

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

**ГАЙДАР АНАСТАСІЯ МИКОЛАЇВНА**



УДК 624.04: 519.6

**РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ І  
ПОЛІМЕРБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ДЕМПФЕРАМИ СУХОГО ТЕРТЯ  
ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ**

05.23.17 – будівельна механіка

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Данішевський Владислав Валентинович**,  
Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська  
державна академія будівництва та архітектури”,  
завідувач кафедри будівельної механіки та опору  
матеріалів.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Волкова Вікторія Євгенівна**, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, завідувач кафедри цивільної інженерії, технології будівництва та захисту довкілля;

доктор технічних наук, професор **Зеленцов Дмитро Гегемонович**, Український державний хіміко-технологічний університет, завідувач кафедри інформаційних систем.

Захист відбудеться « 22 » квітня 2021 р. о 14.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.02 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського 24-а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського 24-а та на сайті академії: <https://pgasa.dp.ua/dissertation/>

Автореферат розісланий « 19 » березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,

доктор технічних наук, професор  С. О. Слободянюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Згідно принципів сталого розвитку та циркулярної економіки, важливим завданням сучасного будівництва є розробка і використання легковагових економічних конструкцій, які характеризуються низьким споживанням ресурсів на всіх етапах свого життєвого циклу. Стійкість таких конструкцій до сейсмічних навантажень забезпечується за допомогою спеціальних пристроїв: сейсмічної ізоляції, інерційних гасників коливань та демпферів різних типів. В останні роки широке поширення одержали демпфери сухого тертя, які відрізняються простотою і надійністю конструкції, низькою вартістю, зручністю монтажу, а також високими дисипативними характеристиками.

Визначення місць розташування демпферів всередині будівлі є складною задачею, яка потребує комплексного аналізу динамічних властивостей споруди і, як правило, не може бути розв'язана у рамках стандартних методів проектування. Тому актуальною проблемою є розробка нових методів розрахунку конструкцій із демпферами сухого тертя, які б дозволяли знаходити раціональні проектні рішення для мінімізації динамічних та сейсмічних впливів.

З математичної точки зору, пошук раціонального розташування демпферів є задачею нелінійної неопуклої оптимізації, для розв'язання якої можуть застосовуватися різні підходи. Останніми роками інтенсивно розвиваються штучні методи ройового інтелекту, які мають ряд переваг у порівнянні з класичними алгоритмами: не потребують обчислення градієнтів цільової функції, уникають «зависання» у локальних екстремумах і забезпечують рівномірне дослідження усього простору розв'язків. Тому тема та завдання дисертаційної роботи, пов'язані з розвитком методу рою частинок для визначення раціонального розташування демпферів у каркасних будівлях, а також застосування одержаних результатів при динамічному моделюванні будівель та визначенні їх напружено-деформованого стану під дією динамічних навантажень, є беззаперечно актуальними для подальшого розвитку будівельної механіки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у рамках держбюджетної науково-дослідної теми №55 “Міцність, жорсткість, стійкість і коливання однорідних і неоднорідних стержнів, пластин, оболонок та композиційних конструкцій, включаючи об'єкти біологічного походження”, державний реєстраційний номер 0116U006049, 2016–2020р.р., виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає у визначенні місць раціонального розташування демпферів сухого тертя у багатоповерхових каркасних будівлях за допомогою методів ройового інтелекту, у динамічному моделюванні будівель із демпферами сухого тертя та дослідженні їх коливань під дією періодичних і сейсмічних навантажень, у порівнянні динамічних характеристик будівель, виготовлених із різних матеріалів (залізобетону та полімербетону).

Завдання досліджень:

1. Розвиток методу рою частинок для задач раціонального проектування будівель. Розробка програмного коду для реалізації даного методу. Знаходження екстремумів тестових функцій. Аналіз впливу вагових коефіцієнтів на збіжність методу та точність одержаних розв'язків. Порівняльний аналіз методу рою частинок

і генетичного алгоритму.

2. Чисельне моделювання багатоповерхового каркасного будинку у ПК ЛІРА-САПР. Модальний аналіз та розрахунок на сейсмічне навантаження. Дослідження нестационарних коливань будинку. Визначення раціональних місць розташування демпферів сухого тертя для зменшення амплітуди коливань під дією періодичного навантаження. Дослідження динамічних характеристик полімербетонного каркасу будинку.

3. Розробка аналітичної динамічної моделі багатоповерхового каркасного будинку. Модальний аналіз та порівняння аналітичних результатів для власних частот із чисельними розв'язками у ПК ЛІРА-САПР.

4. Розробка математичної моделі сейсмічного навантаження. Дослідження впливу розподілу спектральної густини енергії землетрусу на акселерограми для різних типів ґрунтів.

5. Дослідження нестационарних коливань багатоповерхового каркасного будинку під дією періодичних і сейсмічних навантажень. Чисельне розв'язання нелінійних динамічних рівнянь методом Рунге-Кутти. Визначення раціональних місць розташування демпферів сухого тертя для мінімізації амплітуди коливань та перекосів поверхів. Порівняльний аналіз динамічних реакцій залізобетонного та полімербетонного каркасів будинків.

**Об'єкт дослідження** – процес нестационарних коливань каркасних будівель із демпферами сухого тертя.

**Предмет дослідження** – динамічні властивості залізобетонних і полімербетонних будівель із демпферами сухого тертя, аналітичні та чисельні розв'язки задач нестационарних коливань будівель, вплив розташування демпферів на амплітуду коливань та перекося поверхів.

**Методи дослідження.** Чисельні розв'язки задач нестационарних коливань каркасних будівель одержано за допомогою методу скінчених елементів у ПК ЛІРА-САПР. Дослідження динамічної поведінки будівель на основі наближеної моделі із зосередженими масами виконано шляхом чисельного інтегрування рівнянь руху методом Рунге-Кутти. Для моделювання землетрусу застосовано один із методів математичної статистики, відповідно до якого сейсмічне навантаження представлено стохастичним гауссівським процесом у вигляді суперпозиції гармонічних хвиль із дискретно заданими частотами і випадковими фазами. Спектральну густину енергії землетрусу визначено за допомогою емпіричної моделі Канаї-Таїмі. Раціональне розташування демпферів сухого тертя визначено за допомогою метаевристичного методу чисельної оптимізації – методу рою частинок.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі знайдено нові розв'язки, що описують динамічну поведінку багатоповерхових каркасних будівель із демпферами сухого тертя під дією періодичних та сейсмічних навантажень. На відміну від робіт інших авторів, одержані результати дозволяють визначити місця раціонального розташування демпферів для зниження переміщень, прискорень та перекосів поверхів будівель. Нові наукові положення, запропоновані в дисертації, зводяться до наступного:

1. Дістав подальший розвиток метод рою частинок стосовно до задач раціонального проектування каркасних будівель та споруд.

2. Дістали подальший розвиток чисельні та аналітичні динамічні моделі багатопверхових будинків із демпферами сухого тертя.

3. Уточнено динамічні характеристики багатопверхових каркасних будинків. Досліджено, як властивості матеріалу каркасу впливають на частоти та форми власних коливань.

4. Дістала подальший розвиток математична модель сейсмічного навантаження. Уточнено акселерограми для різних типів ґрунтів.

5. Дістав подальший розвиток метод Рунге-Кутти для розв'язання задач нестационарних коливань каркасних будівель із демпферами сухого тертя. Одержано нові чисельні розв'язки, що описують коливання багатопверхових будинків під дією періодичних та сейсмічних навантажень. Досліджено динамічну поведінку будівель із різними матеріалами каркасу.

6. Вперше за допомогою методу рою частинок одержано розв'язки задач раціонального розташування демпферів сухого тертя для мінімізації амплітуди коливань та перекосів поверхів багатопверхових каркасних будинків під дією періодичних та сейсмічних навантажень.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розвинуті в дисертації методи розрахунку відзначаються високою ефективністю та відносною простотою. Результати дисертаційної роботи дозволяють виконувати широке коло проектних розрахунків, пов'язаних з дослідженням динамічних властивостей багатопверхових будівель, зокрема дають можливість визначати переміщення, прискорення та перекоси поверхів, викликані динамічними навантаженнями різної природи, виконувати аналіз сейсмічної стійкості будівель та знаходити раціональні проектні рішення із розміщення демпферів сухого тертя для мінімізації негативних наслідків динамічних впливів.

Одержані результати впроваджено компанією ТОВ «Кіровський» при розробці та реалізації проектів житлових будівель із підвищеною стійкістю до дії динамічних навантажень. Наукові положення дисертації використовуються у навчальному процесі при читанні лекцій студентам магістратури та виконанні магістерських дипломних робіт на будівельному факультеті у ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертації одержані здобувачем самостійно. У наукових працях, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: постановка задачі [1, 2, 7, 8]; вибір та розробка методів аналізу [2–5, 6–8, 11, 12]; розробка чисельних методів, написання програмного коду [1, 2, 7–10]; проведення розрахунків та одержання чисельних даних [1–5, 7–10]; аналіз результатів [1, 2, 6–9, 11, 12].

**Апробація матеріалів дисертації.** Матеріали дисертації доповідались на 6 наукових конференціях: XVIII International Conference “Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture” (Dnipro, 2020); VI Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 2020); VII Міжнародна конференція “Актуальні проблеми інженерної механіки” (Одеса, 2020); Друга міжнародна науково-технічна конференції пам'яті академіка НАН України В. І. Моссаковського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» (Дніпро, 2019);

XVII Міжнародна науково-практична конференція “Інноваційні технології життєвого циклу об’єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення” (Одеса, 2019); Науково-практична конференція зі сталого розвитку та зеленого будівництва (Світловодськ, 2019).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на засіданні міжкафедрального наукового семінару при Державному вищому навчальному закладі “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, керівник проф. І. А. Соколов (Дніпро, 2020).

**Публікації.** Основні результати дисертації викладено у 6 статтях у наукових фахових виданнях, з них 2 статті в іноземному виданні. Ще 2 статті у наукових фахових виданнях додатково відображають результати дисертаційної роботи. Апробацію матеріалів дисертації засвідчено публікацією 4 тез доповідей на конференціях. Всього опубліковано 12 наукових праць.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 84 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 156 сторінок, у тому числі 54 рисунка і 3 таблиці. Обсяг основного тексту дисертації складає 110 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертації. Обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і завдання досліджень. Зазначено методи, які використовуються для розв’язання поставлених задач, подано відомості щодо наукової новизни одержаних результатів та їх практичного значення. Наведено дані про публікації та апробацію результатів дисертації, а також зазначено особистий внесок здобувача до робіт, написаних із співавторами.

У **розділі 1** наведено огляд та аналіз наукової літератури за темою дисертації. Важливою проблемою будівництва є забезпечення сейсмостійкості будівель та споруд. Традиційно, втрати від землетрусів намагалися зменшити шляхом підвищення міцності будівель, що призводило до збільшення поперечних розмірів та маси конструктивних елементів (стін, колон, перекриттів). Сучасне будівництво ґрунтується на принципово інших підходах. Актуальною задачею є використання легковагових, гнучких та економічних конструкцій, стійкість яких до сейсмічних впливів забезпечується за допомогою спеціальних пристроїв гасіння коливань. Розробці систем сейсмічного захисту будівель присвячено наукові праці Айзенберга Я. М., Волкової В. Є., Гордєєва Б. А., Мартемьянова А. І., Ноговицина А. Е., Онтіверос-Переса С., Полякова В. С., Полякова С. В., Санга Т., Уздіна А. М.

Один із поширених методів сейсмічного захисту полягає у встановленні демпферів різних типів. Такі пристрої мають підвищені дисипативні властивості за рахунок роботи сил пластичного деформування, сухого або в’язкого тертя. Широке розповсюдження одержали демпфери сухого тертя, перевагами яких є простота конструкції, низька вартість, зручність експлуатації та обслуговування.

При проектуванні важливою задачею є визначення місць раціонального розташування демпферів всередині будівлі. З математичної точки зору, це нелінійна задача оптимізації, для розв’язання якої можуть застосовуватись різні підходи:

стохастичний пошук (методи Монте-Карло); методи перебору, в яких крок послідовно зменшується відповідно до деякого заданого співвідношення (ділення навпіл, золотий перетин, зворотні числа Фібоначчі); метод градієнтного спуску; еволюційні алгоритми; метод штрафних функцій тощо. Значний внесок у розвиток сучасних методів оптимізації внесли Беллман Р., Зеленцов Д. Г., Мордекай А., Почтман Ю. М., Рущинський А., Чичинадзе В. К.

Останніми роками інтенсивно розвивається новий клас методів чисельної оптимізації, які у різних роботах називаються соціально-поведінковими, популяційними або ройовими. Огляд основних результатів у даній галузі можна знайти в роботах Карпенко А. П., Полі Р., Саймона Д., Янга К. Такі методи імітують поведінку колективних біологічних систем, що складаються з окремих осіб. Особи обмінюються інформацією та взаємодіють одна з одною за певними законами. Незважаючи на відсутність будь-якого центру управління, це призводить до виникнення інтелектуальної групової поведінки. Відзначимо, що дані методи є наближеними. Їх збіжність не доведена строго математично, але експериментально встановлено, що у більшості практичних випадків вони дають досить хороший результат.

Методи ройового інтелекту мають наступні переваги:

- відсутність обмежень на типи функцій і параметрів, що входять у математичну модель задачі;
- можливість рівномірно досліджувати весь простір розв'язків та захищеність від «зависання» в локальних екстремумах;
- не потрібно обчислювати похідні цільової функції;
- простота реалізації;
- можливість розпаралелити обчислювальний процес.

До недоліків слід віднести залежність швидкості збіжності від значень вільних параметрів і вагових коефіцієнтів.

Методи ройового інтелекту можуть ґрунтуватися на різних алгоритмах. Метод рою частинок описує поведінку децентралізованої зграї птахів або колонії комах, які шукають місце з найбільшою концентрацією корму. У методі світлячків менш яскраві частинки рухаються у просторі розв'язків назустріч більш яскравим, при цьому «яскравість» визначається значенням цільової функції у даній точці. Мурашиний алгоритм наслідує поведінку колонії мурах і може застосовуватися для розв'язання логістичних задач. Імунні мережі моделюють роботу клітин імунної системи і, так само як штучні нейронні мережі, можуть застосовуватися для розв'язання задач прогнозування, класифікації (розпізнавання) та управління. Зазначимо, що генетичні алгоритми також можуть бути віднесені до класу ройових методів, оскільки в їх основу покладено еволюційне моделювання популяцій, які складаються з окремих осіб.

На підставі аналізу літературних джерел підтверджено актуальність обраної теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень.

**Розділ 2** присвячено теоретичним основам методу рою частинок. Метод був запропонований Дж. Кеннеді, Р. Еберхарт і Ю. Ші спочатку для моделювання соціальної поведінки людей, а в подальшому розвинутий для розв'язання задач оптимізації.

Кожна частинка характеризує собою один із можливих розв'язків задачі. Положення частинки у просторі розв'язків визначається вектором координат  $\mathbf{x}_n^{(i)} = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \dots, x_D^{(i)}\}$ , компоненти якого – це аргументи цільової функції. Тут  $n$  – номер частинки,  $n = 1, 2, 3, \dots, n_{\max}$ ;  $D$  – розмірність задачі;  $i$  – номер ітерації,  $i = 0, 1, 2, \dots, i_{\max}$ . Початкові координати  $\mathbf{x}_n^{(0)}$  та швидкості  $\mathbf{v}_n^{(0)}$  задаються випадковим чином. Частинки переміщуються в просторі розв'язків у пошуку найкращого положення, яке відповідає екстремуму цільової функції. Область пошуку задається умовами обмежень

$$x_d^{\min} \leq x_d^{(i)} \leq x_d^{\max}, \quad d = 1, 2, 3, \dots, D. \quad (1)$$

На кожній наступній ітерації координати  $\mathbf{x}_n^{(i+1)}$  та зміщення (так звані швидкості)  $\mathbf{v}_n^{(i+1)}$  частинок визначаються за формулами:

$$\mathbf{x}_n^{(i+1)} = \mathbf{x}_n^{(i)} + \mathbf{v}_n^{(i)}, \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_n^{(i+1)} = w_0 \mathbf{v}_n^{(i)} + w_1 r_1 (\mathbf{p}_n^{(i)} - \mathbf{x}_n^{(i)}) + w_2 r_2 (\mathbf{g}^{(i)} - \mathbf{x}_n^{(i)}), \quad (3)$$

де  $\mathbf{p}_n^{(i)}$  – координати найкращого положення, знайденого частинкою;  $\mathbf{g}^{(i)}$  – координати найкращого положення всього рою;  $w_0, w_1, w_2$  – вагові коефіцієнти;  $r_1, r_2$  – незалежні випадкові величини в інтервалі  $0 \leq r_1, r_2 \leq 1$ .

У формулі (3) перший доданок визначає «інерцію» руху частинки. Наявність інерції запобігає стрибкоподібним змінам траєкторії. Рекомендовані значення коефіцієнта  $w_0$  знаходяться у інтервалі  $0.4 \leq w_0 \leq 0.9$ . Другий доданок формули (3) скеровує частинку у сторону її особистого найкращого положення  $\mathbf{p}_n^{(i)}$ , а третій – у сторону найкращого положення  $\mathbf{g}^{(i)}$ , яке знайдено роєм. Значення коефіцієнтів  $w_1, w_2$  визначають питому вагу «когнітивної» і «соціальної» складових поведінки частинки. При малих значеннях  $w_1, w_2$  частинки рухаються за гладкими траєкторіями, а зі збільшенням цих параметрів рух стає більш стохастичним. Як правило, рекомендується  $w_1 = w_2, 0.5 \leq w_1, w_2 \leq 2$ . Змінні  $r_1, r_2$  вносять випадкові відхилення від заданої траєкторії руху, що дозволяє досліджувати більшу область простору розв'язків.

Ефективність роботи методу залежить від вагових коефіцієнтів, оптимальні значення яких у загальному випадку визначаються рельєфом цільової функції та індивідуальні для кожної задачі. При правильно обраному балансі між  $w_0, w_1, w_2$  швидкість руху частинок поступово знижується і наближається до нуля в околі точки екстремуму, що розшукується.

Суттєвий вплив також мають умови, які задаються на зовнішніх границях простору розв'язків та визначають поведінку частинки, якщо координати, обчислені за формулою (2), лежать за межами області пошуку. Можуть застосовуватись моделі границь, що поглинають, відбивають, демпфірують або є прозорими. У більшості



випадків границі, які поглинають та відбивають, стимулюють дослідження, відповідно, зовнішньої та внутрішньої областей простору розв'язків. Прозорі границі та такі, що демпфірують, забезпечують більш рівномірне дослідження всієї заданої області. У даній роботі використовується модель прозорої границі. Якщо частинка потрапляє за межі простору розв'язків, значення цільової функції для неї не обчислюється. Тоді на наступних ітераціях частинка швидко повертається в область пошуку, притягаючись до точок  $\mathbf{p}_n^{(i)}$  і  $\mathbf{g}^{(i)}$ .

Кількість частинок  $n_{\max}$ , що використовуються, залежить від розмірності задачі  $D$ . Збільшення популяції дозволяє більш повно досліджувати простір розв'язків, але потребує більшої кількості викликів цільової функції. Невелика кількість частинок, навпаки, скорочує обчислення, але при цьому метод може «зависати» у локальних екстремумах.

Критерії завершення процесу пошуку можуть бути наступні: виконання заданої кількості ітерацій; досягнення заданого значення екстремуму цільової функції; стагнація пошуку, коли знайдене значення екстремуму не покращується протягом декількох останніх ітерацій; зупинка руху частинок у точці екстремуму.

У даній роботі виконана програмна реалізація методу рою частинок у системі комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima.

Для практичної верифікації методу рою частинок розглянемо знаходження екстремумів деяких тестових функцій, які можуть використовуватися для оцінки продуктивності алгоритмів оптимізації. Нехай розмірність задачі дорівнює двом,  $D = 2$ .

Функція Розенброка – неопукла функція «долинного» типу, яка визначається формулою

$$z = (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2 \quad (4)$$

і має глобальний мінімум  $z_{\min} = 0$  у точці  $x_1 = x_2 = 1$ . Графік функції (4) зображений на рис. 1. Для даного прикладу застосування методу градієнтного спуску виявляється малоефективним. Через наявність вигнутої пологої долини, процес пошуку рухається повільно в напрямку мінімуму зигзагом кроками малого розміру. Відзначимо, що ця проблема значно посилюється при збільшенні розмірності задачі.

Задамо область пошуку співвідношеннями (1), де

$$x_1^{\min} = x_2^{\min} = -2, \quad x_1^{\max} = x_2^{\max} = 2. \quad (5)$$

Було виконано серії розрахунків з різною кількістю частинок  $n_{\max}$  та різними значеннями вагових коефіцієнтів  $w_1$ ,  $w_2$  (при цьому прийнято  $w_0 = 0.5$ ). На рис. 2 наведено усереднені залежності, які ілюструють вплив вагових коефіцієнтів на швидкість збіжності методу. Обчислювальні експерименти показали, що найкраща швидкість досягається при  $n_{\max} = 16$  та  $w_1 = w_2 = 1$ . Після виконання 16 ітерацій рух

частинок практично зупинився. При цьому знайдено наближене значення екстремуму  $z_{\min} \approx 0.0615$ .

Одним із прикладів мультимодальних функцій є функція Растрігіна

$$z = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10[\cos(2\pi x_1) + \cos(2\pi x_2)], \quad (6)$$

графік якої наведено на рис. 3. Глобальний мінімум  $z_{\min} = 0$  знаходиться у точці  $x_1 = x_2 = 0$ .

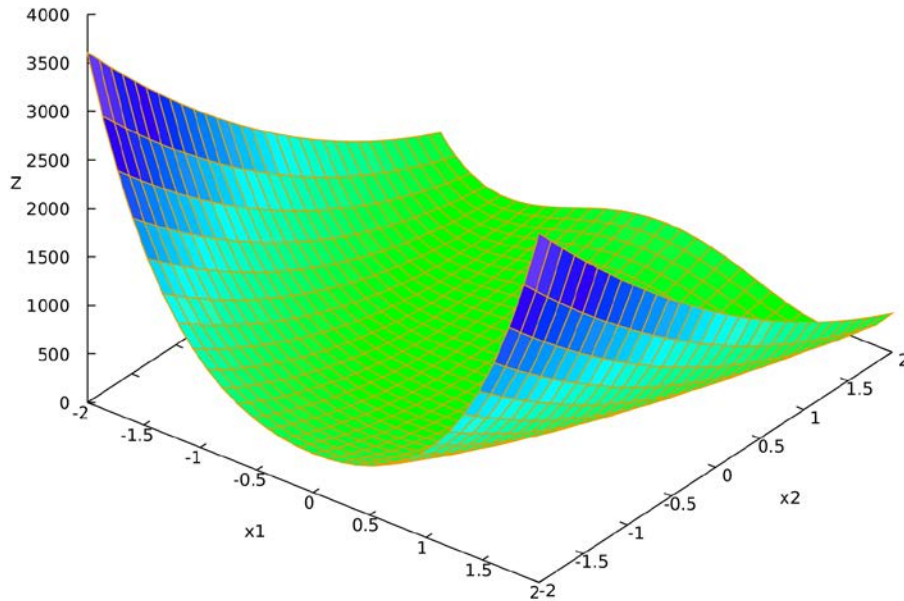


Рисунок 1 – Графік функції Розенброка

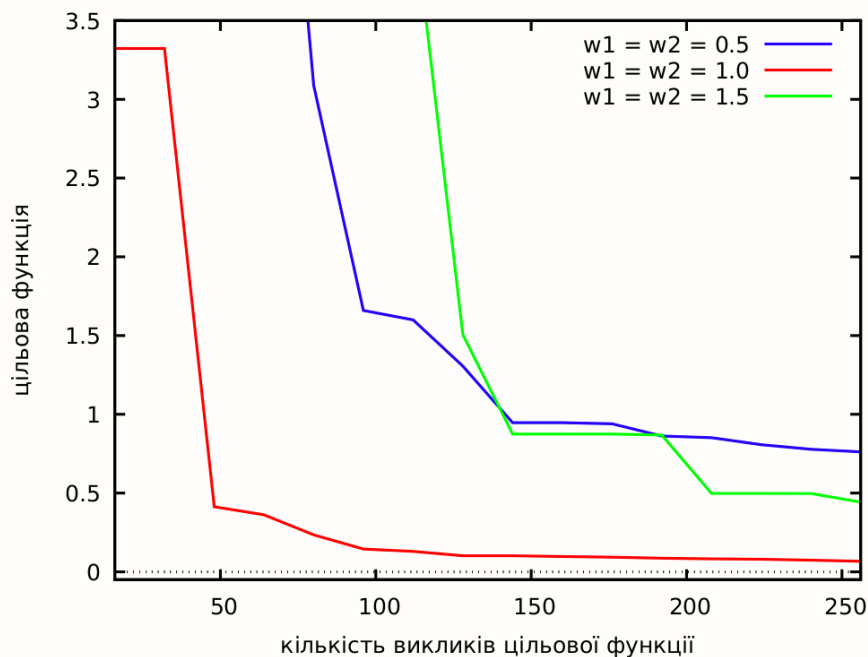


Рисунок 2 – Вплив значень вагових коефіцієнтів на швидкість збіжності для функції Розенброка;  $n_{\max} = 16$ ,  $w_0 = 0.5$

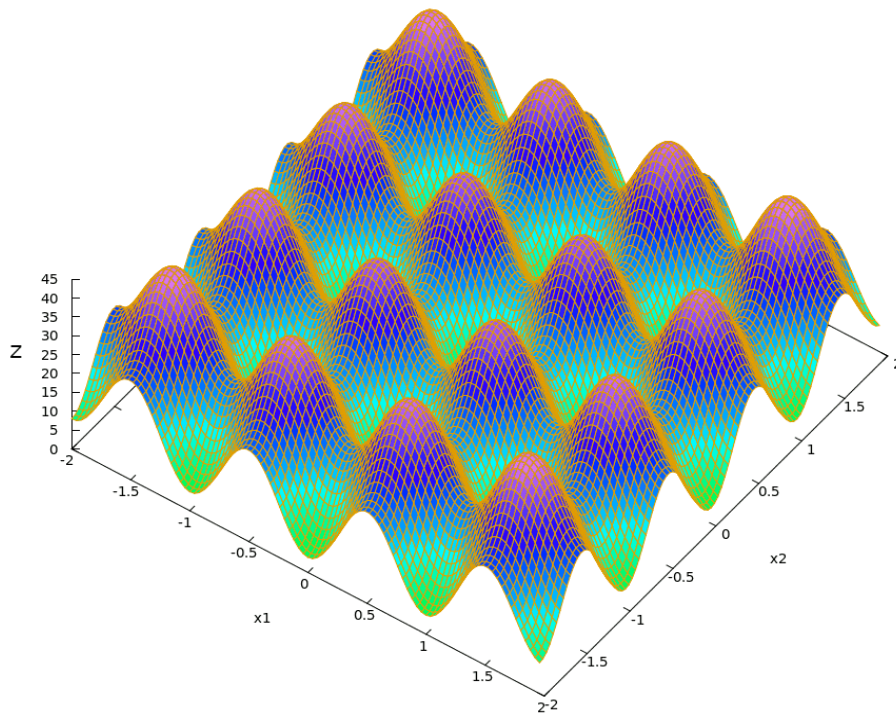
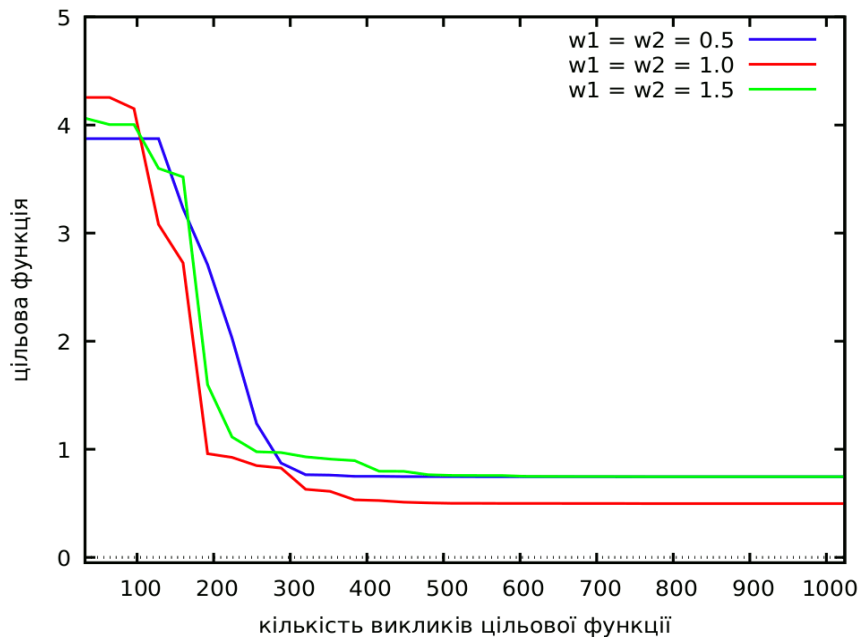


Рисунок 3 – Графік функції Растрігіна

Рисунок 4 – Вплив значень вагових коефіцієнтів на швидкість збіжності для функції Растрігіна;  $n_{\max} = 32$ ,  $w_0 = 0.5$ 

Визначення мінімуму цієї функції є складною задачею через велику кількість локальних екстремумів. Застосування методу рою частинок дозволяє ефективно дослідити весь простір розв'язків та знайти глобальний мінімум при відносно невеликій кількості обчислень. Область пошуку задана співвідношеннями (1), (5). На рис. 4 наведено залежність швидкості збіжності методу від значень вагових коефіцієнтів  $w_1$ ,  $w_2$ . У даному прикладі найкращий результат одержано при  $n_{\max} = 32$ ,  $w_0 = 0.5$ ,  $w_1 = w_2 = 1$ . Після 16 ітерацій переважна більшість частинок

майже зупинилася в околиці глобального мінімуму та знайдено наближене значення екстремуму  $z_{\min} \approx 0.4975$ .

Сформульовано чисельну схему генетичного алгоритму. Кодування хромосом клітин виконується дійсними числами. Початкова популяція генерується випадковим чином. Батьківські клітини обираються методом панміксії. Для схрещення застосовується арифметичний оператор кросоверу. Мутація потомків відбувається шляхом випадкового арифметичного зсуву значень хромосом. Створення наступного покоління здійснюється шляхом відбору найбільш «пристосованих» клітин, для яких значення цільової функції найближчі до екстремуму. Розроблено програмний код для реалізації генетичного алгоритму у системі Maxima.

Виконано порівняльний аналіз генетичного алгоритму та методу рою частинок при знаходженні екстремумів тестових функцій Розенброка та Растрігіна. Обидва методи дозволяють одержати наближені розв'язки розглянутих задач нелінійної оптимізації при приблизно однаковій витраті обчислювальних ресурсів. При цьому метод рою частинок забезпечує поступове уповільнення руху всіх частинок та їх зупинку в околиці екстремуму. Натомість у розглянутому варіанті генетичного алгоритму частинки не зупиняються, а продовжують стохастично рухатись поблизу екстремуму, що може ускладнити прийняття рішення про зупинку процесу пошуку. За результатами аналізу, у наступних розділах дисертаційної роботи для визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя використовується метод рою частинок.

У **розділі 3** запропоновано методику визначення раціонального розташування демпферів сухого тертя у багатоповерхових каркасних будівлях з використанням програмного комплексу (ПК) ЛПРА-САПР.

Розглянемо 2D модель десятиповерхового будинку із залізобетонним каркасом, який складається з колон перерізом 400x400 мм та ригелів перерізом 300x700 мм (рис. 5). Модуль Юнга матеріалу каркасу  $E = 32.5$  ГПа і густина  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Вага будівлі становить 1328 кН. За допомогою модального аналізу знайдено частоти та періоди власних коливань. Періоди перших трьох форм власних коливань належать до діапазону переважаючих періодів сейсмічних акселерограм 0.1...2 с і, таким чином, є небезпека резонансу у випадку землетрусу.

Виконано розрахунок на сейсмічне навантаження. Значення розрахункових коефіцієнтів прийнято відповідно до ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво у сейсмічних районах України» для району сейсмічністю 9 балів. За результатами розрахунку максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу склали 176 мм.

Прийmemo, що у центральному прольоті будинку може бути встановлено три демпфера у вигляді розкосів. Можливі місця розташування демпферів позначено на рис. 5 штриховими лініями. Зусилля тертя кожного демпферу становить  $N = 220$  кН, а сума їх зусиль дорівнює половині ваги конструкції, що відповідає рекомендаціям, наведеним у літературі.

Розглянемо динамічну реакцію будинку на дію періодичного навантаження з частотою першої форми власних коливань  $f = 1.75$  Гц. У даному стані резонансу переміщення конструкції будуть найбільшими. Навантаження прикладене

горизонтально до опорних вузлів каркасу у вигляді зосереджених сил. Амплітуду навантаження визначено таким чином, щоби переміщення верхнього поясу каркасу дорівнювали значенням, одержаним вище при розрахунку на сейсмічний вплив. Зовнішнє навантаження діє впродовж десяти періодів (5.71с), після чого відбуваються вільні коливання будівлі.

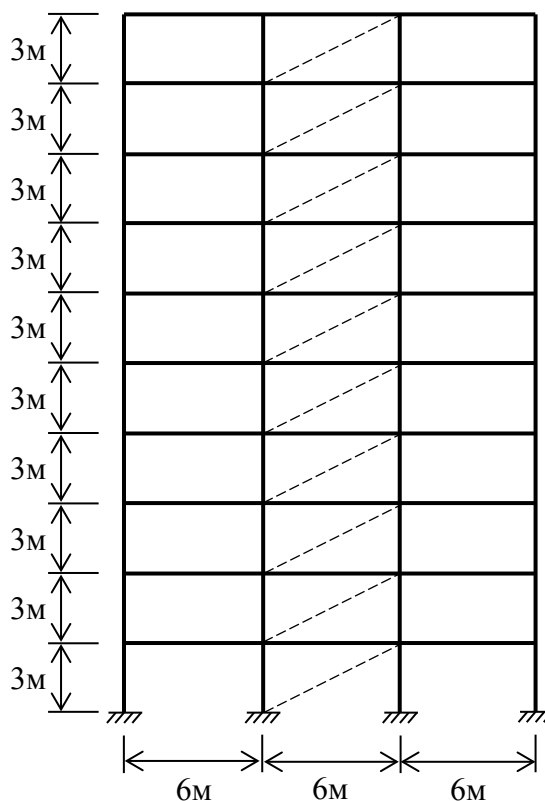


Рисунок 5 – Модель десятиповерхового каркасного будинку

Раціональне розташування демпферів повинно забезпечити якнайшвидше згасання коливань будівлі. В якості цільової функції приймемо амплітуду переміщень верхнього поясу каркасу по закінченню десяти періодів вільних коливань та будемо відшукувати її мінімум. Робота демпферів описана у ПК ЛІРА-САПР за допомогою фізично-нелінійного скінченного елемента типу 255, який реалізує модель ідеально-пластичного тіла. Така модель часто використовується в літературі як наближена апроксимація демпфуючих елементів. Нестационарний динамічний розрахунок виконано за допомогою підсистеми «Динаміка-плюс».

Для розв'язання задачі оптимізації методом рою частинок використано популяцію з 8 частинок. Після виконання 8 ітерацій всі частинки зупинилися в однаковому положенні, при якому цільова функція досягає мінімуму. Таким чином, визначено раціональне розташування демпферів на 2, 5 і 6 поверхах. Переміщення верхнього поясу каркасу наведено на рис. 6.

Розглянуто фізико-механічні властивості полімербетонних конструкцій. Модуль пружності та густина цементних та полімерних бетонів приблизно однакові. Але при цьому міцність полімербетонів у 4–6 разів вища, що дозволяє зменшити поперечні перерізи конструктивних елементів, зменшити вагу та матеріаломісткість споруди. На основі аналізу умов міцності, запропоновано аналітичні формули, що

дозволяють наближено оцінити поперечні розміри колон та ригелів каркасного будинку, виготовленого з полімербетону. Визначено, що підвищення міцності матеріалу у 5 разів дозволяє знизити вагу будівлі у 3.4 рази.

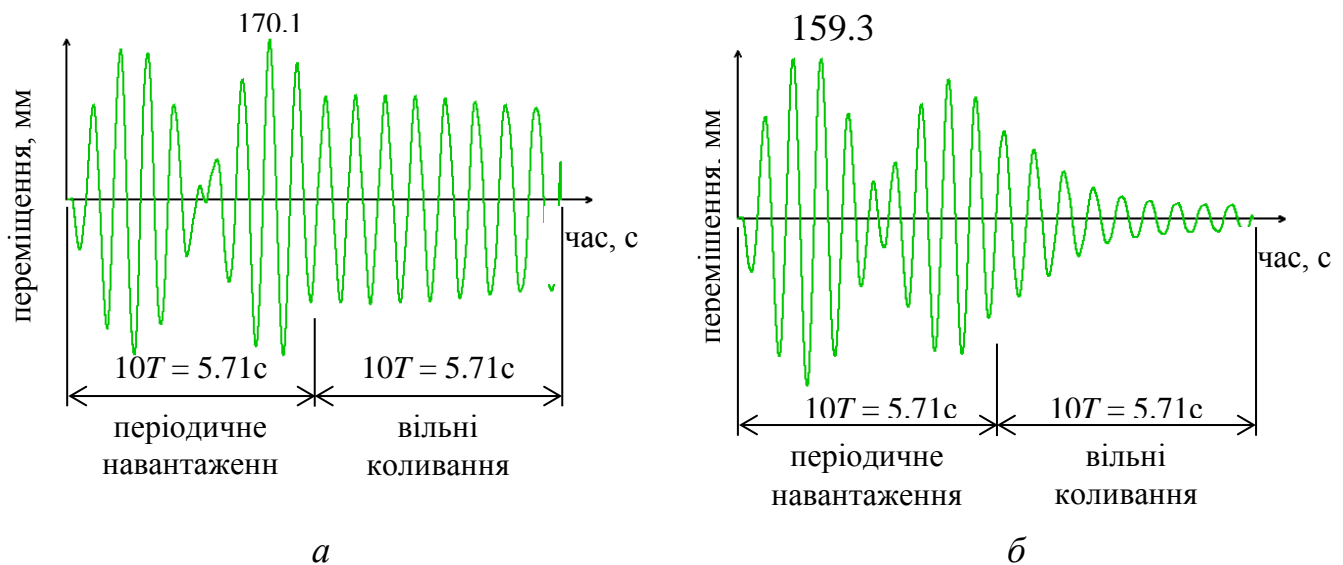


Рисунок 6 – Горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу:  
 а – без демпферів; б – раціональне розташування демпферів

Виконано аналіз динамічних характеристик полімербетонного будинку. При підвищенні міцності матеріалу у 5 разів частоти власних коливань зменшуються приблизно у 2 рази. Зі зменшенням поперечних розмірів конструктивних елементів також зменшується жорсткість споруди. Виконано розрахунки каркасу полімербетонної будівлі на сейсмічний вплив. Одержані чисельні результати свідчать, що максимальні амплітуди переміщень полегшеної полімербетонної конструкції зростають приблизно лінійно-пропорційно збільшенню міцності матеріалу каркасу.

**Розділ 4** присвячено динамічному моделюванню каркасних будівель із демпферами сухого тертя. Розглянемо 2D модель шестиповерхового будинку із залізобетонним каркасом (рис. 7). Перерізи елементів становлять: 400x400 мм (колони) та 250x600 мм (ригелі). Передбачається, що демпфери сухого тертя можуть бути встановлені у вигляді розкосів у центральному прольоті; місця їх можливого розташування позначено на рис. 7 штриховими лініями.

Рівняння руху запишуться наступним чином: для верхнього поверху ( $k = 6$ )

$$M_6 \ddot{u}_6 + (u_6 - u_5) K_6 + (\dot{u}_6 - \dot{u}_5) C_6 + F_6 = 0 \quad (7)$$

та для першого і проміжних поверхів ( $k = 1 \dots 5$ )

$$M_k \ddot{u}_k + (u_k - u_{k-1}) K_k + (\dot{u}_k - \dot{u}_{k-1}) C_k + F_k - (u_{k+1} - u_k) K_{k+1} - (\dot{u}_{k+1} - \dot{u}_k) C_{k+1} - F_{k+1} = 0, \quad (8)$$

де  $M_k$  – маси поверхів;  $K_k$ ,  $C_k$  – коефіцієнти жорсткості та в'язкості відповідно;  $F_k$  – сили реакції демпферів;  $u_k$  – горизонтальні переміщення поверхів;  $k$  – номер поверху,  $k=1\dots6$ ;  $u_0$  – горизонтальне переміщення основи. Точка зверху позначає диференціювання за часом. Для споруди, що розглядається, визначено  $M_k=12010$  кг і  $K_k=7.13\cdot 10^4$  кН/м для кожного поверху. Логарифмічний декремент коливань залізобетонної конструкції прийнято рівним  $\delta=0.3$ . Тоді  $C_k=(\delta/\pi)\sqrt{M_k K_k}=88.4$  кН·с/м.

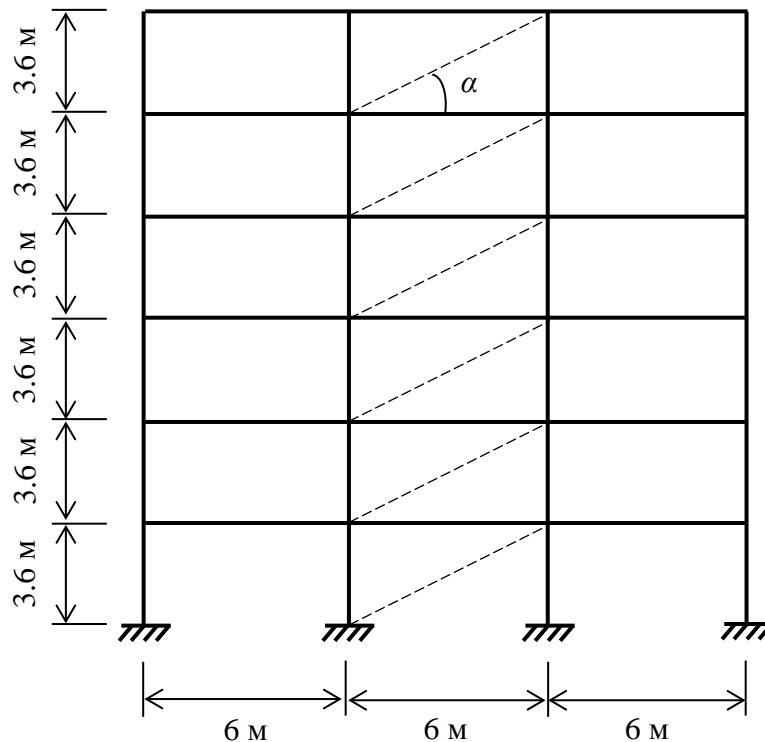


Рисунок 7 – Модель шестиповерхового каркасного будинку

Сила реакції демпфера  $F_k$  постійна за модулем і скерована у напрямку, протилежному відносній швидкості його кінців. Її можна визначити за формулою

$$F_k = N_{kx} \operatorname{sgn}(\dot{u}_k - \dot{u}_{k-1}), \quad (9)$$

де  $N_{kx}$  – проекція зусилля тертя демпфера  $N_k$  на горизонтальну вісь,  $N_{kx} = N_k \cos \alpha$ ;  $\alpha$  – кут нахилу демпфера. Рівняння (9) описує прямокутну петлю гістерезису непружної деформації. Запропонована теоретична модель добре узгоджується з експериментальними даними, наведеними у літературі.

Для підтвердження достовірності запропонованої розрахункової моделі, розглянемо вільні коливання конструкції без демпферів та внутрішнього тертя. На рис. 8 одержані наближені аналітичні результати порівняно із даними чисельного розрахунку методом скінченних елементів, який виконано у ПК ЛІРА-САПР для вихідної 2D моделі. Зазначимо, що одержані розв'язки добре узгоджуються між собою. Періоди перших двох форм власних коливань належать до діапазону

переважаючих періодів сейсмічних акселерограм 0.1...2 с, що спричиняє небезпеку виникнення резонансу під час землетрусу. Аналіз перших шести форм власних коливань, визначених у ПК ЛІРА-САПР, свідчить, що переважаючими є горизонтальні переміщення поверхів за рахунок згинальних деформацій колон, тоді як поздовжніми деформаціями елементів каркасу можна знехтувати. Це підтверджує справедливість фізичних припущень, покладених в основу моделі із зосередженими масами.

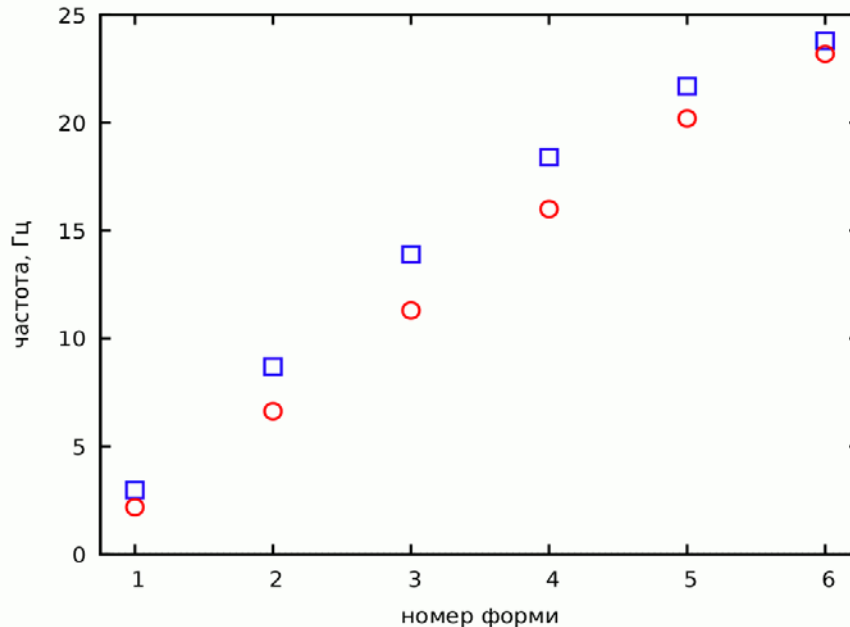


Рисунок 8 – Власні частоти вільних коливань:  $\square$  - модель із зосередженими масами;  $\circ$  - вихідна модель, розрахунок у ПК ЛІРА-САПР

Для чисельного інтегрування вихідної системи нелінійних диференційних рівнянь (7), (8) запропоновано використання методу Рунге-Кутти. Наведено розрахункові формули, що дозволяють обчислити значення питомих функцій у вузлах сітки. Запропоновану чисельну процедуру реалізовано у системі Matha. На прикладі модельної задачі про згасаючі власні коливання динамічної системи з одним ступенем вільності досліджено вплив величини кроку інтегрування на точність одержаного розв'язку. Визначено залежність відносної похибки методу Рунге-Кутти від величини кроку інтегрування.

У **розділі 5** визначено раціональне розташування демпферів у каркасному залізобетонному будинку при періодичних та сейсмічних навантаженнях на основі моделі із зосередженими масами. Розглянемо випадок, коли у центральному прольоті шестиповерхового будинку (рис. 7) може бути встановлено три демпфера. Сума зусиль тертя демпферів дорівнює половині ваги конструкції, тоді зусилля одного демпфера складає  $N = 120$  кН.

Розглянемо дві цільові функції, які необхідно мінімізувати: переміщення поверхів  $u_k(k_1, k_2, k_3) \rightarrow \min$  та відносні перекося поверхів  $d_k(k_1, k_2, k_3) = |u_k - u_{k-1}| / h_k \rightarrow \min$ . Тут  $h_k$  – висота поверху;  $k_1, k_2, k_3$  – номери поверхів, на яких можуть бути встановлено демпфери. Умови обмежень мають вигляд:  $1 \leq k_1, k_2, k_3 \leq 6$ .



Розглянемо періодичне навантаження, прикладене до основи конструкції. Амплітуда горизонтального прискорення основи  $a_0 = 0.4g$ , де  $g$  – прискорення вільного падіння. Частота навантаження дорівнює частоті першої форми власних коливань  $f = 2.96$  Гц. Систему диференціальних рівнянь руху (7), (8), доповнену відповідними початковими умовами, інтегровано чисельно за допомогою методу Рунге-Кутти. Крок інтегрування дорівнює  $\Delta t = 0.001$  с, що дозволило визначити переміщення  $u_k$  із точністю у три значущих цифри. Інтервал інтегрування складає  $t_{\max} = 80T = 27.0$  с, де  $T$  – період першої форми власних коливань,  $T = 0.338$  с. За цей час коливання будинку виходять на стаціонарний режим, а амплітуди переміщень поверхів досягають максимуму.

Для визначення місць раціонального розташування демпферів використано популяцію із 16 частинок. Як мінімальні переміщення  $u_k$ , та мінімальні перекося  $d_k$  поверхів досягаються при встановленні трьох демпферів на першому поверсі:  $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ . Для повної зупинки всіх частинок у точці оптимального розв'язку знадобилося 9 ітерацій, тоді як сам оптимальний розв'язок було знайдено вже на 5 ітерації.

На рис. 9, 10 наведено результати для максимальних переміщень та перекося поверхів. Позначено: 1 – конструкція без демпферів, 2 – рівномірний розподіл зусиль демпферів по всіх поверхах, 3 – раціональне розташування демпферів.

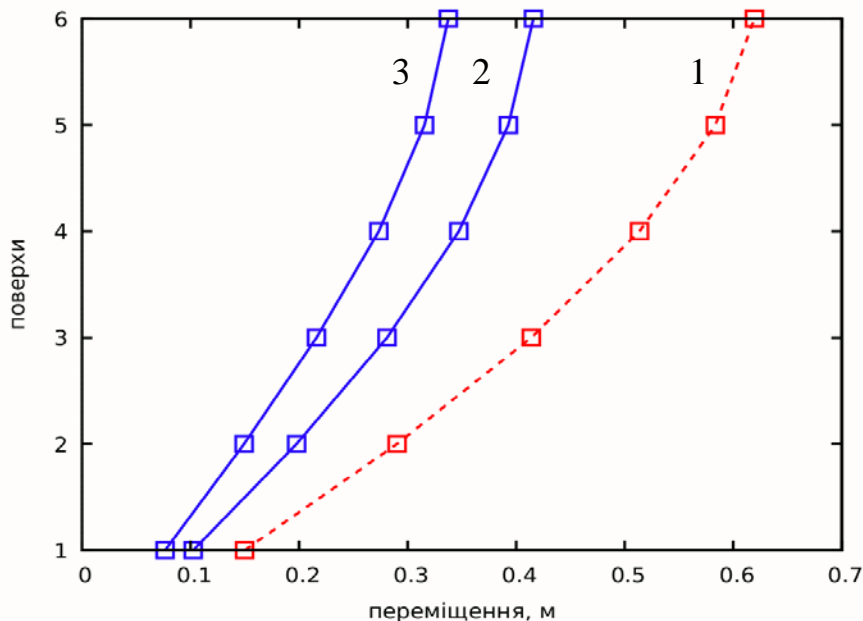


Рисунок 9 – Переміщення поверхів під дією періодичного навантаження

Для моделювання сейсмічного навантаження, поділимо переважаючий частотний діапазон землетрусів  $0.2 \leq f \leq 34$  Гц на інтервали шириною  $\Delta f_j$ ,  $j = 1 \dots j_{\max}$ . Ширину та кількість  $j_{\max}$  інтервалів прийнято відповідно до ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво у сейсмічних районах України». Прискорення ґрунту опишемо стохастичним гауссовським процесом у вигляді суперпозиції гармонічних хвиль із дискретно заданими частотами  $f_j$  і випадковими фазами  $\varphi_j$ :

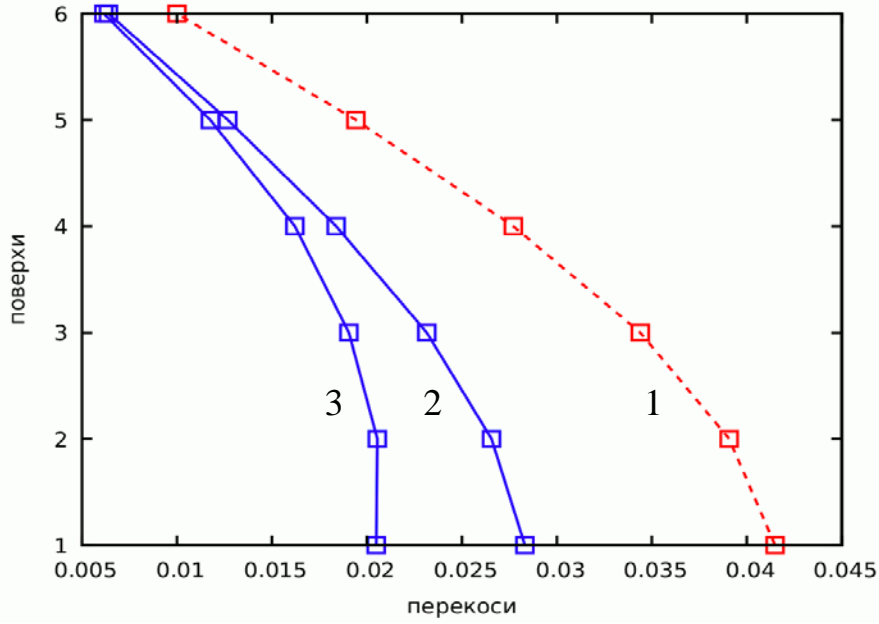


Рисунок 10 – Перекуси поверхів під дією періодичного навантаження

$$\ddot{u}_0 = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \sqrt{2S(f_j)\Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \varphi_j), \quad (10)$$

де  $f_{j+1} = f_j + \Delta f_j$ ;  $\varphi_j$  – випадкові величини із нормальним розподілом в інтервалі  $0 \leq \varphi_j \leq 2\pi$ ;  $S(f)$  – спектральна густина енергії землетрусу, яку визначено за допомогою емпіричної моделі Канаї-Таїмі:

$$S(f) = S_0 \frac{1 + 4\zeta_g^2 (f/f_g)^2}{\left[1 - (f/f_g)^2\right]^2 + 4\zeta_g^2 (f/f_g)^2}, \quad S_0 = \frac{a_p^2}{p_g^2 \pi^2 f_g \left[2\zeta_g + (2\zeta_g)^{-1}\right]}. \quad (11)$$

У формулах (10), (11)  $f_g$  – переважача частота коливань ґрунту;  $\zeta_g$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує демпфуючі властивості ґрунту;  $a_p$  – пікове прискорення ґрунту;  $p_g$  – коригуючий коефіцієнт,  $p_g = 3$ . При подальших розрахунках прийнято  $a_p = 0.4g$ .

Параметри  $f_g$  і  $\zeta_g$  залежать від властивостей ґрунту у районі будівництва (табл. 1). На основі моделі (10), (11) визначено розподіл енергії землетрусу в залежності від частоти та побудовано акселерограми для різних типів ґрунтів.

Чисельні розв'язки, що описують коливання будинку під дією сейсмічного навантаження, одержано шляхом інтегрування рівнянь руху (7), (8) методом Рунге-Кутти з урахуванням співвідношення (10) і відповідних початкових умов. Крок інтегрування  $\Delta t = 0.001$  с, точність одержаних розв'язків для переміщень  $u_k$  складає три значущих цифри. Інтервал інтегрування дорівнює розрахунковій тривалості землетрусу (табл. 1).

Таблиця 1 – Динамічні параметри ґрунтів (Seya et al. 1993)

Тип ґрунту	$f_g$ , Гц	$\zeta_g$	Тривалість землетрусу, с
М'який ґрунт	1.2	0.85	25
Жорсткий ґрунт	2.5	0.6	20
Скельний ґрунт	4	0.6	15

Для розв'язання задач оптимізації використано популяцію із 16 частинок. Виконано розрахунки для випадку жорсткого ґрунту. Оптимальні розв'язки визначено на 3 ітерації, а для повної зупинки руху частинок знадобилося 9 ітерацій. Мінімізація переміщень поверхів  $u_k$  передбачає встановлення демпферів на поверхах 1, 3, 4; а мінімізація перекосів  $d_k$  – на поверхах 1, 2, 3. В останньому випадку також досягнуто найменших прискорень поверхів, що робить такий варіант кращим. Одержані результати для перекосів наведено на рис. 11–12. Тут і нижче червоні лінії відповідають конструкції без демпферів, а сині – знайденому раціональному розташуванню демпферів на поверхах 1, 2, 3.

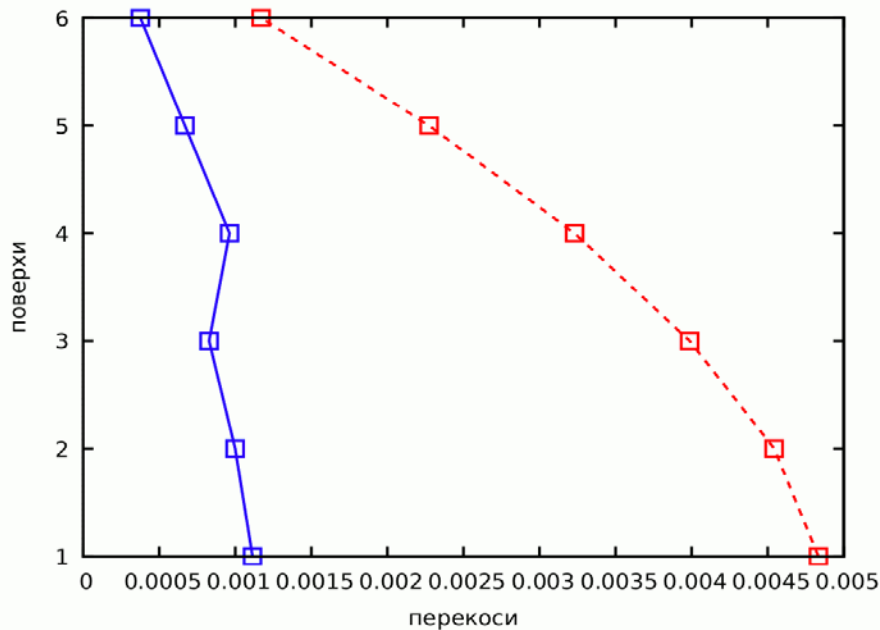


Рисунок 11 – Перекози поверхів залізобетонного будинку під дією сейсмічного навантаження

Визначено динамічні характеристики полімербетонного каркасу будинку. Збільшення міцності матеріалу каркасу у 5 разів дозволяє зменшити площини перерізів колон та ригелів і знизити вагу конструкції у 3.6 рази. При цьому частоти власних коливань будинку зменшуються у 2.6 рази. В результаті періоди усіх шести форм власних коливань потрапляють до діапазону переважаючих періодів сейсмічних акселерограм, що спричиняє небезпеку багатократних резонансів під час землетрусу.

Досліджено реакцію полімербетонного будинку на дію періодичного та сейсмічного навантажень. У випадку періодичного навантаження, підвищення міцності матеріалу каркасу у  $\eta=5$  разів разом із відповідним зменшенням

поперечних перерізів конструктивних елементів призводить до збільшення переміщень та перекосів поверхів майже у 7 разів. Встановлення демферів сухого тертя підвищує жорсткість конструкції та зменшує максимальні переміщення у 1.9 рази і максимальні перекоси у 1.6 рази.

У випадку сейсмічного навантаження, перекоси поверхів полімербетонного будинку у 3...4 рази перевищують аналогічні дані для будинку із залізобетону (див. рис. 11 і 13, 12 і 14). При цьому застосування демпферів зменшує перекоси у 3...5 разів, таким чином, жорсткість полімербетонного будинку із демпферами та жорсткість залізобетонного будинку без демпферів виявляються приблизно однаковими.

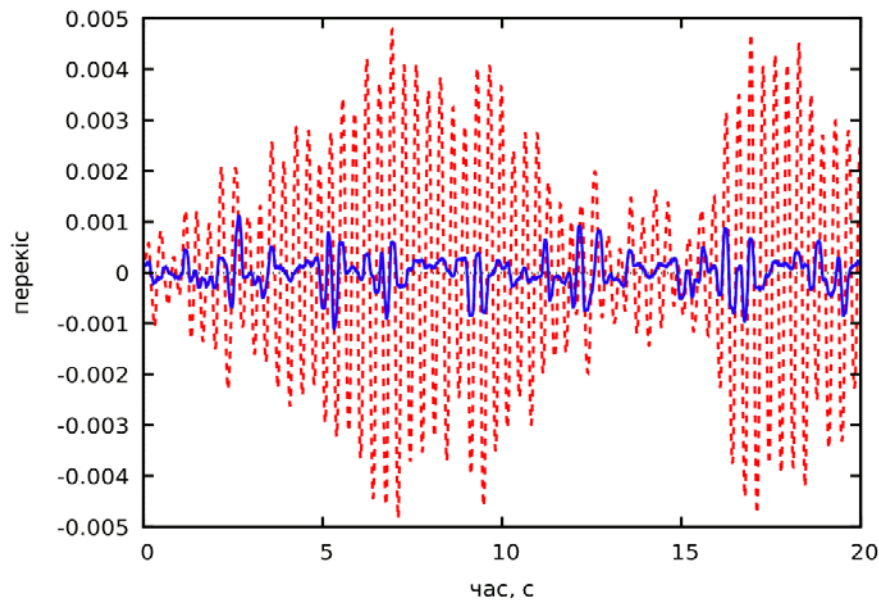


Рисунок 12 – Перекіс 1-го поверху залізобетонного будинку під дією сейсмічного навантаження

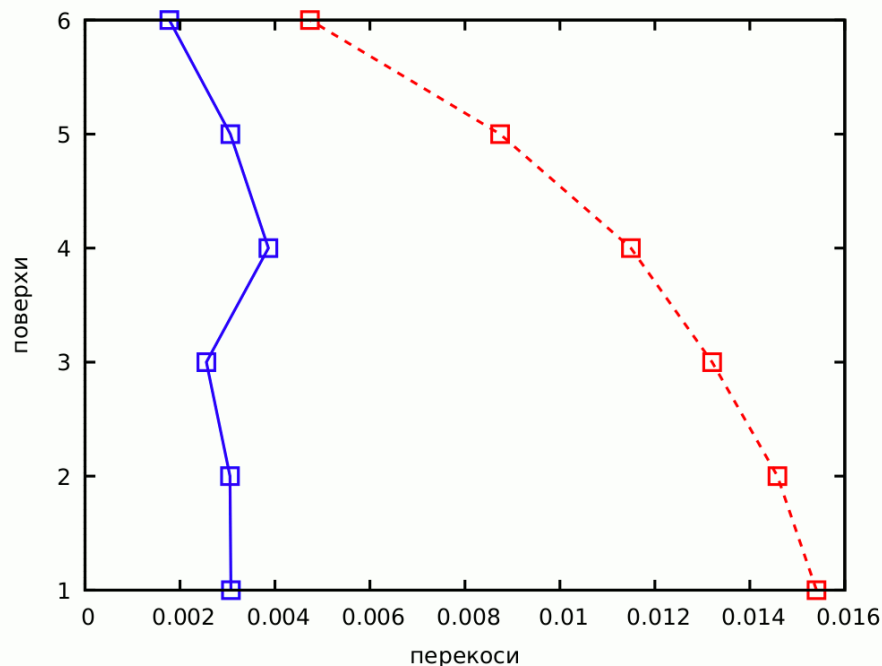


Рисунок 13 – Перекоси поверхів будинку з полімербетонним каркасом під дією сейсмічного навантаження; коефіцієнт підвищення міцності  $\eta = 5$

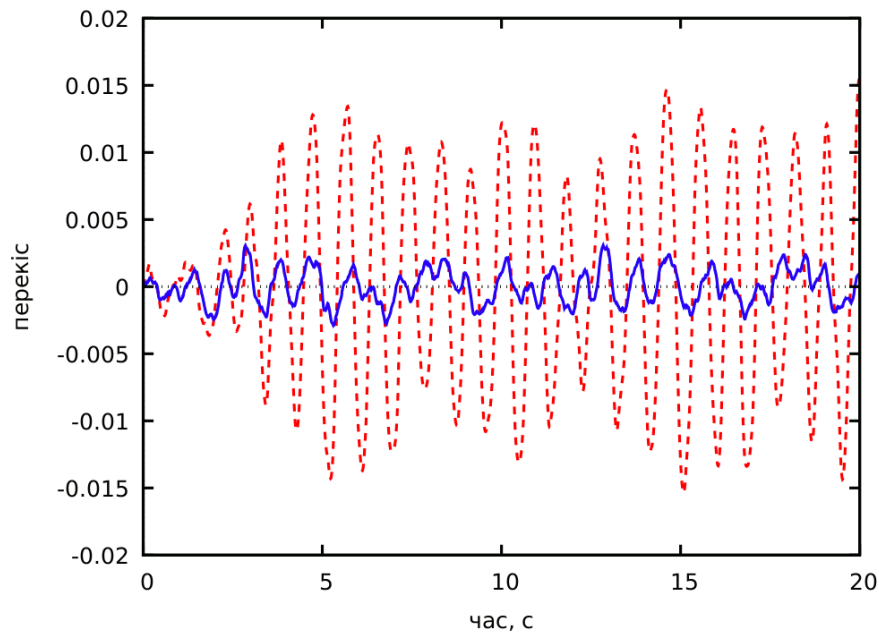


Рисунок 14 – Перекіс 1-го поверху будинку з полімербетонним каркасом під дією сейсмічного навантаження; коефіцієнт підвищення міцності  $\eta = 5$

Прискорення полімербетонного будинку виявилися нижчими за прискорення залізобетонного будинку у 1.3...1.7 рази, що можна пояснити уповільненням відклику полімербетонної конструкції на динамічні навантаження внаслідок меншої жорсткості. Встановлення демпферів сухого тертя знижує максимальні прискорення верхнього поясу каркасу полімербетонного будинку у 2.6 рази.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення наукової-практичної задачі визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя у багатоповерхових залізобетонних і полімербетонних каркасних будівлях за допомогою методів ройового інтелекту. Одержані результати дозволяють підвищити сейсмічну стійкість будівель, зменшити переміщення, перекося і прискорення поверхів, що виникають внаслідок динамічних навантажень. На підставі проведених досліджень зроблено наступні науково-практичні висновки:

1. Розвинуто метод рою частинок для визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя у каркасних будівлях для підвищення їх сейсмостійкості. Визначено розрахункові формули, за якими обчислюються положення частинок у просторі розв'язків на кожній ітерації процесу пошуку. Задано умови обмежень, які визначають область пошуку. Розглянуто різні типи граничних умов, що регулюють поведінку частинки, якщо її координати потрапляють за межі простору розв'язків. Сформульовано критерії завершення процесу пошуку. Розглянуто тестові функції: «долину» функцію Розенброка та мультимодальну функцію Растрігіна. Досліджено вплив параметрів методу рою частинок на його практичну збіжність та визначено значення вагових коефіцієнтів, при яких пошук глобальних екстремумів потребує менше обчислювальних витрат.

Виконано порівняльний аналіз методу рою частинок та генетичного алгоритму при знаходженні екстремумів тестових функцій. Обидва методи дозволяють одержати наближені розв'язки розглянутих задач нелінійної оптимізації при приблизно однаковій витраті обчислювальних ресурсів. При цьому застосування методу рою частинок забезпечує більш прозорі критерії зупинку процесу пошуку.

**2.** Виконано чисельне моделювання залізобетонного багатоповерхового каркасного будинку у ПК ЛІРА-САПР. Знайдено частоти та форми власних коливань; визначено амплітуду переміщень при сейсмічному навантаженні. Досліджено динамічну реакцію будівлі на дію періодичного навантаження з резонансною частотою першої форми власних коливань. Визначено раціональне розташування демпферів, яке забезпечує найшвидше згасання коливань будинку.

Запропоновано аналітичні формули, що дозволяють наблизено оцінити розміри елементів каркасу будівель, виготовлених із полімербетону. Виконано аналіз динамічних характеристик полімербетонного каркасу будинку, визначено частоти власних коливань, обчислено амплітуду переміщень при сейсмічному навантаженні.

**3.** Розроблено наближену аналітичну динамічну модель багатоповерхового залізобетонного каркасного будинку із демпферами сухого тертя. Розрахункову схему прийнято у вигляді вертикального консольного стрижня із зосередженими масами. Складено вихідну систему нелінійних диференціальних рівнянь руху. Для підтвердження достовірності моделі, виконано порівняння аналітичних результатів для власних частот із чисельним розрахунком у ПК ЛІРА-САПР. Одержані аналітичні та чисельні розв'язки добре погоджуються між собою. Аналіз перших шести форм власних коливань, визначених у ПК ЛІРА-САПР, свідчить, що переважаючими є горизонтальні переміщення поверхів за рахунок згинальних деформацій колон, тоді як поздовжніми деформаціями елементів каркасу можна знехтувати. Це підтверджує справедливість фізичних припущень, покладених в основу запропонованої аналітичної моделі.

**4.** Розроблено математичну модель сейсмічного навантаження. Прискорення ґрунту представлено у вигляді суперпозиції періодичних хвиль із дискретно заданими частотами і випадковими фазами. Розподіл спектральної густини енергії землетрусу описано за допомогою емпіричної моделі Канаї-Таїмі. Побудовано акселерограми для різних типів ґрунтів.

На основі запропонованих моделей, досліджено нестационарні коливання багатоповерхового каркасного будинку під дією періодичних і сейсмічних навантажень. Для чисельного інтегрування вихідної системи нелінійних диференціальних рівнянь руху застосовано метод Рунге-Кутти. Одержано чисельні розв'язки динамічних рівнянь та визначено раціональні місця розташування демпферів сухого тертя. Досліджено динамічні характеристики будинків, виготовлених із різних матеріалів (залізобетон та полімербетони) та виконано порівняльний аналіз результатів для переміщень, перекосів та прискорень конструкції в залежності від властивостей матеріалу каркасу.

**5.** Розвинуті в дисертації моделі будівель із демпферами сухого тертя та методи їх раціонального проектування можуть використовуватися при розробці проектів будинків і споруд із підвищеною стійкістю до сейсмічних і динамічних

навантажень, а також при реконструкції існуючих будівель з метою підвищення їх сейсмічного захисту.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації:**

1. Данішевський В.В., Гайдар А.М. Оптимізація розташування демпферів сухого тертя для сейсмічного захисту каркасних будівель за допомогою методу рою частинок. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса: ОДАБА, 2020. Т. 80. С. 34–42.
2. Данішевський В.В., Гайдар А.М. Метод рою частинок для розв'язання задач нелінійної оптимізації. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро: ПДАБА, 2019. №6. С. 18–25.
3. Berezyuk A, Gannik N., Gaidar A. Features of polymer concrete under the influence of an aggressive environment. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. Poland: Warsaw University of Technology, 2013. V.21. P. 435–440.
4. Berezyuk A, Gannik N., Gaidar A. et al. Research of the organic concrete creep on codified pitches in conditions of the increased humidity and water environment. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. Poland: Warsaw University of Technology, 2011. V.19. P. 335–338.
5. Березюк А.Н., Ганник Н.И., Гайдар А.Н и др. Влияние добавок поверхностно-активных веществ на химическую стойкость полимербетонов. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Днепропетровск : ПДАБА, 2011. №3. С. 38–46.
6. Березюк А.Н., Ганник Н.И., Гайдар А.Н., и др. Особенности полимербетонов на основе фенолформальдегидных смол. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов*. Днепропетровск: ПГАСиА, 2009. Вып. 48. Ч. 2. С. 105–108.

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

7. Данішевський В.В., Гайдар А.М. Оптимальне проектування захисту будинків від сейсмічних навантажень за допомогою методів штучного колективного інтелекту. Тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». Дніпро: ДНУ, 2020. С. 78–79.
8. Данішевський В.В., Гайдар А.М. Оптимальне проектування багатопверхових будівель із демпферами сухого тертя за допомогою методу рою частинок. Тези доповідей VII Міжнародної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки». Одеса: ОДАБА, 2020. С. 84–88.
9. Гайдар А.Н., Данишевский В.В. Метод роя частиц для оптимального проектирования каркасных зданий с демпферами сухого трения. Тези доповідей Другої міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка НАН України В.І. Моссаковського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій». Дніпро: ДНУ, 2019. С. 153–154.
10. Данішевський В.В., Гайдар А.М. Оптимізація геометричної форми сталевих ферм за допомогою методів ройового інтелекту. Тези доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології

життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення". Одеса: ОДАБА, 2019. С. 10.

**Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації:**

11. Berezyuk A, Gannik N., Gaidar A. et al. The role of the production of polymer concrete for environmental protection. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. Poland: Warsaw University of Technology, 2012. V.20. P. 427–430.
12. Berezyuk A, Gannik N., Gaidar A. Influence of plasticizers the peat-based on frost resistance of concretes. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. Poland: Warsaw University of Technology, 2009. V.17. P. 531–534.

## АНОТАЦІЯ

*Гайдар А. М. Раціональне проектування залізобетонних і полімербетонних будівель із демпферами сухого тертя за допомогою методів ройового інтелекту.*  
– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 «Будівельна механіка» (19 – Архітектура та будівництво). – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2020.

Розвинуто метод рою частинок для визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя у багатоповерхових каркасних будівлях для підвищення їх сейсмічної стійкості. Досліджено вплив значень параметрів методу рою частинок на його практичну збіжність при пошуку екстремумів тестових функцій. Виконано порівняльний аналіз методу рою частинок та генетичного алгоритму.

Виконано чисельне динамічне моделювання багатоповерхового каркасного будинку у ПК ЛІРА-САПР. Визначено раціональне розташування демпферів, яке забезпечує найшвидше згасання коливань. Виконано порівняльний аналіз динамічних характеристик каркасних будівель, виготовлених із залізобетону та полімербетону.

Розроблено аналітичну динамічну модель багатоповерхового каркасного будинку із демпферами сухого тертя. Розроблено математичну модель сейсмічного навантаження. Досліджено нестационарні коливання будинку під дією періодичних і сейсмічних навантажень. Одержано чисельні розв'язки нелінійних динамічних рівнянь за допомогою методу Рунге-Кутти. Визначено місця раціонального розташування демпферів сухого тертя. Досліджено динамічні характеристики будинків, каркас яких виготовлено із залізобетону та полімербетону.

Результати дисертації можуть використовуватись при розробці проектів будинків і споруд із підвищеною стійкістю до сейсмічних і динамічних навантажень.

**Ключові слова:** сейсмостійке будівництво, демпфери сухого тертя, полімербетонні будівлі, динамічні навантаження, нестационарні коливання, раціональне проектування, ройовий інтелект.

## SUMMARY

*Gaidar A. M. Rational design of reinforced concrete and polymer concrete*



**buildings with dry friction dampers using the particle swarm optimization.** – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for obtaining the degree of Candidate of Technical Sciences by the speciality 05.23.17 «Structural Mechanics» (19 – Architecture and Civil Engineering). – State Higher Educational Institution “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture” Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the prediction of rational locations of friction dampers in multi-storey buildings to enhance their resistance to seismic and dynamic loads using the methods of swarm intelligence.

The method of particle swarm optimization is further developed in application to the tasks of rational design of buildings and structures. The explicit formulas for evaluation of the particles positions in the solution space are presented. Restriction conditions are specified so that to define the search area. Different types of boundary conditions governing the behavior of a particle when its coordinates fall outside the solution space are analyzed. Criteria for the termination of the search process are formulated. For a practical verification of the method of particle swarm optimization, some benchmark functions are considered. The proper magnitudes of the weight coefficients are determined ensuring the minimal computational costs required to detect the global extrema.

A comparative analysis of the particle swarm optimization procedure and the genetic algorithm is presented. The both methods allow determination of the global extrema of the benchmark functions at approximately the same computational costs. However, the particle swarm optimization procedure provides a gradual slowing down of all particles and their stopping in the vicinity of the extremum. Instead, in the considered variant of the genetic algorithm, the particles continue moving stochastically around the extremum, which can complicate the decision to terminate the search process. According to the results of the analysis, in the dissertation the particle swarm method is employed to determine the places of rational locations of friction dampers.

Numerical models of multi-storey buildings with dry friction dampers are further developed. A 2D model of a ten-storey reinforced concrete frame building is considered. The simulations were performed using the FEM package LIRA-SAPR. Modal analysis determines the frequencies and periods of natural vibrations. The seismic analysis is performed and the maximum horizontal displacements of the top of the frame are determined.

The problem of the rational location of friction dampers is studied in a case of periodic load applied horizontally to the foundation of the structure. A design solution with three friction dampers installed as braces in the central span of the building is considered. The load frequency is assumed to be equal to the fundamental frequency of the first normal mode, which ensures the most dangerous case of the resonance. The load amplitude is determined in such a way that the displacement of the top of the frame should be equal to the displacements obtained before by the seismic analysis. A periodic load is applied during a specified period of time, after which free vibrations of the building occur. The objective function is the displacement amplitude of the top of the frame after a certain time after removing the load. The problem of the rational location of friction dampers is solved by the method of particle swarm optimization. A population of 8 particles is employed. The rational locations of the dampers are determined at the floors 2, 5 and 6,

which provide the fastest attenuation of the vibrations of the structure. Dynamic properties of the polymer concrete frame building are studied and the seismic analysis is performed using the FEM package in LIRA-SAPR.

Analytical models describing the dynamic behavior of multi-storey frame buildings with dry friction dampers are further developed. A 2D model of a six-storey reinforced concrete frame building is considered. The calculation model is adopted in a form of a vertical cantilever rod with lumped masses. The governing system of differential equations of motion is introduced. Let us note that the presence of dry friction dampers involves a significant nonlinearity into the input dynamical equations. Further, the governing equations of motions are integrated numerically by the Runge-Kutta method.

In order to justify the applicability of the proposed analytical model, its natural frequencies are compared with the results of the modal analysis of the original structure performed in LIRA-SAPR. The obtained analytical and numerical solutions are in a good agreement. The analysis of the displacement patterns of the lowest six normal modes evaluated in LIRA-SAPR confirms the validity of the basic physical assumptions of the lumped mass model.

The problem of a rational location of friction dampers in the six-storey frame building using the proposed lumped mass model is considered. A design solution with three dampers installed as braces in the central span of the building is adopted. There are two types of objective functions that need to be minimized: 1) the maximal displacements of the floors and 2) the maximal inter-storey drifts.

The case of a periodic load with a frequency equal to the fundamental frequency of the structure is considered. The rational locations of the dampers are predicted using the method of particle swarm optimization with a population of 16 particles. The same solution is obtained for the both objective functions implying the installation of the all three dampers at the floor 1.

Mathematical models of seismic loads are further developed. The seismic acceleration is simulated by a stochastic Gaussian process as a superposition of harmonic waves with discrete frequencies and random phases. The spectral energy density of the earthquake is described by the empirical Kanai-Taimi model. Based on the proposed model, accelerograms for different types of soils are developed.

Non-stationary vibrations of the six-storey frame building under the seismic load are investigated. Using the method of particle swarm optimization, the population of 16 particles is employed to predict the rational locations of friction dampers. The minimal displacements are achieved installing the dampers at the floors 1, 3, 4, whereas the minimal inter-storey drifts require installation of the dampers at the floors 1, 2, 3. The latter solution provides also the minimal accelerations of the building.

The dynamic properties and the natural frequencies of a six-storey polymer concrete building are studied. The response of the polymer concrete structure to periodic and seismic loads is investigated. The floors displacements, the inter-storey drifts and the accelerations of the floors are determined. A comparative analysis of the obtained results for the reinforced concrete and the polymer concrete buildings is presented.

The developed dynamic models and the methods of simulation of buildings with friction dampers can be used in the design of houses and structures with enhanced resistance to seismic and dynamic impacts, as well as for the reconstruction of existing

buildings to increase their seismic protection.

**Key words:** earthquake engineering, dry friction dampers, polymer-concrete buildings, dynamic loads, non-stationary vibrations, rational design, collective intelligence.

Підписано до друку 18.03.2021. Формат 60\*84 1/16

Цифровий друк. Папір офсетний.

Умовно-друкарських аркушів 1.51. Тираж 100 примірників.

Замовлення № 14.

Фізична особа підприємець Скрипець О.М.

вул. Чернишевського 24-а, Дніпро 49600

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури.

