$ .

Матриця демпфування в цих умовах визначалась згідно з формулою

$$[C] = \chi [K]. \quad (3)$$

В процесі чисельних досліджень хвилі, які поширюються в об'ємі ґрунту, можуть відбиватися від граничних поверхонь. В реальних умовах енергія цих хвиль випромінюється в зовнішнє середовище. У цій роботі такий ефект враховується через застосування методу граничного демпфування, запропонованого Лізмером [6], який забезпечує поглинання енергії хвиль, що приходять на границю.

Такий підхід дозволив врахувати як процеси згасання, зумовлені внутрішнім в'язким тертям матеріалу, так і випромінювання енергії в зовнішнє середовище.

Розроблена модель для описання взаємодії елементів системи «основа—фундамент—будівля» дозволяє детально досліджувати поведінку будівлі у разі дії сейсмічного навантаження.

Як сейсмічне навантаження використана трикомпонентна акселерограма № 8 з набору нормативних синтезованих акселерограм [1], вибрана за переважним періодом власних коливань ( $T = 6,8 \text{ c}$ ). Для такої будівлі була прийнята сейсмічність майданчика у 7 балів. Розрахунки проводилися для фрагменту акселерограми тривалістю 6 секунд (рис. 2).

### Результати розрахунків

Складено скінченно-елементну модель (СЕМ) (див. рис. 1), яка містить 723 183 рівнянь. Час моделювання шести секунд поведінки будівлі склав 7 годин з урахуванням використаних ресурсів ПК на базі IntelCore i7 2,4 ГГц, RAM 16 Гб.

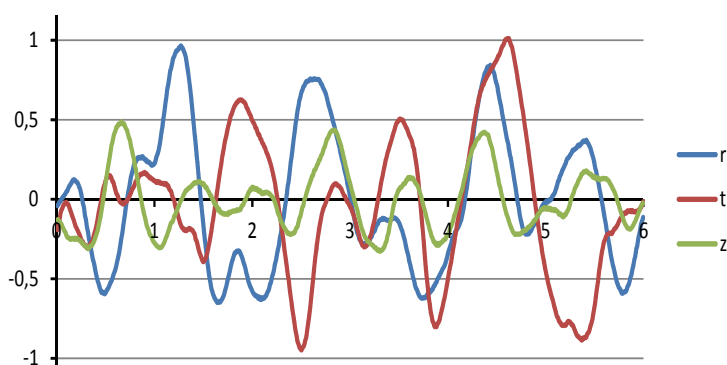


Рис. 2. Розрахункова синтезована акселерограма № 8 (фрагмент 6 с)

У результаті моделювання всього будинку отримано, що від початку впливу до 3,7 с спостерігалось збільшення амплітуди коливань конструкцій. Максимальні відхилення верху будівлі в плані в поздовжньому напрямку дії хвиль склали 24 см (рис. 3а). Проте під час аналізу характеру деформування добре видно (рис. 3б), що фундаментна частина конструкцій разом з ґрунтом зміщена в протилежний бік відносно верху. Тобто, загальне відхилення верху будівлі відносно фундаменту, що визначає крен будівлі, складає 38,2 см.

Максимальні зусилля виникають в конструкціях нижнього підвального поверху. Найбільш навантаженими елементами є пілони і стіни підвального поверху на зовнішньому периметрі будівлі.

Додаткові напруження від сейсмічного навантаження склали близько 230...250 кПа, в окремих зонах концентраторів напружень значення сягали 1—2 МПа.

Як зазначалося раніше, характер коливань висотної будівлі істотно залежить від висоти і жорсткості будівлі. Зменшення кількості поверхів будівлі призводить до зміни власних частот коливань конструкцій. Наслідком можуть бути резонансні процеси, які не проявляються для повнорозмірної будівлі.

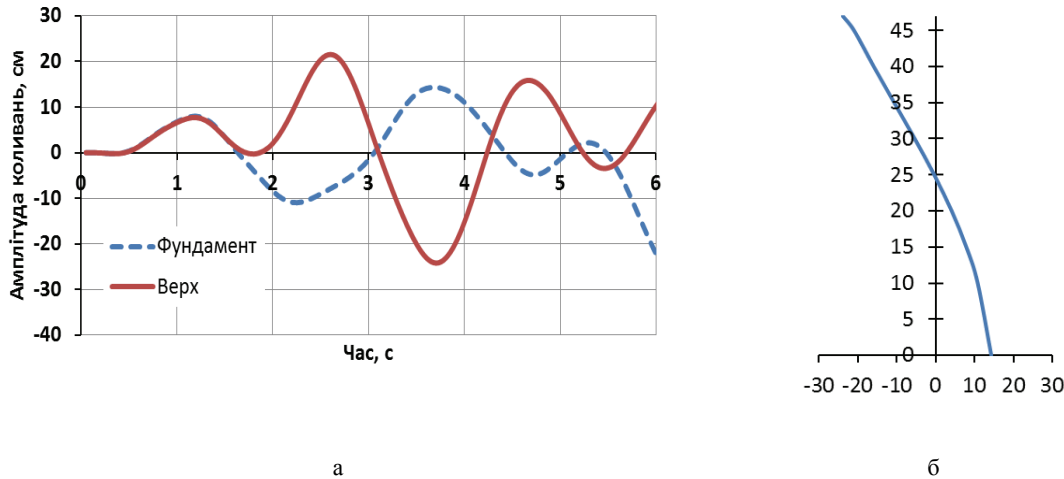


Рис. 3: а — горизонтальні коливання 47-поверхової будівлі; б — зміщення поверхів будівлі ( $t = 3,7$  с), см

З метою дослідження впливу сейсмічного навантаження на будівлю з різним числом поверхів були проведені розрахунки будівель з кількістю поверхів від 10 до 47 з кроком п'ять поверхів. Використані акселерограми сейсмічних навантажень були підібрані для будівлі з проектною кількістю поверхів.

В результаті чисельних досліджень було отримано, що зі збільшенням поверховості будівлі змінюється переважаюча форма коливання, що впливає на максимальні відхилення будівлі. Так, максимальні переміщення і крен будівлі досягаються за неповної поверховості будівлі (рис. 4). Як видно з діаграми, для дослідного будинку з висотою 25 поверхів змінюється форма деформації будівлі, яка характеризується зміщенням вершу та низу будівлі в протилежних напрямках. Максимальне відхилення вершу відносно фундаменту зафіксовано для 25-ти поверхів із значенням 55 см, що відповідає виникненню умови «узгодженого» руху будівлі і ґрунту, характерне для резонансу. Подальше збільшення поверховості аж до 47 поверху в межах дії навантаження характеризувалось зменшенням відхиленням вершу та збільшенням зміщення фундаментів в протилежних напрямках. Проте вплив на величину максимального крену був не суттєвим.

Аналіз зміни переміщень поверхів за різної висоти будівлі показав, що максимальні відхилення формуються у верхній точці досліджуваної будівлі, коли будівля ще не «привантажена» вищерозташованими поверхами.

Зі збільшенням висоти і маси будівлі амплітуда коливань кожного поверху поступово спадає до певної величини, що склала близько 8 см. Дослідження показали, що після надбудови 15 поверхів коливання перекриття стабілізуються (рис. 5).

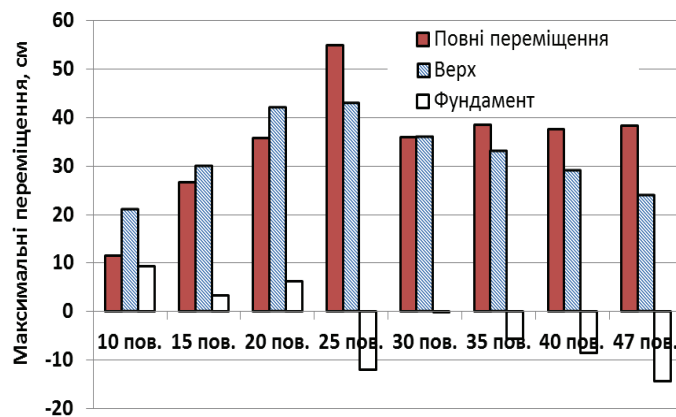


Рис. 4. Максимальні переміщення будівлі в залежності від кількості збудованих поверхів

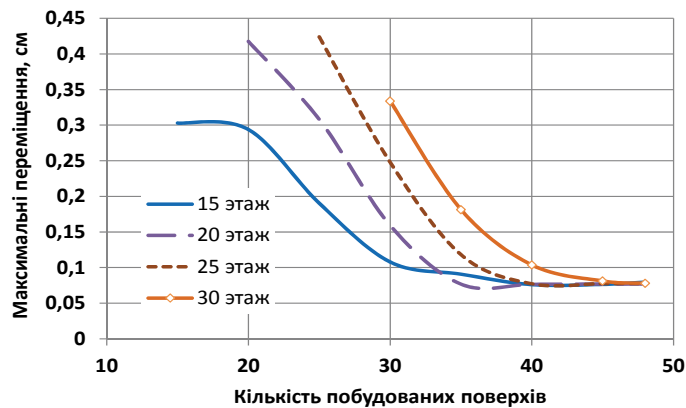


Рис. 5. Максимальні переміщення поверхів за різної поверховості будівлі

### Висновки

Під час проектування висотних будівель і споруд, що зводяться в сейсмічно небезпечних умовах, необхідно проводити аналіз впливу сейсмічних навантажень на різних етапах будівництва. Такий аналіз слід проводити для будівель, що знаходяться в «законсервованому» або в недобудованому стані. Аналіз сейсмічного впливу слід проводити для системи «основа—фундамент—будівля» методами прямого інтегрування в часі, з урахуванням реальних динамічних властивостей динамічних середовищ.

В результаті проведеної роботи зроблено такі висновки:

1. Характер коливань конструкцій будівель під впливом сейсмічних навантажень суттєво залежить від просторової жорсткості та розподілу мас в елементах системи «основа—фундамент—будівля», включаючи інерційні масові сили ґрунту.
2. Дослідження показали, що в умовах однакових сейсмічних навантажень за меншої кількості поверхів багатоповерхового будинку, через виникнення резонансів, амплітуда коливань конструкцій може зростати.
3. На етапі проектування будівлі слід проводити оцінку власних частот коливань, в т. ч. для неповної поверховості будівлі з метою виявлення можливих резонансних проявів.
4. Підвищення кількості вищерозташованих поверхів сприяє зменшенню амплітуди коливань нижніх поверхів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.1.1-12:2006. Строительство в сейсмических регионах Украины / Минстрой Украины. — К. : Минстрой Украины, 2006.
2. Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под ред. А. С. Сахарова, И. Альтенбаха. — К. : Вища школа, 1982; Лейпциг : ФЭБ Файхбухферлаг, 1982. — 80 с.
3. ДБН В.2.2-24:2009. Проектирование высотных жилых и гражданских зданий / Минрегионстрой Украины. — К. : Минрегионстрой Украины, 2009.
4. Гетун Г. В. Дослідження впливу сейсмоізоляції на напружено-деформований стан висотної будівлі під дією сейсмічних навантажень / Г. В. Гетун, В. О. Сахаров, В. А. Мельник // Світ геотехніки. — 2013. — Вип. 2. — С. 18—23.
5. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. — СПб. : Наука, 1998. — 255 с., ил. 70.
6. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / [А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лещеников, Н. Н. Шапошников]. — М. : Стройиздат, 1984. — 416 с.
7. John Lysmer and R. L. Kuhlemeyer, Finite Dynamic Model for Infinite Media, Proc. ASCE, Vol. 95, No. EM4, 1969, August.

Рекомендована кафедрою містобудування і архітектури

Стаття надійшла до редакції 25.10.2013  
Рекомендована до друку 13.11.2013

**Бойко Ігор Петрович** — завідувач кафедри, **Сахаров Володимир Олександрович** — доцент.

Кафедра основ і фундаментів;

**Гетун Галина В'ячеславівна** — доцент, **Мельник Володимир Андрійович** — аспірант.

Кафедра архітектурних конструкцій.

Київський національний університет будівництва і архітектури