



# ВСТАНОВЛЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВОЇ ТОВЩИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СЕЙСМОСТІЙКИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

УДК 550.34

## АВТОРИ

**КЕНДЗЕРА О.В.**, канд. фіз.-мат. наук, член-кор.  
НАНУ, заступник директора Інституту геофізики  
ім. С.І. Субботіна НАНУ

**СЕМЕНОВА Ю.В.**, аспірант Інституту геофізики  
ім. С.І. Субботіна НАНУ

## АНОТАЦІЯ

*В статті розглянуто підходи до визначення резонансних частот верхньої частини розрізу геологічного середовища під будівельним майданчиком для сейсмостійкого проектування. Розглядаються переваги та недоліки лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції відгуку ґрунту на сейсмічні впливи при землетрусах.*

*The methods of determination of resonance frequencies of the upper part of the geological environment section for the building site for the needs of earthquake engineering are discussed in this paper. Advantages and disadvantages of linear, equivalent linear and nonlinear ground response modeling of seismic effects under earthquakes are considered.*

## КЛЮЧОВІ СЛОВА

сейсмічне мікрорайонування, амплітудно-частотна характеристика ґрунтів, сейсмостійке будівництво

Задачею сейсмічного мікрорайонування (СМР) є оцінка впливу локальних інженерно-геологічних умов будівельного майданчика на інтенсивність, форму запису і спектр коливань поверхні ґрунту при сильних землетрусах. Ці параметри визначають характер руйнувань будівель в різних ґрунтових умовах.

Слід зауважити, що навіть при сприятливих, з точки зору сейсмічної жорсткості, умовах майданчика, не гарантується сейсмічна безпека побудованих на ньому будинків або споруд, так як у ряді випадків в ґрунтах можуть виникати резонансні ефекти (суттєве підсилення коливань на конкретних частотах).

Для сейсмостійкого проектування необхідно знати не лише величину інтенсивності коливань і значення максимальних пікових прискорень, а також інформацію щодо розподілення по частоті сейсмічних впливів. Відомо, що ґрунтова товща під будівельним майданчиком веде себе як фільтр: на деяких частотах ґрунтова товща передає коливання майже без змін, а на інших - або підсилює їх, або поглинає. При проектуванні сейсмостійких будівель і споруд важливо не допускати, щоб максимумами частотної характеристики ґрунтової товщі співпадали з власними частотами будівель і споруд.

Частоти, яким відповідають резонансні підсилення, можна визначити з амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) ґрунтової товщі. При цьому бажано розглядати широкий діапазон частот від 0,05 до 20 Гц. Цей діапазон представляє найбільший інтерес при СМР, так як саме в ньому знаходяться частоти коливань основних типів будівель, споруд та їх відповідальних конструкцій (табл. 1), а також максимумами спектрів коливань при сильних землетрусах [1].

АЧХ верхньої частини ґрунту під будівельним майданчиком можна отримати інструментально, на основі записів коливань слабких землетрусів і мікросейсм. Реєстрація коливань слабких землетрусів не завжди є можливою в районах з низькою сейсмічністю і дає не дуже точні результати через промислові шуми. З огляду на це, сейсмічні спостереження на будівельному майданчику зазвичай зводяться до реєстрації мікросейсм. В формуванні поля мікросейсмічних коливань, як правило, беруть участь багаточисленні природні та антропогенні джерела, вклад яких погано піддається врахуванню. Через значні похибки, ме-



Таблиця 1. Приблизні значення власних частот будинків [7]

Тип споруди	Власна частота (Гц)
Одноповерхові будівлі	10
3 - 4 поверхові будівлі	2
Високі будівлі (10 - 20 поверхів)	0,5...1,0
Висотні будівлі	0,17

тод реєстрації високочастотних мікросейсм дає лише приблизні значення АЧХ ґрунтової товщі. Як правило, цей метод застосовується лише для оцінки приросту сейсмічної інтенсивності в балах макросейсмічної шкали.

Альтернативою інструментальним методам є розрахункові.

Слід зазначити, що розрахункові методи забезпечують достатньо точні результати лише при наявності надійних інженерно-геологічних та сейсмологічних даних про будову ґрунтової товщі будівельного майданчика, а також про літологію геологічних шарів і фізико-механічні властивості складових матеріалів. На основі зазначених даних будуються моделі ґрунтового середовища під будівельним майданчиком (з довільними границями розділу або горизонтально шаруваті вертикально-неоднорідні моделі), що служать вхідними даними при використанні розрахункових методів визначення його частотних характеристик.

Отримання даних для побудови горизонтально-шаруватих моделей середовища є значно простішим і реальнішим. Розраховані в таких моделях поля є стійкіші до похибок у вхідних даних. У зв'язку з цим, використання саме таких моделей передбачається ДБН В.1.1.-12:2014 та Eurocode 8. Для розрахунків частотних характеристик горизонтально-шаруватих моделей геологічного середовища використовується матричний метод Томпсона-Хаскела [2].

При моделюванні реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи можна використовувати лінійний або нелінійний підхід. Лінійний – описується лінійно-пружною моделлю реакції середовища. Вважається, що при динамічних навантаженнях процеси в ґрунтах будуть відповідати лінійній частині графіка закону Гука (залежності напруження - деформація). Але при інтенсивних сейсмічних впливах в ґрунтах виникають явища, що не можуть бути описані лінійною теорією пружності. Нелінійність залежності між напруженнями та деформаціями в ґрунтах при достатньо високих напруженнях призводить до того, що при збільшенні інтенсивності землетрусу порушується пропорційність між напруженнями та деформаціями, настає явище насичення, коли напруження зростають повільніше, ніж при менших значеннях деформацій. Значення напружень, при яких зникає пропорційність залежності між напруженнями та деформаціями, є порогом пружності. Поріг пружності для різних категорій ґрунтів є різним [3] і визначається, в першу чергу, поглинанням ґрунтами сейсмічної енергії [4]. Тому, для аналізу реакції ґрунту на сейсмічні впливи, останнім часом, значна увага приділяється нелінійним підходам [3, 5, 6].

Механізми лінійних перетворень сейсмічних хвиль в приповерхневій ґрунтовій товщі, що приводять до підсилення коливань і резонансних явищ, вивчені до-

статньо добре. На відміну від нелінійних механізмів, вони в повній мірі враховуються в практиці сейсмічного мікрорайонування. Оскільки сейсмічне мікрорайонування зазвичай проводиться для територій, що можуть піддаватися впливам сильних землетрусів, адекватне врахування нелінійного відгуку ґрунту є необхідним [6]. Відгук ґрунту

можна вважати лінійним при слабких сейсмічних впливах. При впливах високої інтенсивності вклад нелінійності буде залежати від величини сейсмічних деформацій [3, 6].

Нелінійність відгуку приповерхневої ґрунтової товщі призводить як до зміни спектрального складу сейсмічних коливань, іноді дуже суттєвої, так і до зміни підсилення сейсмічних коливань [6]. При достатньо високій інтенсивності коливань починають діяти нелінійні механізми поглинання, що призводять до послаблення коливань на високих частотах, але не послаблюють при цьому низькочастотні коливання. Зміни спектрального складу коливань на поверхні, пов'язані з нелінійністю відгуку ґрунту, проявляються в зміщенні резонансних частот в низькочастотну область. Підсилення сейсмічних коливань на поверхні зменшуються внаслідок нелінійності відгуку ґрунту, порівняно з лінійним відгуком в сухих ґрунтах (при заляганні ґрунтових вод на глибині 10 м і більше). В водонасичених ґрунтах (коли рівень ґрунтових вод знаходиться на глибині менше 10 м) таке підсилення є менш помітним. Зазначені висновки зроблено як на основі аналізу реальних записів сильних землетрусів, так і за результатами чисельного моделювання [6].

В практиці сейсмостійкого будівництва США широко використовується еквівалентне лінійне моделювання відгуку ґрунту на сейсмічні впливи [7]. ґрунт розглядається як лінійний в'язко-пружний матеріал, а його нелінійні властивості враховуються шляхом введення залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації зсуву. Такі залежності підбираються для кожного шару моделі ґрунтового середовища окремо, за даними інформації про літологічний склад і глибину залягання шарів ґрунту, одержаними на основі результатів лабораторних досліджень. Наприклад, за даними робіт [8, 9].

Еквівалентне лінійне моделювання використовується в програмах SHAKE, PROSHAKE, QUD-4, FEDAM, LUSH, FLUSH, EERA, FDEL тощо. Алгоритми програм викладено в публікаціях [7, 10].

На рис. 1 приведено АЧХ ґрунтового середовища під будівельним майданчиком на проспекті Оболонському (біля озера Опечень) в м. Києві, отриману: а) лінійним моделюванням, в) еквівалентним лінійним моделюванням з використанням програмного комплексу ProShake. Видно, що АЧХ при лінійному моделюванні (при якому декремент поглинання вважається сталою величиною для кожного шару) відрізняються від АЧХ, отриманої за допомогою еквівалентного лінійного моделювання (в якому враховується, що коефіцієнт поглинання і модуль зсуву залежать від рівня деформації).

При лінійному моделюванні відгуку ґрунту на сейсмічні впливи відбувається лише амплітудна трансформація частотних складових вихідного спектра, а при еквівалентному лінійному моделюванні,



**Рис.1.** Амплітудно-частотна характеристика ґрунтового середовища під будівельним майданчиком на проспекті Оболонському (біля озера Опечень) в м. Києві, отримана а) лінійним моделюванням, в) еквівалентним лінійним моделюванням з використанням програмного комплексу ProShake.

як видно з рис. 1, абсолютні максимуми зміщуються в область нижчих частот. Досвід показав, що використання лінійного моделювання може привести до появи неправдивих резонансних максимумів на амплітудних частотних характеристиках ґрунтової товщі. Схожість результатів еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання залежить від ступені нелінійності геологічного середовища. Обидва методи дають гарні результати реальної оцінки відгуку ґрунту при невеликих деформаціях, а при дуже великих деформаціях нелінійне моделювання дає результати ближчі до встановлених емпірично.

Очевидним є висновок, що, обравши неправильний підхід до моделювання відгуку ґрунту на сейсмічні впливи від землетрусів, можна отримати хибні значення резонансних частот ґрунтової товщі, що під час землетрусу може призвести до руйнування будівлі внаслідок не врахованих при проектуванні резонансних ефектів.

Для умов України слід перевірити на практиці важливі висновки А.С. Алешина [3], згідно яких, при моделюванні відгуку ґрунту на сейсмічні впливи, при розрахунковій сейсмічній інтенсивності до 9 балів включно, для ґрунтів I категорії можна використовувати лінійну залежність між напруженнями і деформаціями. Для ґрунтів II категорії - можна припускати лінійну залежність до інтенсивності 8 балів. А для ґрунтів III і IV категорії - нелінійність повинна враховуватися, починаючи з 6-7 балів. Таким чином, з врахуванням карти загального сейсмічного районування території України, для будинків і споруд класу відповідальності ССЗ лінійне моделювання при сейсмічному мікрорайонуванні будівельних майданчиків на території України допускається проводити лише для ґрунтів I і II категорії. А для ґрунтів III і IV категорії слід враховувати їх можливу нелінійну поведінку. Слід врахувати також, що накопичення сейсмічної енергії (резонансні ефекти) суттєво залежать від тривалості сейсмічних коливань, тобто при місцевих землетрусах резонансні ефекти на території України є менш небезпечними, ніж при сильних підкорових землетрусах із сейсмоактивної зони Вранча.

## ВИСНОВКИ

Сучасна парадигма сейсмічного захисту будівель і споруд в сейсмічних районах передбачає перехід від інтенсивного застосування все міцніших будівель і споруд, проєктованих з більшою кількістю сталі і бетону, до використання даних про частотні характеристики ґрунтової товщі в основі цих будівель, з метою уникнення збігання власних періодів сейсмічних коливань, підсилюваних локальними ґрунтовими умовами, з власними періодами коливань будинків і споруд. Такий підхід гарантує не лише їх високу сейсмостійкість, але і мінімізує затрати на заходи сейсмічного захисту. З огляду на те, що при слабких сейсмічних впливах результати лінійного і еквівалентного лінійного моделювання є близькими, а при зростанні прогнозованих сейсмічних впливів до вказаних на картах ЗСР-2004, еквівалентне лінійне моделювання дає точніші результати, саме його доцільно використовувати в практиці сейсмічного проєктування і будівництва в сейсмічних умовах платформної частини території України.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию; ред. О.В. Павлов - М.: Наука, 1988. - 223 с.
2. Haskell N.A. Asymptotic Approximation for the Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation / Haskell N.A. // J. Appl. Phys. - V.22. - 1951. - P.157-168.
3. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов / Алешин А.С. - М.: ООО "Светоч Плюс", 2010. - 293 с.
4. Вознесенский Е.А. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах / Вознесенский Е.А., Кушнарева Е.С., Фуникова В.В. - М.: ФЛИНТА, 2014. - 104 с.
5. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населённых пунктов и больших строительных площадок / Заалишвили В.Б. - М.: Наука, 2009. - 350 с.
6. Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет / Павленко О.В. - М.: Научный мир, 2009. - 260 с.
7. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering / Kramer S.L. // N.J., Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. - 672 p.
8. Ishibashi I. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay / Ishibashi I., Zhang X. // Soils and Foundations. - V. 33. - No.1. - 1993. - P.182-191.
9. Seed H.B. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential / Seed H.B., Idriss I.M. // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. - V.97. - № SM9, 1971. - P. 1249-1273.
10. Schnabel P.B. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites / Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. // Report No. EERC 72-12. - Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1972. - 102 p.