

УДК 624.012

<sup>1</sup> **В.П. Максименко**, к.т.н.;

<sup>2</sup> **М.С. Барабаш**, д.т.н, професор, НАУ, директор ;

<sup>3</sup> **Б.Ю. Писаревський**, аспірант., інженер.

<sup>1</sup> ДП "Науково-дослідний інститут будівельного виробництва ім. В.С. Балицького" м.Київ

<sup>2,3</sup> ТОВ "ЛІРА-САПР" м.Київ

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПІДСИСТЕМ

**Анотація.** У статті розглядається метод для динамічного аналізу взаємодії системи "наземна частина - основа - ґрунт". Використовується аналіз експериментальних даних будівлі, після дії сейсмічного навантаження. Методика дозволяє вирішувати динамічні задачі разом з урахуванням фізичної нелінійності. Розглядається проблема вирішення динамічної задачі в часі методом підсистем. Приведено практичний приклад розрахунку залізо-бетонного каркасу будівлі в м. Одеса з урахуванням сумісної роботи основа-палі-будівля.

**Ключові слова:** Метод скінчених елементів, ґрунтова основа, динамічні навантаження.

**Вступ.** Вплив на будівельні конструкції хвиль тієї чи іншої природи є актуальною задачею для нашого енерго-насиченого світу. Автори розглядають зовнішні динамічні впливи, а також дії динамічних полів в ґрунті на об'єкт, який був в законсервованому стані 10 років. Для оцінки напружено-деформованого стану конструкцій використовується фізична модель, в якій виконано обстеження, що довело необхідність виконання розрахунку каркасу будівлі для виявлення власних частот коливань окремих конструктивних елементів. Ґрунти та фундаменти різного типу наближено, що цілком допустимо, розглядаються як деякі вибіркові демпфери, що змінюють спектр впливу. При аналізі спектральних відгуків конструкцій будівель останні представляються як вузькосмугові фільтри, які вирізають моди в початкових спектрах.

На прикладі будівлі, що розглядається у статті, застосовується практика комплексного дослідження системи "ґрунт - основа - наземна частина" на стадії зведення та при подальшій експлуатації. Велику

роль відіграє тип фундаменту і його властивості. Але діючі нормативні документи не завжди враховують особливості фундаменту, а від поведінки фундаменту залежить сейсмостійкість верхньої будови. Найчастіше в нормативних матеріалах для розрахунку (оцінки) сейсмостійкості будівель конкретні типи сполучення наземної частини будівлі і фундаменту розглядаються як "жорстке защемлення" (тобто нехтують їхніми реальними властивостями і можливостями). Врахування складних ґрунтових умов оцінюється досить грубо, сейсмічність території міста визначається за досить усередненими показниками, зовсім не враховуються демпфуючі властивості ґрунту та наскрізне проходження хвиль.

Авторами в програмному комплексі ЛІРА-САПР розроблені методики, що дозволяють створювати адекватні комп'ютерні моделі і проводити ряд чисельних експериментів на сейсмічні впливи. Реалізовано кілька методів розрахунку на сейсмічні впливи, а саме метод спектрального аналізу і метод розрахунку з урахуванням нелінійності на основі прямого



Рис.1. Візуалізація сімейно-оздоровчого комплексу



Рис. 2. Фотофіксація тріщин плити на позначці +69.3м

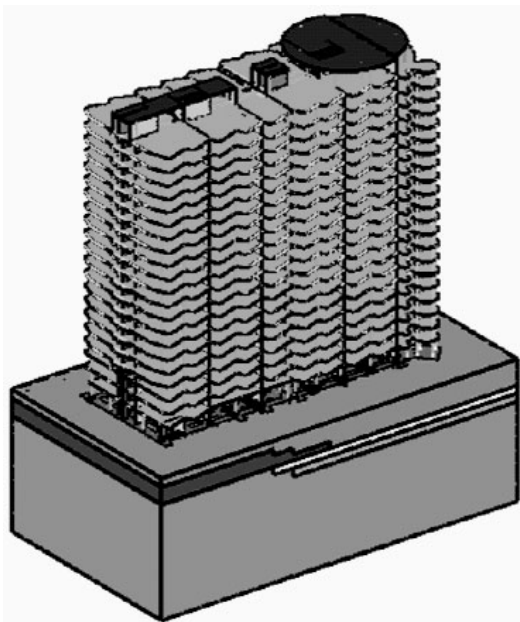


Рис. 3. Загальний вигляд розрахункової схеми будівлі на трьох вимірній ґрунтовій основі

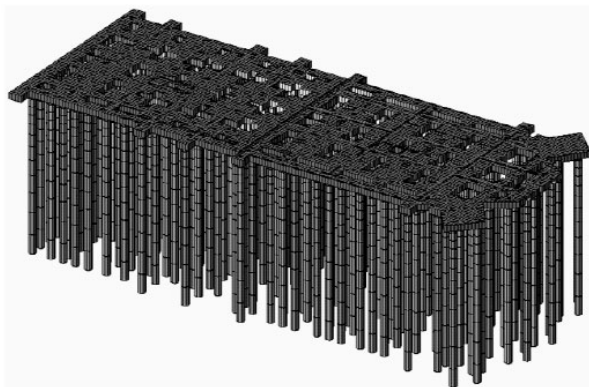


Рис. 4. 3-Д вигляд фундаментного ростверку будівлі

Матеріали:

1.	Бетон класу:	
	фундаментна плита	не нижче ніж „В25” (по результатах обстеження)
	плити перекриття (покриття), стіни,	- не нижче „В20”
2.	Арматура класів:	-АIII, АI

Конструктивні розміри:

1.	Товщина фундаментних ростверків	- 1.0м;
2.	Налі : Ø110см, Налі : Ø120см,	Проз. 320; 362.5тс Рмах сейсм. =385тс
3.	Товщина плит перекриття підвальных поверхів	0.25см;
4.	Товщина плит перекриття типових поверхів і покриття	0.23 м (0.20м);
5.	Товщина стін, діафрагм поверхів	0.3, 0.25м
6.	Висота підземного поверху	3,4 м
	Висота 1-2-го поверхів	3,3, 3,3 м
	Висота типового поверху	3,3 м
	Висота поверху надбудови	3,8м

інтегрування [1-7]. Технологія спектрального методу ґрунтується на застосуванні реальних динамічних характеристик системи "будівля - ґрунт - основа".

У діючих нормативних документах прийнято, що сейсмічне прискорення фундаментів (і всієї будівлі) і основи збігається. Однак, експериментальні дані свідчать, що прискорення фундаментів можуть в кілька разів відрізнятись від прискорень ґрунтів основи. Цю обставину можна пояснити тим, що не вся енергія сейсмічного збурення від ґрунту основи передається на фундамент, та на верхню частину будівлі.

Методика комп'ютерного моделювання, що базується на методі підсистем, дозволяє врахувати ефекти наскрізного проходження хвиль в ґрунті.

**Основний зміст.** Початковий проект "Сімейно-оздоровчого комплексу на 8-й станції Великого Фонтану" був розроблений ТОВ "Архпроект-МДМ" у 2004 році. Будівництво монолітного каркасу 20-ти поверхового комплексу (рис. 1) відбувалося в 2006-2008 роках. Після тривалої перерви у виконанні робіт, пов'язаної з відсутністю фінансування, будівництво було відновлено у 2014 році. За результатами обстеження проведеного у червні-серпні 2014 року було встановлено що частина конструкцій має бетон що не відповідає проектному класу за міцністю на стиск. За результатами обстеження було рекомендовано виконати перевірочний розрахунок каркасу будівлі, в якому прийняти міцність бетону усіх несучих конструкцій каркасу В20.

Враховуючи, що в листопаді 2014р. станціями

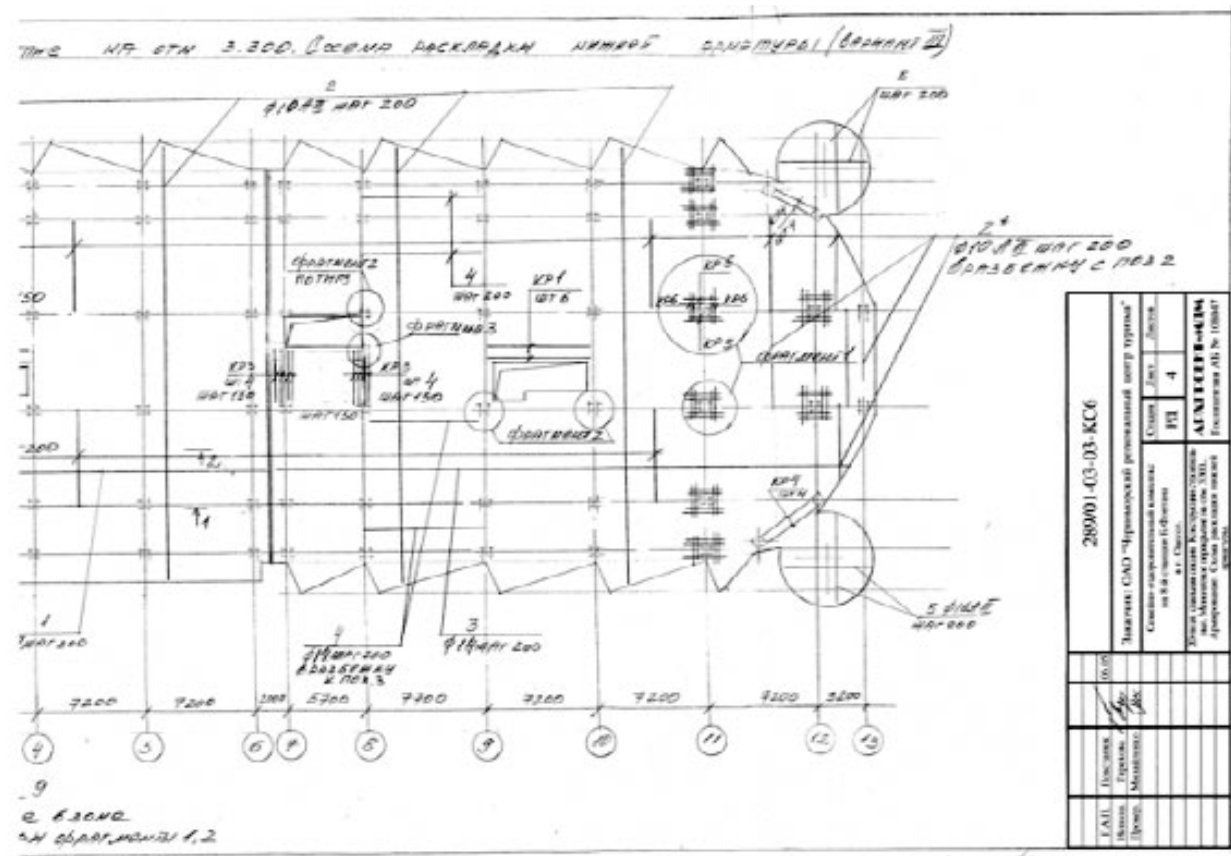
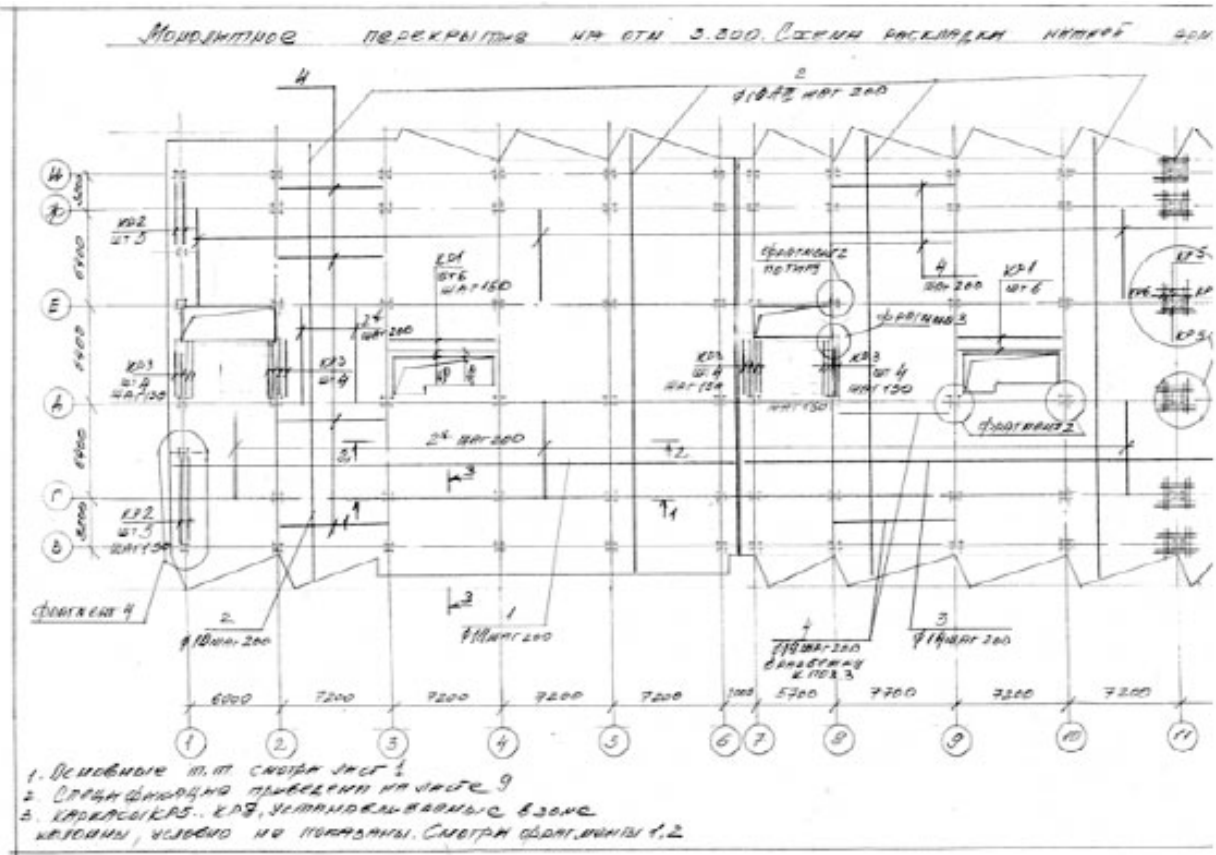


Рис. 5. Схема армування монолітної плити перекриття

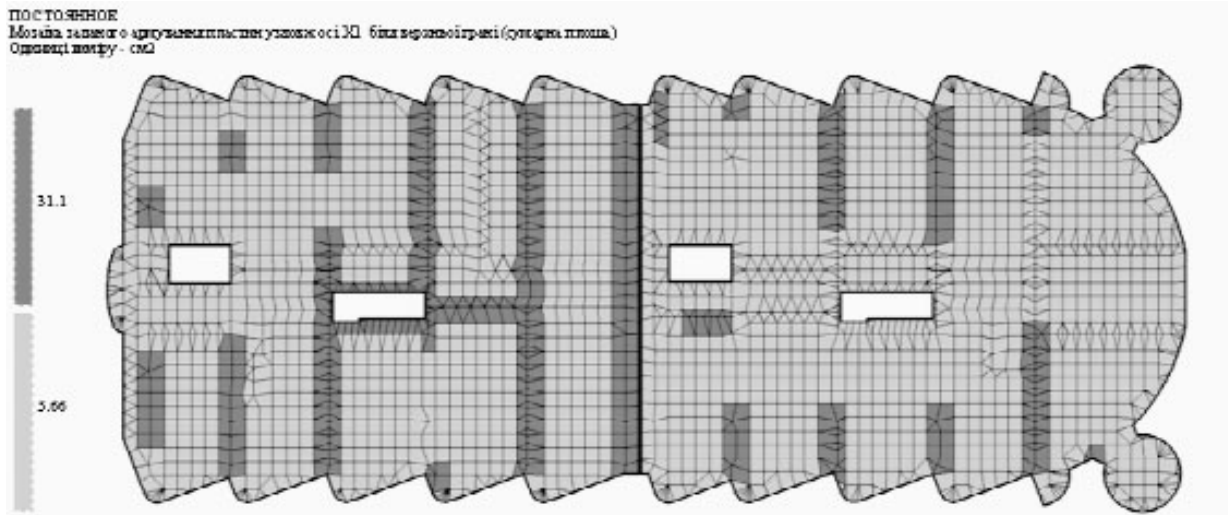


Рис. 6. Схема армування монолітної плити перекриття в ПК "ЛІРА-САПР"

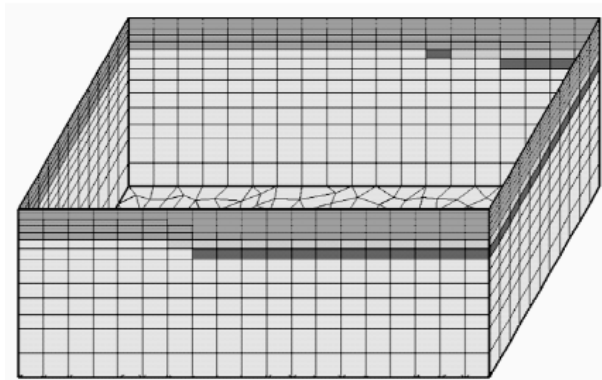


Рис. 7. Використання методу підсистем при моделюванні ґрунтової основи

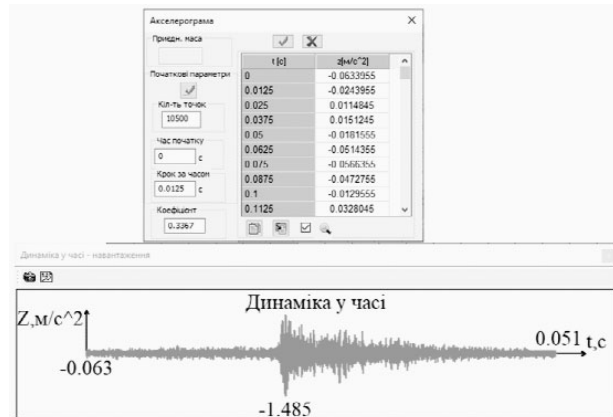


Рис. 8. Акселерограма, що моделює 6-и-бальний землетрус

спостереження за сейсмічною активністю в м.Одеса зафіксований 6-и бальний землетрус за шкалою MSK-64, зафіксовані тріщини овалної плити на позначці +69.3м. Плита вкрита сіткою тріщин в прольотних зонах та має значні прогини (більше 3 см, див. рис. 2).

**Фізично нелінійний розрахунок**-Розрахункова модель просторової схеми конструкцій виконана в програмному комплексі ПК "ЛІРА-САПР" (рис. 3). Розрахункові навантаження на елементи конструкцій задані у відповідності з завданням на розрахунок.

Фундаментні ростверки Секції-1 та Секції-2 комплексу товщиною 1.0м на пальному полі з розрахунковою несучою спроможністю 362.5тс, та максимальною при сейсмічному навантаженні 435.5тс. Проектні палі прийняті буронабивні діаметром 110, та 120см. Абсолютна відмітка верху паль виду-1 - 24,75м, виду-2 – 23,25м. У відповідності з виконаним проектом пального поля змодельовано існуючий фундаментний ростверк (рис. 4).

Було враховано фізичні нелінійні властивості конструкції. Для цього виходячи з креслень КЗ (рис. 5) задані нелінійні властивості матеріалів та арматури (рис. 6). Також задані нелінійні закони для елементів ґрунта.

Для розрахунку на динамічні впливи в часі використано метод, що запропонований у роботі [1]. На межі області дослідження були задані елементи методу підсистем (рис. 7). Також на всі вузли ґрунтового масиву задані акселерограми (рис. 8), що моделюють дію 6-и-бального сейсмічного впливу.

Інтегрування диференціальних рівнянь руху вузлів скінченно-елементної моделі конструкції зводиться до пошуку коефіцієнтів в різноманітних різницевих методах (Ньюмарка, Вільсона, Рунге-Кутта, Хаболта) центральних різниць, лінійного прискорення та ін. Також можливе врахування геометричної, фізичної та конструктивної нелінійностей. При цьому перевизначення матриць дотичної і геометричної жорсткостей елементів необхідно проводити на кожному кроці інтегрування за часом.

Вважається, що початкові швидкості  $\{U\}$  нульові ( $\dot{u}(0)=0$ ), а початкові переміщення  $\{U\}$  отримані з результатів рішення при статичному завантаженні (передісторії) ( $\ddot{u}(0) = \ddot{u}_1$ ).

З розгляду системи звичайних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами випливає, що апроксимувати швидкості, прискорення і переміщення можна будь-якими скінченно-різницевиими виразами в переміщеннях.

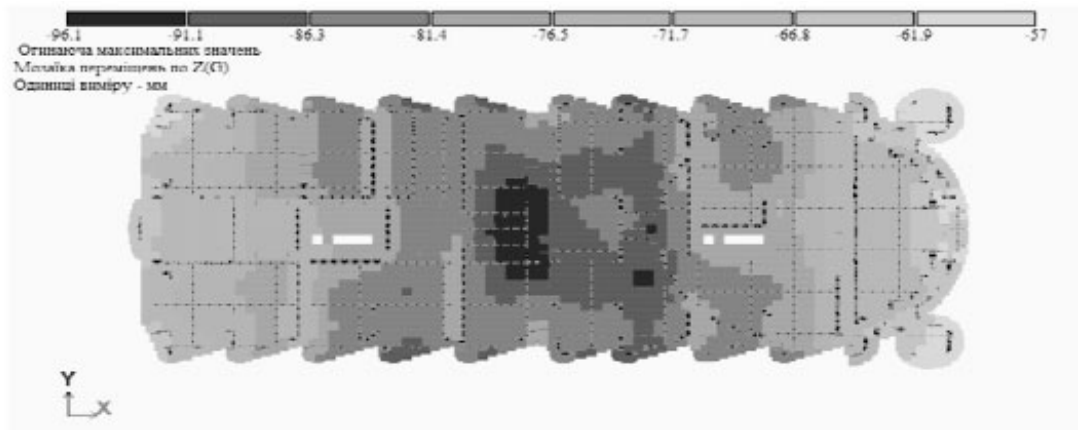


Рис. 9. Максимальні переміщення вздовж осі Z

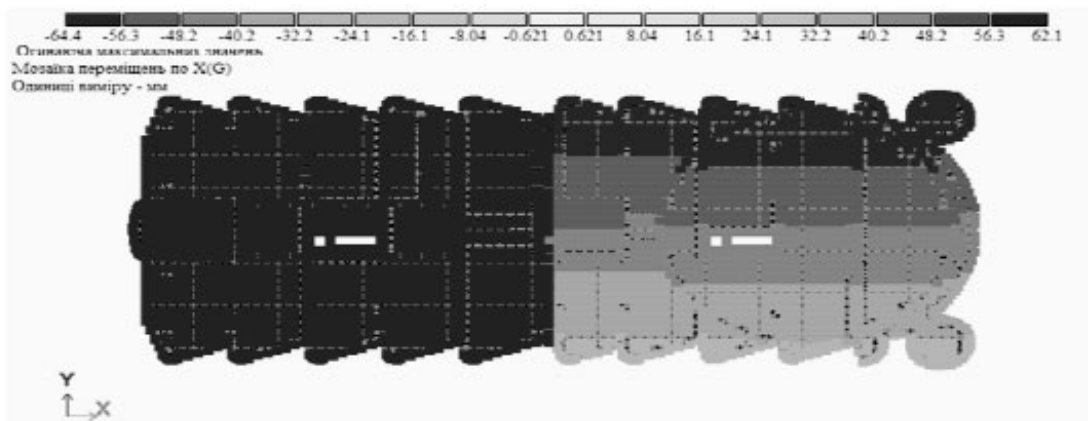


Рис. 10. Максимальні переміщення вздовж осі X

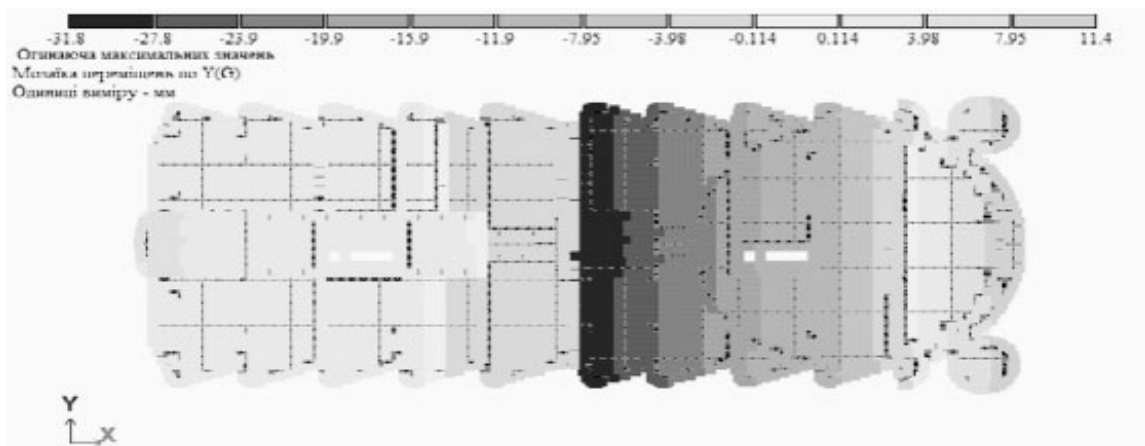


Рис. 11. Максимальні переміщення вздовж осі Y

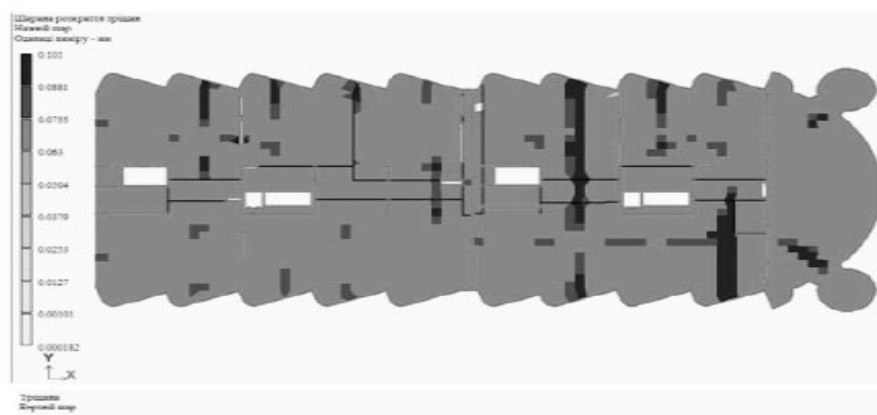


Рис. 12. Ширина розкриття тріщини плити перекриття

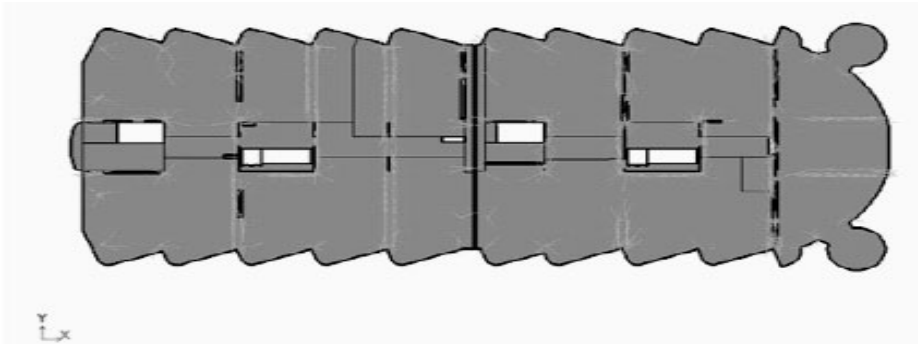


Рис. 13. Напрямок тріщин у верхньому шарі плити перекриття

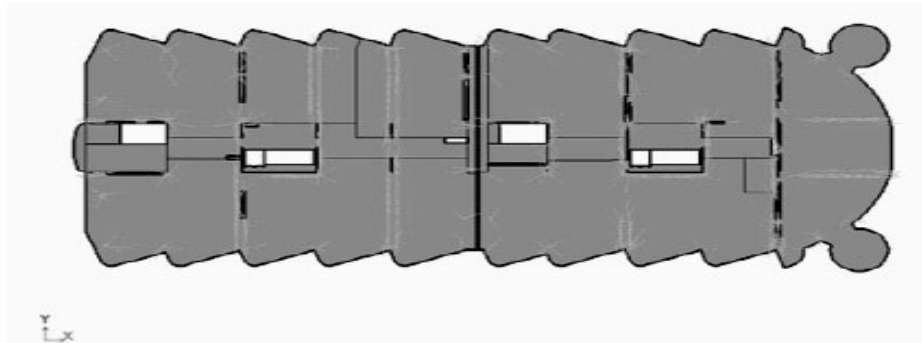


Рис. 14. Напрямок тріщин у нижньому шарі плити перекриття

Результати визначення напружено-деформованого стану плити перекриття показані на рис.9 -14.

Запропонована методика дає можливість враховувати нелінійність в задачах динаміки споруд без збільшення розрахункової схеми, що значно скорочує час розрахунку без суттєвого зменшення точності.

**Висновки.** Досліджено та встановлено деякі особливості модального аналізу, що виконується модифікованим методом підсистем. Було вдосконалено чисельну методику, що реалізує моделювання нелінійної деформації будівельних конструкцій з урахуванням наскрізного проходження хвиль в ґрунті. Обґрунтовано застосування методу прямого інтегрування руху для моделювання динамічних впливів, що дасть попередній інженерний прогноз щодо поведінки будівлі і окремих елементів при дії на них зовнішніх навантажень, що залежать від часу.

Проаналізовано та вдосконалено математичні моделі розповсюдження коливань у ґрунті з врахуванням матеріального демпфування, розроблено моделі ґрунту, що дозволять уточнити зони можливого впливу на будівлі, що зводяться та експлуатуються. Розвиток математичного апарату і програмних засобів дозволяють сьогодні виконувати розрахунки складних будівельних споруд з урахуванням різних впливів на їх конструктивні системи і виконувати моделювання процесів, що призводять до зміни НДС. Ефективним методом розрахунків є програми, засновані на методі скінчених елементів. Реалізований в даній роботі підхід до розрахунку багатоповерхові монолітної 20-ти поверхової будівлі являє собою методику розрахунку складних будівельних споруд. Ця методика є універсальною, за її допомогою можна досліджувати будівлі будь-якого типу, що знаходиться під дією зовнішніх впливів техногенного характеру.

#### Література

1. Gorodetsky, A.S., Pikul, A.V. u Pysarevskiy, B.Y. 2017. Моделирование работы грунтовых массивов на динамическое воздействие. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 13, 3 (сен. 2017), 34-41.
2. Barabash M.S., Iegupov V., Pysarevskiy B. Simulation of the Seismic Resistance of Buildings with Account of Unlimited Soil Space EcoComfort 2020. *Lecture Notes in Civil Engineering*. - 2020. - Vol.100, - P. 26-33/
3. Barabash M.S., Pisarevskiy B., Bashynskiy Y Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program) *Civil and Environmental Engineering*, 2020. - Vol. 16, Issue 1, P. 63-70.
4. Барабаш М.С., Костира Н.О., Башинський Я.В., Писаревський Б.Ю Напружено-деформований стан конструкцій з урахуванням категорії технічного стану будівлі та зміни інтенсивності сейсмічного навантаження *Проблеми розвитку міського середовища: зб. наук. праць*. - К.: НАУ, 2020. - Вип. 1 (24). - С. 11-22.
5. Barabash M.S., Pisarevskiy B., Bashynskiy Y Taking into Account Material Damping in Seismic Analysis of Structures. *Technical Journal*, 2020. -Vol. 14. - No. 1, P.55-59
6. Barabash M.S., Kostyra N., Pisarevskiy B. Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, 20-22 November 2019. - Kharkiv, (Ukraine), 2019. - Vol. 708. - conf. 1.*
7. Барабаш М.С., Пиккуль А. В., Писаревский Б. Ю Чисельно-аналітичний методологічний підхід до моделювання матеріального демпфування *Наука та будівництво*. 2019. Т. 21. - № 3. С.14-20.

**References**

1. Gorodetsky, A.S., Pikul, A.V. u Pysarevskiy, B.Y. 2017. Моделирование работы грунтовых массивов на динамическое воздействие. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 13, 3 (сен. 2017), 34-41.
2. Barabash M.S., Iegupov V., Pysarevskiy B. *Simulation of the Seismic Resistance of Buildings with Account of Unlimited Soil Space EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. - 2020. - Vol.100, - P. 26-33/
3. Barabash M.S., Pisarevskiy B., Bashynskiy Y *Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program) Civil and Environmental Engineering*, 2020. - Vol. 16, Issue 1, P. 63-70.
4. Барабаш М.С., Костюра Н.О., Башинський Я.В., Пісаревський Б.Ю *Напружено-деформований стан конструкцій з урахуванням категорії технічного стану будівлі та зміни інтенсивності сейсмічного навантаження Проблеми розвитку міського середовища: зб. наук. праць*. - К.: НАУ, 2020. - Вип. 1 (24). - С. 11-22.
5. Barabash M.S., Pisarevskiy B., Bashynskiy Y *Taking into Account Material Damping in Seismic Analysis of Structures. Technical Journal*, 2020. -Vol. 14. - No. 1, P.55-59
6. Barabash M.S., Kostyura N., Pisarevskiy B. *Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, 20-22 November 2019. - Kharkiv, (Ukraine), 2019. - Vol. 708. - conf. 1.*
7. Барабаш М.С., Пікуль А. В., Пісаревський Б. Ю *Чисельно-аналітичний методологічний підхід до моделювання матеріального демпфування Наука та будівництво. ? 2019. ? Т. 21. - № 3. ? С.14-20.*

<sup>1</sup> V.P. Maksimenko, Ph.D;

<sup>2</sup> V.C. Barabash, Doctor of Science;

<sup>3</sup> B.Yu. Pisarevsky, Postgraduate.

<sup>1</sup> State Enterprise "Research institute of building production named V.S. Balitsky", Kyiv

<sup>2, 3</sup> LIRA-SAPR, Kyiv.

**METHOD OF ASSESSMENT OF STRESS-DEFORMED CONDITION OF STRUCTURAL STRUCTURES ON THE BASIS OF SUBSYSTEMS METHOD**

**Abstract.** *The article considers a method for dynamic analysis of the interaction of the system "ground part - base - soil". The analysis of experimental data of the building, after action of seismic loading is used. The technique allows to solve dynamic problems taking into account physical nonlinearity. The problem of solving a dynamic problem in time by the method of subsystems is smoothed out. A practical example of calculating the reinforced concrete frame of a building in Odessa, taking into account the joint work of the foundation-pile-building.*

**Keywords:** *Finite element method, soil base, dynamic loads.*