

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГАЙДАР АНАСТАСІЯ МИКОЛАЇВНА**

УДК 624.04: 519.6


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

05.23.17 – Будівельна механіка

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



\_\_\_\_\_ А.М. Гайдар

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Данішевський Владислав Валентинович, доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2020

## 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.

Згідно з принципами сталого розвитку та циркулярної економіки, важливим завданням сучасного будівництва є розробка і використання легковагових економічних конструкцій, що характеризуються низьким споживанням ресурсів на всіх етапах свого життєвого циклу. Стійкість таких конструкцій до дії сейсмічних навантажень забезпечується за допомогою спеціальних пристроїв: сейсмічної ізоляції, інерційних гасителів коливань і 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 складним завданням, яке вимагає комплексного аналізу динамічних властивостей споруди і, як правило, не може бути вирішено в рамках стандартних методів проектування. Тому актуальною проблемою є розробка нових методів розрахунку конструкцій з демпферами сухого тертя, що дозволяють знаходити оптимальні проектні рішення для мінімізації динамічних і сейсмічних впливів.

Дисертаційна робота присвячена визначенню місць раціонального розташування демпферів сухого тертя у багатоповерхових будівлях за допомогою методів ройового інтелекту, динамічному моделюванню будівель із

демпферами сухого тертя та дослідженню їх коливань під дією періодичних і сейсмічних навантажень, дослідженню динамічних характеристик будівель, виготовлених із різних матеріалів (залізобетону та полімербетону).

Дістав подальший розвиток метод рою частинок стосовно до задач раціонального проектування будівель та споруд. Наведено розрахункові формули, за якими обчислюються положення частинок у просторі розв'язків на кожній ітерації процесу пошуку. Задано умови обмежень, які визначають область пошуку. Проаналізовано різні типи граничних умов, що регулюють поведінку частинки, якщо її координати потрапляють за межі простору розв'язків. Сформульовано критерії завершення процесу пошуку. Розроблено програмний код для реалізації методу рою частинок у системі комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima.

Для практичної верифікації методу рою частинок розглянуто задачі знаходження екстремумів тестових функцій: «долинної» функцію Розенброка та мультимодальної функції Растрігіна. Досліджено вплив розміру популяції на швидкість збіжності методу. Визначено значення вагових коефіцієнтів, при яких пошук глобальних екстремумів потребує менше обчислювальних витрат.

Сформульовано чисельну схему генетичного алгоритму, який може застосовуватись для чисельного розв'язання нелінійних задач оптимізації. 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 дозволили одержати наближені розв'язки

розглянутих задач 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 проведеного аналізу, для визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя застосовано метод рою частинок.

Дістали подальший розвиток чисельні моделі багатоповерхових будинків із демпферами сухого тертя. Розглянуто 2D модель десятиповерхового залізобетонного каркасного будинку. Розрахунки виконувались у програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР. За допомогою модального аналізу визначено частоти та періоди власних коливань. Виконано розрахунок на сейсмічний вплив та визначено максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу.

Досліджено задачу раціонального розташування демпферів у випадку періодичного навантаження, прикладеного горизонтально до опорних вузлів каркасу. Розглянуто конструктивну схему, коли у центральному прольоті будинку може бути встановлено три демпфера у вигляді розкосів. Частоту навантаження прийнято рівною частоті першої форми власних коливань, що відповідає найнебезпечнішому випадку резонансу. Амплітуду навантаження визначено таким чином, щоб переміщення верхнього поясу каркасу дорівнювали значенням, одержаним вище за допомогою розрахунку на сейсмічний вплив. Періодичне навантаження було прикладене впродовж заданого проміжку часу, після чого відбувалися вільні коливання будівлі. Цільовою функцією прийнято амплітуду переміщень верхнього поясу каркасу через певний час після зняття навантаження. Задачу раціонального розташування демпферів розв'язано за допомогою методу рою частинок. Використано популяцію з восьми частинок. Визначено раціональне

розташування демпферів на поверхах 2, 5, 6, що забезпечує найшвидше згасання коливань споруди.

При дослідженні динамічних характеристик будівель необхідно враховувати фізико-механічні властивості матеріалів, з яких виготовлені конструктивні елементи споруди. Останніми роками розробляються нові типи матеріалів із поліпшеними характеристиками. Одними з таких матеріалів є полімербетони. Застосування полімербетонів для виготовлення конструктивних елементів будівель дозволяє підвищити міцність споруд, покращити їх стійкість до дії агресивних середовищ, морозостійкість та довговічність.

Розглянуто фізико-механічні властивості полімербетонних конструкцій. Модуль пружності та густина цементних і 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 на стиск і згин, запропоновано нові аналітичні формули, що дозволяють наближено оцінити поперечні розміри колон та ригелів будинку, виготовленого з полімербетону. Проведено аналіз динамічних характеристик полімербетонного каркасного будинку та виконано його розрахунок на сейсмічний вплив у ПК ЛІРА-САПР.

Дістали подальший розвиток аналітичні моделі, що описують динамічну поведінку багатопверхових каркасних будівель із демпферами сухого тертя. Розглянуто 2D модель шестипверхового залізобетонного каркасного будинку. Розрахункову схему прийнято у вигляді вертикального консольного стрижня із зосередженими масами, які розташовані на рівні перекриттів. Складено систему вихідних диференціальних рівнянь руху конструкції. Зазначимо, що наявність демпферів сухого тертя вносить суттєву нелінійність у систему динамічних рівнянь.

Для підтвердження достовірності запропонованої аналітичної моделі, виконано порівняння обчислених на її основі частот власних коливань із

результатами модального аналізу вихідної конструкції у ПК ЛІРА-САПР. Знайдені аналітичні та чисельні розв'язки добре узгоджуються між собою. Аналіз перших шести форм власних коливань, визначених у ПК ЛІРА-САПР, підтверджує справедливість фізичних припущень, покладених в основу моделі із зосередженими масами.

Для чисельного інтегрування вихідної системи нелінійних диференціальних рівнянь руху використано метод Рунге-Кутти. Запропоновану чисельну процедуру реалізовано у системі Mathematica.

Досліджено задачу раціонального розташування демпферів у шестиповерховому каркасному будинку на основі запропонованої аналітичної моделі із зосередженими масами. Розглянуто конструктивну схему, коли у центральному прольоті будинку може бути встановлено три демпфера у вигляді розкосів. Прийнято два типи цільових функцій, які потрібно мінімізувати: максимальні переміщення поверхів та максимальні відносні перекося поверхів.

Досліджено випадок періодичного резонансного навантаження з частотою, що дорівнює частоті першої форми власних коливань. Раціональне розташування демпферів знайдено за допомогою методу рою частинок; розмір популяції дорівнює 16. Для обох цільових функцій одержано однаковий розв'язок, що передбачає встановлення всіх трьох демпферів на поверсі 1. Застосування демпферів сухого тертя дозволяє знизити максимальні переміщення і перекося поверхів приблизно у 2 рази.

Дістала подальший розвиток математична модель сейсмічного навантаження. Прискорення ґрунту описано стохастичним гауссовським процесом у вигляді суперпозиції гармонічних хвиль із дискретно заданими частотами і випадковими фазами із нормальним розподілом. Спектральну густину енергії землетрусу визначено за допомогою емпіричної моделі Канаї-Таїмі. На основі запропонованої моделі побудовано акселерограми для різних типів ґрунтів.

Досліджено нестационарні коливання шестиповерхового каркасного будинку під дією сейсмічного навантаження. Для пошуку раціонального розташування демпферів методом рою частинок використано популяцію з 16 частинок. Мінімум переміщень досягнуто при встановленні демпферів на поверхах 1, 3, 4, тоді як для мінімізації перекосів необхідно встановити демпфери на поверхах 1, 2, 3. В останньому випадку прискорення споруди також будуть найменшими. У випадку сейсмічного навантаження, раціональне розташування демпферів дозволяє знизити відносні перекоси поверхів у 3.8 рази, тоді як максимальні прискорення зменшуються приблизно у 3 рази.

Визначено динамічні характеристики та частоти власних коливань шестиповерхового полімербетонного будинку. Досліджено реакцію полімербетонного будинку на дію періодичного та сейсмічного навантажень. Визначено переміщення, перекоси та прискорення поверхів; проведено порівняльний аналіз одержаних даних для залізобетонного та полімербетонного будинків.

У дисертаційній роботі 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.

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

Результати дисертаційної роботи впроваджено компанією ТОВ «Кіровський» при розробці та реалізації проектів житлових будівель із підвищеною сейсмічною стійкістю. 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».

**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 “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

According to the principles of sustainable development and circular economy, an important task of Civil Engineering is the development and employment of light-weight economic structures characterized by low resources consumption throughout the all stages of their life cycle. The resistance of such structures to seismic loads is provided by special devices: seismic insulation, inertial vibration dampers and various friction dampers. In recent years, dry friction dampers are widely used because of the simplicity and reliability of the design, low costs, easy installation and maintenance, as well as high dissipative characteristics.

Determining the location of friction dampers inside a building is a complex task that requires a comprehensive analysis of the dynamic properties of the structure and, as a rule, cannot be solved within the framework of standard design methods. Therefore, a crucial problem is the development of novel methods for calculating structures with dry friction dampers allowing finding optimal design solutions to minimize dynamic and seismic impacts.



The dissertation is devoted to the prediction of the rational locations of friction dampers in multi-storey buildings using the methods of swarm intelligence; to the dynamic modeling of buildings with friction dampers and to the study of dynamic properties of buildings constructed from different materials (namely, reinforced concrete and polymer concrete buildings).

In this work, 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 at every stage of the iteration process 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 the implementation of the particle swarm optimization procedure, the software code is developed in open-source computer algebra system Maxima.

For a practical verification of the method of particle swarm optimization, some benchmark functions are considered: the “valley” Rosenbrock function and the multimodal Rastrigin function. The influence of the population size on the rate of convergence is investigated. The magnitudes of the weight coefficients are determined ensuring the minimal computational costs required to detect the global extrema.

A numerical scheme of a genetic algorithm is formulated. The genetic algorithm can be also applied for a numerical solution of nonlinear optimization problems. The cells chromosomes are coded by real numbers. The initial population is generated randomly. The parent cells are selected following the panmixia principle, which means a random mating. The mating is performed using a crossover arithmetic operator. Mutations are produced by random arithmetic shift of the chromosomes magnitudes. The next generation is created by a selection of the most “adapted” cells, whose values of the objective functions are closest to the extreme. For the implementation of the genetic algorithm, a software code is developed in Maxima.

A comparative analysis of the genetic algorithm and the particle swarm optimization method is performed. The benchmark Rosenbrock and Rastrigin functions are studied. Both methods allow determination of approximate optimal solutions at nearly the same computational costs. The particle swarm optimization provides a gradual slowing down the motion of all particles and their stopping in the vicinity of the extremum. Instead, in the considered implementation of the genetic algorithm, the particles do not stop, but continue to move stochastically nearby the extremum. This may make difficult a decision to terminate the search process. According to the obtained results, the method of particle swarm optimization is chosen to determine the rational locations of dry 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 eight 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.

Studying the dynamic properties of buildings, it is necessary to take into account the physical and mechanical properties of materials, which are used for the structural elements. In recent years, new types of construction materials are developed possessing a number of enhanced properties. One of them is the polymer concrete. The use of polymer concrete for the manufacture of structural elements of buildings allows increasing the strength of structures; improving their resistance to aggressive environments; high frost resistance and durability.

Physical and mechanical properties of polymer concrete structures are considered. The elastic modulus and the density of cement and polymer concretes are approximately the same. However, the strength of polymer concrete is about 4–6 times higher, which allows to reduce the cross sections of structural elements decreasing the weight and the material consumption of structures. Considering compression and bending strength conditions, new analytical formulas are proposed for an approximate estimation of the transverse dimensions of columns and beams of polymer concrete buildings. 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 located at the floor levels. 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.

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 Runge-Kutta method is used for the numerical integration of the input system of nonlinear differential equations of motion. The proposed numerical procedure is implemented in Maxima.

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 considered. 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, which means the installation of the all three dampers at the floor 1. The use of the friction dampers allows reducing the maximal floor displacements and the inter-storey drifts in 2 times.

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. In the case of the seismic load, the rational location of the dampers allows to reduce the relative inter-storey drifts in 3.8 times, while the maximal acceleration is reduced in about 3 times.

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.

In this work, for the first time, a solution of the problem of a rational location of friction dampers in multi-storey buildings to minimize the vibration amplitudes and the inter-storey drifts under periodic and seismic loads is obtained using the method of particle swarm optimization.

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.

The results of the dissertation are used in the private limited company “Kirovsky” (Ukraine) for the development and implementation of projects of residential buildings with high seismic resistance. The scientific contributions of the dissertation are employed in the lecture courses for M.Sc. students and in supervising M.Sc. theses at the Faculty of Civil Engineering at Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Ukraine).

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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 полимербетонів. *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 полимербетонів 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. Данишевський 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.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
1.1. Сейсмостійке будівництво та методи захисту будівель від сейсмічних впливів	28
1.2. Застосування полімербетонів для виготовлення конструктивних елементів з покращеними фізико- механічними характеристиками	35
1.3. Методи розв’язання нелінійних задач оптимального проектування	38
1.4. Висновки по розділу 1	47
1.5. Список використаних джерел в розділі 1	49
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ	50
2.1. Алгоритм методу рою частинок	50
2.2. Тестова функція Розенброка	52
2.3. Тестова функція Растрігіна	57
2.4. Порівняльний аналіз методу рою частинок та генетичного алгоритму	61
2.5. Висновки по розділу 2	70
2.6. Список використаних джерел в розділі 2	72
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ ДЕМПФЕРІВ У КАРКАСНИХ БУДІВЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ЛІРА-САПР	73
3.1. Демпфери сухого тертя	73
3.2. 2D модель десятиповерхового будинку із залізобетонним каркасом	78



3.3. Розрахунок на сейсмічне навантаження	80
3.4. Нестационарні коливання будівлі під дією періодичного навантаження та розв'язання задачі оптимізації	80
3.5. Властивості полімербетонних конструкцій	83
3.6. Оцінка розмірів конструктивних елементів та ваги полімербетонної будівлі	86
3.7. Динамічні характеристики десятиповерхового полімербетонного будинку	89
3.8. Висновки по розділу 3	90
3.9. Список використаних джерел в розділі 3	92
<b>РОЗДІЛ 4. ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ДЕМПФЕРАМИ СУХОГО ТЕРТЯ</b>	<b>93</b>
4.1. 2D модель шестиповерхового будинку із залізобетонним каркасом	93
4.2. Розрахункова схема та вихідні рівняння руху	94
4.3. Модальний аналіз та порівняння запропонованої моделі з розрахунками у програмному комплексі ЛІРА-САПР	96
4.4. Застосування методу Рунге-Кутти для динамічних розрахунків каркасних будівель	99
4.5. Верифікація чисельної процедури динамічного розрахунку	101
4.6. Висновки по розділу 4	106
4.7. Список використаних джерел в розділі 4	107
<b>РОЗДІЛ 5. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ ДЕМПФЕРІВ У КАРКАСНИХ БУДІВЛЯХ ПРИ ПЕРІОДИЧНИХ ТА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ</b>	<b>108</b>
5.1. Розв'язання задачі оптимізації у випадку періодичного резонансного навантаження	108
5.2. Математична модель сейсмічного навантаження	110
5.3. Розв'язання задачі оптимізації у випадку сейсмічного навантаження	113

5.4. Динамічні характеристики шестиповерхового полімербетонного будинку	116
5.5. Динамічна реакція полімербетонного будинку на дію періодичного навантаження	118
5.6. Динамічна реакція полімербетонного будинку на дію сейсмічного навантаження	122
5.7. Висновки по розділу 5	125
5.8. Список використаних джерел в розділі 5	128
ВИСНОВКИ	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	133
ДОДАТКИ	142
А. Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації	142
Б. Програмна реалізація методу рою частинок	145
В. Програмна реалізація генетичного алгоритму	148
Г. Програмна реалізація методу динамічного розрахунку каркасних будівель	152
Д. Документи про впровадження результатів дисертаційної роботи	155

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

### Латинська абетка

- a* амплітуда прискорення
- A* площа поперечного перерізу колон (п. 3.4) або амплітуда переміщення (п. 4.3.)
- b* поперечні розміри колон та ригелів
- C* напрямні косинуси сейсмічного впливу (п. 3.2) або коефіцієнт в'язкості (пп. 4.2–4.5)
- d* номер аргументу цільової функції (номер координати частинки у пп. 2.1–2.3, номер хромосоми у п. 2.4) або перекис поверхів (п. 5.1)
- D* розмірність задачі оптимізації
- E* Модуль Юнга
- f* частота
- $\Delta f$  крок дискретизації за частотою при моделюванні сейсмічного навантаження
- F* сила реакції демпферу
- g* прискорення вільного падіння
- g** вектор координат найкращого положення рою
- h* висота поверху
- i* номер ітерації у методі рою частинок та у генетичному алгоритмі
- j* номер інтервалу дискретизації за частотою при моделюванні сейсмічного навантаження
- k* коефіцієнти розрахунку на сейсмічне навантаження (п. 3.2) або номер поверху (пп. 4.2–4.4, 5.1, 5.3)
- K* коефіцієнт жорсткості
- m* номер ітерації у методі Рунге-Кутти
- M* згинальний момент (п. 3.4) або маса поверху (пп. 4.1–4.5)
- n* номер частинки (пп. 2.1–2.3) або номер клітини (п. 2.4)

$N$	поздовжнє зусилля (п. 3.4) або зусилля тертя демпфера (пп. 4.2, 5.1)
$p$	параметр у методі Рунге-Кутти (п. 4.4, 4.5) або коригуючий коефіцієнт моделі Канаі-Таїмі (п. 5.2)
$\mathbf{p}$	вектор координат найкращого положення частинки
$q$	параметр у методі Рунге-Кутти
$Q$	функція у методі Рунге-Кутти
$r$	випадкове число
$R$	функція у методі Рунге-Кутти
$s$	параметр у методі Рунге-Кутти
$S$	спектральна густина енергії землетрусу
$t$	час
$\Delta t$	крок дискретизації за часом у методі Рунге-Кутти
$T$	період
$u$	переміщення поверху
$v$	швидкість поверху
$\mathbf{v}$	вектор швидкості частинки
$w$	ваговий коефіцієнт
$W$	осьовий момент інерції поперечного перерізу ригелів
$x$	аргумент цільової функції (координата частинки у пп. 2.1–2.3) або значення хромосоми (п. 2.4)
$\mathbf{x}$	вектор координат частинки (п. 2.1) або набір хромосом (п. 2.4)
$y$	значення хромосоми клітини-потомка
$\mathbf{y}$	набір хромосом клітини-потомка
$z$	тестова функція

### **Грецька абетка**

$\alpha$	кут нахилу демпфера
$\beta$	коефіцієнт згасання
$\gamma$	коефіцієнт мутації

- $\eta$  коефіцієнт підвищення міцності
- $\delta$  логарифмічний декремент коливань
- $\zeta$  коефіцієнт, що враховує демпфуючі властивості ґрунту
- $\rho$  густина
- $\sigma$  напруження
- $\varphi$  фаза

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Згідно принципів сталого розвитку та циркулярної економіки, важливим завданням сучасного будівництва є розробка і використання легковагомих 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 – 2020 рр., 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 багатопверхового 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 каркасних 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 скінченних елементів у ПК ЛПА-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 багатопверхових 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 багатоповерхових будинків із демпферами сухого тертя.
3. Уточнено динамічні характеристики багатоповерхових 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 багатоповерхових 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 багатоповерхових 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 багатоповерхових каркасних 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». Документи про впровадження результатів дисертаційної роботи наведено у додатку Д.

**Достовірність результатів роботи.** Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи розроблено на основі загальноприйнятих теоретичних засад, шляхом математично коректного формулювання задач та за допомогою сучасних науково-обґрунтованих методів досліджень. Одержані результати адекватно відображають фізичну природу задач та відповідають сучасним уявленням про динамічні властивості будівельних конструкцій. Знайдені в роботі аналітичні та чисельні розв'язки добре погоджуються між собою.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертації одержані здобувачем самостійно. У наукових працях, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному (номера посилань відповідають списку публікацій здобувача, наведеному вище): 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 157 сторінок, у тому числі 54 рисунка і 3 таблиці. Обсяг основного тексту дисертації складає 110 сторінок.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Сейсмостійке будівництво та методи захисту будівель від сейсмічних впливів

На сучасному етапі розвитку будівництва проблема захисту будівель і споруд від сейсмічних впливів є завданням першорядної важливості. Дослідження в цьому напрямку в світлі недавніх руйнівних землетрусів, а також прискореного розвитку інфраструктури сейсмоактивних районів вказує на те, що актуальною галуззю сучасного будівництва є сейсмостійке будівництво, яке являє собою зведення будівель і споруд з урахуванням впливу сейсмічних (інерційних) сил, що виникають при коливаннях основи споруди під час землетрусу. Для оцінки потужності сейсмічного впливу і правильного вибору антисейсмічних заходів, у будівельній практиці користуються 12-бальною шкалою землетрусів MKS-64. Зведення споруд за діючими нормами дозволяється тільки в районах з інтенсивністю сейсмічного впливу не більше 9 балів. При силі землетрусу менше 7 балів проектування можна здійснювати без урахування сейсмічного впливу [52, 61].

Сейсмічність районів, схильних до землетрусів, визначається за картами сейсмічного районування. Додатково, за допомогою сейсмічного мікрорайонування, уточнюються параметри сейсмічних впливів на майданчику будівництва та експлуатації будівель і споруд в залежності від місцевих умов – ґрунтових, геоморфологічних, гідрогеологічних та геофізичних.

Ступінь сейсмічного впливу на будівлі (споруди) в значній мірі залежить від ґрунтових умов. Найбільш сприятливими в сейсмічному відношенні вважаються міцні скельні ґрунти. Сильно вивітрені або порушені геологічними процесами породи, ґрунти, що просідають, райони осипів, пливунів, зсувів, гірничих виробок несприятливі, а іноді і взагалі непридатні для влаштування основ споруд. У тих випадках, коли будівництво все ж здійснюється в несприятливих геологічних умовах, вдаються до посилення основи і

здійснюють додаткові заходи щодо сейсмічного захисту споруд, які призводять до значного подорожчання будівництва [9, 35].

Розрахунок сейсмостійких споруд, як правило, здійснюється за несучою здатністю і передбачає знаходження розрахункових сейсмічних навантажень з урахуванням обов'язкових конструктивних обмежень і вимог (обмеження розмірів будівель в плані і по висоті; розрахункова сейсмічність приймається рівною сейсмічності будівельного майданчика). Для особливих за відповідальністю споруд їх розрахункова сейсмічність підвищується в порівнянні з сейсмічністю будівельного майданчика (як правило, на один бал, що відповідає збільшенню розрахункових сейсмічних навантажень удвічі) [27, 44].

Руйнівні землетруси, які пройшли за останні десять років на території України і багатьох зарубіжних країн внесли корективи в оцінку очікуваної величини сейсмічної інтенсивності, в результаті чого відбулися істотні зміни в картах сейсмічного районування, розрахункова сейсмічність багатьох регіонів збільшилася на 1, 2 і навіть на 3 бали.

Територія України є небезпечною щодо ймовірності виникнення природно-техногенних надзвичайних ситуацій. Сейсмічні райони з прогнозованою інтенсивністю сейсмічних впливів 6-9 балів займають близько 20% території України, на якій проживає близько 10 млн осіб. Райони з інтенсивністю 7-9 балів складають близько 12% території, де проживає більше 7 млн населення. Найбільш небезпечними для України є такі сейсмічні зони: Вранча, Кримська і Закарпатська області. У цілому 40% території України може бути охоплено безпосереднім впливом небезпечних сейсмічних подій і до 70% – впливом землетрусів з підтопленням, зсувами, підробкою та іншими інженерно-геологічними процесами, що негативно впливають на стійкість споруд. У Закарпатській області сейсмічно активна зона оцінена у 7 балів. Тут землетруси мають свою характерну особливість. Вони проходять близько до поверхні землі, в середньому 25–30 кілометрів від поверхні. Такі землетруси небезпечні саме тим, що їх сила на поверхні рівна силі в епіцентрі землетрусу.

Через це глибинність таких землетрусів і площа їх впливу відносно не велика [52].

Так, землетруси у зоні Вранча, глибинність яких сягає до 250 кілометрів, відчуваються на значній території. Для оцінки землетрусів на Закарпатті використовується шкала MKS-64, вона показує руйнування на поверхні і служить основою для прогнозування надзвичайних ситуацій.

Можна відмітити землетруси з найбільш руйнуючими наслідками – Спітакський землетрус (Вірменія, 1988 р.), Кобе (Японія, 1995 р.), Ніїгата (Японія, 1964 р.), Туреччина 1998 р., Китай 2008 р., Італія, 2009 р., Індонезія, 2009 р.

За даними американської геологічної служби *U. S. Geological Survey*, представленими на рис. 1.1, можна спостерігати кількість землетрусів, що відбулися на планеті протягом одного місяця.

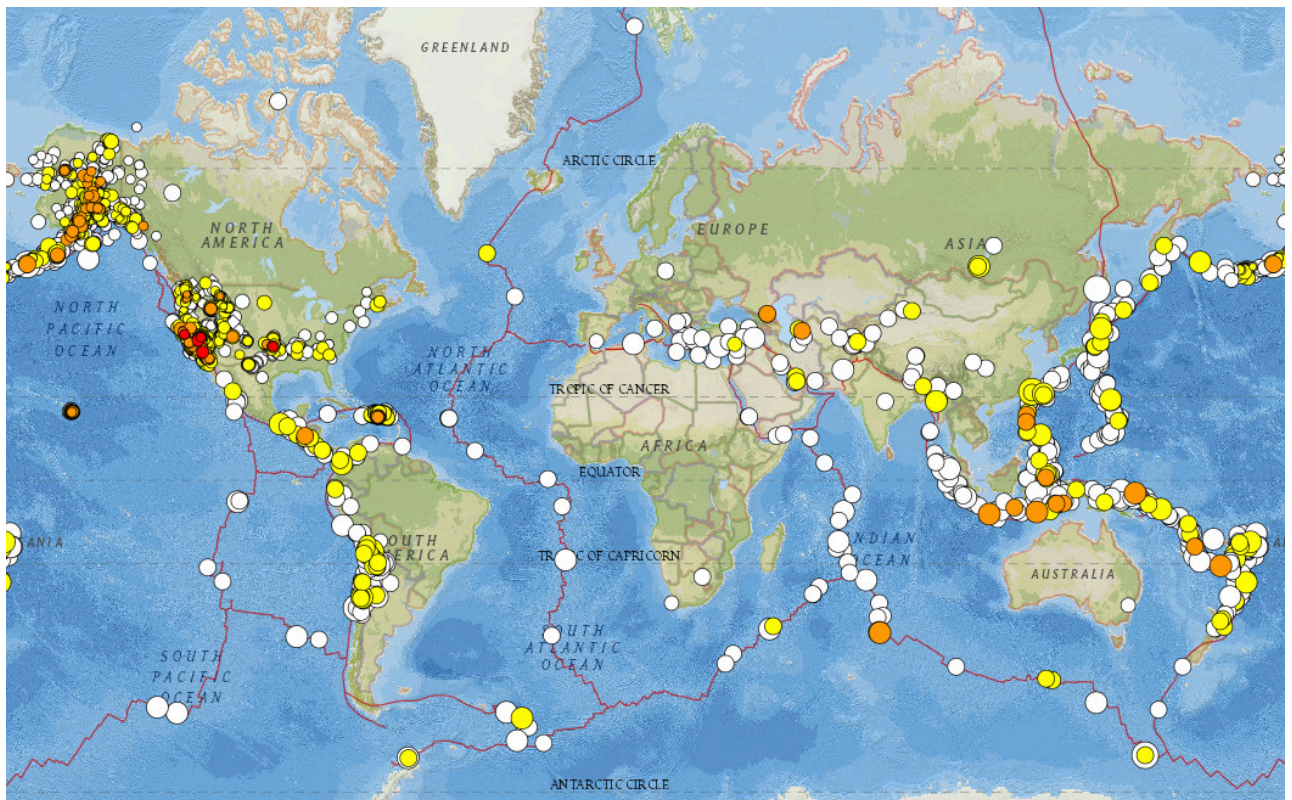


Рисунок 1.1 - Землетруси протягом грудня 2020 року (<https://www.usgs.gov>)

Тому важливою проблемою будівництва є забезпечення сейсмостійкості будівель та споруд. Особливо важливо проводити комплекс конструктивних антисейсмічних заходів у будинках, що експлуатуються і в яких спочатку вони не передбачалися або передбачалися, але не в повному обсязі. При цьому необхідно довести сейсмостійкість існуючих будівель до рівня, що відповідає сучасним нормам сейсмостійкого будівництва. Вирішення цієї проблеми є досить складним і вимагає комплексного підходу. Слід також зазначити що будівлі, які експлуатуються вже багато років, випадають з розгляду діючих нормативних документів, що може позначитися в майбутньому на розмірах збитків під час землетрусу.

Традиційно, втрати від землетрусів намагалися зменшити шляхом підвищення міцності будівель, що призводило до збільшення розмірів та маси конструктивних елементів (стін, колон, перекриттів). Такий вид сейсмічного захисту називається пасивним. Застосування пасивного сейсмічного захисту призводить до збільшення перетинів елементів конструкції, що в свою чергу призводить до збільшення жорсткості і ваги споруди. Це викликає зростання інерційної складової навантаження, що викликає необхідність ще раз переглядати розміри перетинів [1, 43, 55].

Сучасне будівництво ґрунтується на принципово інших підходах. Актуальною задачею є використання легковагових, гнучких та економічних конструкцій, стійкість яких до сейсмічних впливів і динамічних впливів забезпечується за допомогою спеціальних пристроїв гасіння коливань. Це широко висвітлюється в роботах Айзенберга Я. М. [1], Волкової В. Є. [6], Гордєєва Б. А. [10], Мартемьянова А. І. [34], Ноговицина А. Е. [38], Полякова В. С. [43], Полякова С. В. [44], Уздіна А. М. [55] та інших авторів. Такі засоби сейсмічного захисту називаються активними.

В системах активного сейсмічного захисту, на відміну від простого підвищення міцності будівель з великою витратою матеріалів, використовуються адаптація до зовнішніх впливів, штучне підвищення демпфуючих властивостей будівель, антирезонансне гасіння коливань,

створення умов ізоляції будівлі від сейсмічних коливань ґрунту [11, 16–18, 43, 44, 72–74, 80]. У нашій країні і за кордоном запропоновано і розроблено велику кількість систем активного сейсмічного захисту будівель. Багато з них одержали практичне впровадження на реальних об'єктах, що дозволило оцінити їх технологічність для будівельного виробництва.

На багатьох об'єктах проведено вібраційні випробування, що дозволило отримати деякі експериментальні дані про поведінку цих систем під дією динамічних впливів. Однак всі розроблені системи потребують додаткових досліджень переважно в натурних умовах. Реальну поведінку систем сейсмічного захисту складно спрогнозувати теоретично або за допомогою чисельного моделювання через велику кількість факторів, що впливають на поведінку споруди при інтенсивному землетрусі. Тому широке впровадження сучасних систем активного сейсмічного захисту в даний час стримується відсутністю або обмеженістю даних про їх реальну поведінку при сильних землетрусах.

Проте, впровадження систем сейсмічного захисту в будівництві слід продовжувати і розширювати з двох основних причин.

По-перше, тільки в процесі будівництва можна достовірно оцінити технологічність кожної системи сейсмічного захисту, отримати дані про техніко-економічні показники, які, в кінцевому рахунку, можуть виявитися вирішальними при виборі того чи іншого рішення.

По-друге, вже сьогодні на підставі відомих результатів теоретичних і експериментальних досліджень можна визначити ряд перспективних для сейсмостійкого будівництва систем захисту. Проводяться дослідження з удосконалення вже відомих систем з кінематичними опорами і дисипативними демпферними елементами [11, 36, 38, 42]. Метою цих досліджень є пошук удосконалених конструктивних систем для зниження сприйняття будівлею енергії сейсмічного впливу.

Види сейсмічної ізоляції будівельних споруд можна поділити на наступні класифікаційні підгрупи:



- будівлі з ґрунтовим екрануванням;
- будівлі з легким фундаментним сейсмічним поясом;
- будівлі з гнучким першим поверхом;
- будівлі з гнучкострижневими опорами або поясами;
- будівлі з підвісними опорами;
- будівлі з резинOMETALEVIMI або іншими віброізолюючими опорами;
- будівлі з гідрофрікційними опорами;
- будівлі з кінематичними опорами.

При застосуванні сейсмічної ізоляції, опорні частини будівель можуть рухатися, коливаючись відносно ґрунту зі зниженою амплітудою, а спектр власних частот конструкції може бути виведений далеко за межі домінуючих спектрів землетрусів [32, 34].

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 [43, 76].

В'язкі демпфери складаються з циліндричного корпусу, у якому із певним зазором розташований поршень. Як правило, демпфуюча рідина складається з двох компонентів, один з яких має велику в'язкість і малу питому вагу, а інший – малу в'язкість при більшій питомій вазі. Розсіювання енергії може відбуватися при рухах поршня як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. Недоліками таких демпферів є висока вартість і необхідність періодичного технічного обслуговування в процесі експлуатації. Через це у практиці сейсмостійкого будівництва в Україні їх застосування обмежено. За кордоном в'язкі демпфери використовуються, наприклад, у системах сейсмічної ізоляції реакторів атомних електростанцій, розроблених німецькою компанією GERB (<https://www.gerb.com>).

У даний час активно розвивається напрямок сейсмічного захисту, пов'язаний з використанням спеціальних пристроїв, здатних поглинати енергію сейсмічних впливів за рахунок розвитку в матеріалі конструктивних елементів

непружних деформацій [80]. Такі поглиначі розміщуються у вузлах конструкції з найбільш імовірним виникненням зон пластичних деформацій. Перевагами таких поглиначів є те, що вони мають невеликі розміри, можливість використання у спорудах зведених за різними конструктивними схемами, можливість легкої заміни в разі потреби. Основним елементом поглиначів можуть служити сталеві балки, які при пластичних деформаціях здатні поглинати значну кількість енергії. Випробування показали, що тривалість ефективною роботи таких пристроїв становить від сімдесяти до кількох сотень циклів коливань. На практиці це обмежує термін їх служби одним чи двома землетрусами.

Останніми роками широке поширення одержали демпфери сухого тертя [72–74, 80]. Такі пристрої складаються з двох фрикційних елементів, що просковзають відносно один одного. Фрикційні елементи можуть бути виготовлені з різних матеріалів, але найчастіше використовується сталь. Переваги демпферів сухого тертя наступні:

- Простота і надійність конструкції. Не потребують технічного обслуговування в процесі експлуатації.
- Багаторазовість використання. Не потребують заміни після землетрусу.
- Низька вартість пристроїв та їх монтажу.
- Простий та швидкий монтаж. Зручна реконструкція існуючих будівель.
- Максимальна дисипація енергії за цикл.
- Широкий діапазон зусиль тертя: 2 – 1500 кН.

Проектування сейсмостійких будівель і споруд, що характеризуються високою надійністю, ставить перед дослідниками складні завдання, пов'язані з вибором раціональних конструктивних рішень та урахуванням різних фізичних і експлуатаційних факторів. До останніх відносяться численні нелінійні ефекти, такі як деформація основи, розвиток пластичних деформацій у несучих конструкціях, тертя в сполученнях конструкцій, відкази у роботі конструктивних елементів внаслідок великих деформацій тощо. Зазначені явища істотно впливають на реакцію споруд при динамічних і сейсмічних

навантаженнях. Урахування даних факторів на практиці становить значні труднощі навіть для дуже схематизованих об'єктів. Крім цього, проблема ускладнюється відсутністю точної інформації про сейсмічні впливи, які за своїм характером представляють складні випадкові процеси [38].

Наявність в конструкціях сил опору тертя визначає коло завдань з дослідження дисипації енергії при коливаннях. Будівельні конструкції, особливо залізобетонні та полімербетонні, характеризуються відносно великим внутрішнім опором тертя, що є основним фактором швидкого загасання вільних коливань конструкцій, значного зниження амплітуд коливань при сейсмічних та інших видах динамічних впливів [8, 28].

## **1.2. Застосування полімербетонів для виготовлення конструктивних елементів з покращеними фізико-механічними характеристиками**

Динамічна реакція будівель на дію сейсмічних навантажень суттєво залежить від механічних властивостей матеріалу каркасу. Розвиток будівельних технологій дозволяє вдосконалити будівельні матеріали. Шляхом додавання спеціальних добавок до традиційного бетонного розчину досягається підвищення експлуатаційних характеристик і декоративних властивостей бетонних виробів, що дозволяє розширити сфери їх застосування в будівництві.

Бетон, виготовлений з портландцементу, використовується у всьому світі як будівельний матеріал більше 200 років. Незважаючи на широке поширення, цементні бетони мають суттєві недоліки, такі як низька міцність при згині, повільна швидкість затвердіння, утворення тріщин при висиханні, низька хімічна стійкість. Одним із напрямків подолання недоліків цементних бетонів є розробка бетонів, модифікованих полімерами [22–24, 30]. Дослідження можливостей підвищення міцності, хімічної стійкості і довговічності бетону та залізобетону привели до створення великої групи бетонів на основі полімерів, які отримали загальну назву полімербетони [45].

Полімербетони – сучасні композиційні матеріали, одержані в результаті змішування і подальшого затвердіння суміші з полімерного в'язучого і мінеральних заповнювачів. Ці матеріали характеризуються значно меншими витратами полімерних компонентів у порівнянні з іншими композиційними матеріалами. Так, вартість виробів із полімербетонів суттєво нижча вартості виробів із пластмас. Полімербетони можуть бути виготовлені практично на будь-якому синтетичному в'язучому та з використанням будь-яких мінеральних заповнювачів, включаючи відходи промисловості. Останнє також дозволяє вирішувати проблему утилізації промислових відходів і, таким чином, сприяє охороні навколишнього середовища [65]. Критерієм вибору того чи іншого компоненту є вартість, а також вимоги, що висуваються до полімербетону по деформаційній міцності, густині, хімічній стійкості та ряду інших характеристик.

У практичному виробництві полімербетонів застосовується порівняно невеликий набір полімерних в'язучих. Однак, якщо врахувати різні комбінації між мономерами і олигомерами та можливість модифікації в'язучих полімерних добавок, кількість композицій, що використовуються у сучасному виробництві, зростає до кількох десятків. Найбільше поширення в якості в'язучих одержали фуранові, фураново-епоксидні, поліефірні, епоксидні, фенолформальдегідні, ацетонформальдегідні, карбамідні, акрилові смоли, мономери вінілового ряду. Заповнювачами служать пісок, щебінь, андезит, маршалит, аглопорит тощо [8, 19, 45, 62, 66].

При вивченні поведінки та властивостей полімербетонів під дією низьких температур необхідно зазначити, що введення в склад матеріалу пластифікаторів на основі торфу значно підвищує його спроможність витримувати сезонні перепади температур і забезпечує бетону марку по морозостійкості від F400 до F500 [66].

В залежності від складу, полімербетони характеризуються широким діапазоном показників густини та хімічної стійкості. Великий вибір в'язучих і заповнювачів, а також можливість армування, дозволяють виготовляти

конструкційні матеріали з різними фізичними, механічними та хімічними характеристиками для застосування в різних галузях промисловості, будівництва, сільського господарства [3, 4, 64, 67].

За результатами досліджень були виявлені зміни міцнісних та деформаційних характеристик полімербетонів внаслідок одночасної дії агресивних середовищ, температурних перепадів та довготривалих механічних напружень. Бетони на полімерних в'язучих через взаємодію з хімічно активними речовинами можуть погіршувати свої фізико-механічні властивості. Руйнування полімербетонних виробів може відбуватися в результаті подолання сил міжмолекулярної взаємодії під впливом агресивних середовищ або внаслідок дефектів структури матеріалу та концентрації локальних напружень при механічних впливах [5, 64]. Зазначимо, що при цьому хімічна стійкість полімербетонів значно переважає стійкість цементних бетонів.

Композиційні полімерні бетони можуть бути застосовані у проектних рішеннях, коли традиційні цементні бетони не дозволяють досягнути необхідних експлуатаційних характеристик. Полімербетони можуть ефективно використовуватись у сучасному будівництві при виготовленні монолітних елементів конструкцій, таких як стінові панелі, плити, колони каркасних будівель. Також ці матеріали широко застосовуються для виробництва елементів декору, виготовлення підлог, оздоблення сходів тощо.

Завдяки високій міцності полімербетони можуть використовуватись без будь-якої арматури. Проте, є області застосування, що передбачають армування полімербетонів для забезпечення підвищеного запасу міцності та/або підвищеної надійності під час експлуатації [57].

Полімерні бетони можуть використовуватись як для нового будівництва, так і для ремонту старих пошкоджених конструкцій. Високі адгезійні властивості полімерних розчинів дозволяють легко відновлювати як полімерні, так і звичайні бетони на цементній основі. Низька водопроникність і висока корозійна стійкість полімербетонів дозволяють використовувати їх у плавальних басейнах, системах каналізації, дренажних каналах, електролізерах

для вилучення металу та в інших конструкціях, що піддаються дії хімічно активних речовин та корозійних впливів. На відміну від традиційних цементних бетонів, полімербетони не потребують покриття або гідроізоляції захищених швів [45].

Полімербетон часто називають «штучним каменем» через його міцність і зовнішню схожість на природні мінерали. Полімербетони широко застосовують як конструкційні хімічно- і зносостійкі, електроізолюючі матеріали, зокрема для герметизації резервуарів, шпаклівки, ґрунтовки, при виготовленні наливних підлог, для вирівнювання нерівностей і дефектів у металевих виробках. Висока хімічна стійкість, міцність, зносостійкість і водонепроникність обумовлюють широке використання полімербетонів при виробництві різноманітних будівельних конструкцій [45, 62].

### **1.3. Методи розв'язання нелінійних задач оптимального проектування**

При проектуванні систем сейсмічного захисту будівель із демпферами сухого тертя 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 сучасної теорії оптимізації внесли Беллман Р. [63], Чичинадзе В. К. [60], Зеленцов Д. Г. [21], Мордекай А. [71], Русинський А. [76], Русіна А. Г. [48], Рутман Ю. Л. [49] та інші вчені, чії роботи не тільки розширили області застосування методів математичного програмування, але й сприяли створенню нових наукових напрямків.

До нелінійного програмування [71] відносяться методи дослідження екстремумів функцій у випадку, коли сама функція чи задані умови обмежень є нелінійними. На практиці методи нелінійного програмування використовують, якщо жоден з методів інших розділів математичного програмування не дозволяє скільки-небудь просунути у розв'язанні оптимізаційної задачі [48].

Для розв'язання задач одновимірної оптимізації можуть застосовуватися методи сканування, ділення навпіл, золотого перетину, чисел Фібоначчі, метод поліноміальної апроксимації Пауелла тощо [60]. При використанні цих методів, як правило, задають інтервал зміни аргументу цільової функції (область пошуку) і необхідну точність визначення оптимального значення цього аргументу. Зазначені підходи мають як самостійне значення, так і часто використовуються в якості допоміжних процедур у багатовимірних задачах оптимізації (наприклад, під час спуску за координатами). Більшість із цих методів (за винятком методу сканування) застосовуються для унімодальних функцій.

Серед методів безумовної багатовимірної оптимізації виділяють методи нульового, першого і другого порядків. У методах нульового порядку на кожному кроці при пошуку екстремуму цільової функції використовується інформація про значення цієї функції на попередніх кроках. У методах першого порядку, крім цього, використовується інформація про перші похідні, а у методах другого порядку – також і про другі похідні цільової функції. До методів нульового порядку відносяться, наприклад, методи сканування та покоординатного спуску. Методи першого порядку: метод найшвидшого спуску (метод градієнту), метод спряжених градієнтів. До методів другого порядку належить метод Ньютона та його модифікації. Також можуть застосовуватись методи стохастичного пошуку безумовного екстремуму цільової функції. Для розв'язання задач умовної оптимізації з обмеженнями, заданими системами нерівностей або рівнянь, використовують методи прямого пошуку з поверненням, проектування вектору градієнта, метод штрафних функцій тощо [49, 60, 76].

Особливу роль нелінійне програмування відіграє на окремих етапах розв'язання задач оптимізації іншими методами, наприклад за допомогою динамічного програмування, принципу максимуму тощо.

Іноді класичні методи оптимізації не можуть бути використані через неможливість сформулювати точний алгоритм, недостовірність або неточність початкових даних, а також по ряду інших причин. У подібних випадках застосовують евристичні методи. Такі методи можуть не бути обґрунтовані строго математично і не є гарантовано точними чи найкращими, але при цьому дають можливість знаходити наближені розв'язки задач оптимізації із достатньою точністю у більшості практичних випадків. Як свідчить досвід, евристичні методи показують високу ефективність при пошуку екстремумів як унімодальних, так і мультимодальних функцій. Незалежно від складності рельєфу досліджуваної функції, результатом роботи евристичних алгоритмів може бути ефективне рішення поставленого завдання [25, 39, 50, 51, 58, 84].

Широке поширення одержали генетичні алгоритми, які належать до класу еволюційних методів і моделюють процеси еволюції біологічних систем та природного відбору.

Розвиток природних систем протягом багатьох століть привертав увагу вчених. Неодноразово відбувалися спроби виділити і осмислити основні принципи і механізми, що лежать в основі змін, які відбуваються в живій природі. Пропонувалося багато різних концепцій, поки у 1858 році Ч. Дарвін не опублікував свою відому роботу «Походження видів», у якій було проголошено базові механізми еволюції: спадковість, мутації, природній відбір і схрещення. Знання еволюційних принципів і генетичних основ спадковості дозволило розробити як моделі молекулярної еволюції, що описують динаміку зміни молекулярних послідовностей у біології, так і макроеволюційні моделі, що використовуються в екології, історії та соціології для дослідження екосистем, біологічних популяцій організмів і навіть людських спільнот.

Еволюційні принципи застосовуються не тільки для моделювання, але і для розв'язання прикладних завдань оптимізації. Розроблено багато алгоритмів



і методів, які використовують для пошуку розв'язку еволюційний підхід. Виділяють наступні типи еволюційних методів: генетичні алгоритми, еволюційні стратегії, еволюційне програмування, генетичне програмування, нейроеволюція.

Для розв'язання задач оптимізації та нелінійного програмування частіше за все використовуються генетичні алгоритми [12, 21, 25, 39, 41, 50, 56, 84]. Коло завдань, які можуть бути вирішені за допомогою генетичних алгоритмів, дуже широке. Сюди належать задачі чисельної оптимізації; задачі логістики та знаходження найкоротшого шляху; задачі оптимального компонування; складання розкладів та графіків робіт; апроксимація функцій; відбір і фільтрація даних; настройка і навчання штучних нейронних мереж; моделювання штучного життя; розробка ігрових стратегій.

Генетичний алгоритм описує еволюцію популяції, що складається з окремих організмів (клітин). Кожна клітина відповідає одному із розв'язків задачі і характеризується набором хромосом, які містять інформацію про аргументи цільової функції. Початкова популяція створюється, як правило, випадковим чином. Основним недоліком випадкового пошуку є високі обчислювальні витрати. Для того, щоб зменшити кількість обчислень цільової функції і загальний час розв'язання задачі, у генетичному алгоритмі використовуються математичні процедури, які імітують механізми біологічної еволюції. В процесі еволюції виживають найбільш пристосовані клітини, при цьому ступінь «пристосованості» визначається відповідним значенням цільової функції. Це призводить до того, що у кожному поколінні пристосованість всієї популяції зростає і значення цільової функції прямує до глобального екстремуму [12, 39]. Відзначимо, що генетичні алгоритми не потребують обчислення градієнтів цільової функції.

Вперше подібний алгоритм був запропонований у 1975 році Дж. Холландом у Мічиганському університеті [69]. Він отримав назву “репродуктивний план Холланда” і згодом був покладений в основу більшості сучасних варіантів генетичних алгоритмів. Процес роботи генетичного

алгоритму включає наступні етапи: ініціалізація початкової популяції; обчислення ступеню пристосованості кожної клітини; визначення батьківських клітин; схрещення та мутація; відбір клітин, що виживають і створюють нову популяцію. Далі процес повторюється ітераційно, поки не буде досягнуто заданого критерію завершення пошуку.

Вибір способу кодування хромосом є важливим моментом при розробці генетичного алгоритму. Обраний спосіб повинен надати можливість зберігати у хромосомі інформацію про будь-яку точку простору пошуку. Невиконання цієї умови може призвести як до збільшення часу еволюційного пошуку, так і до неможливості знайти розв'язок поставленої задачі взагалі.

Може використовуватись кодування цілими або дійсними числами. У канонічному варіанті генетичного алгоритму хромосома являє собою бітовий рядок, у якому закодовані значення аргументів цільової функції. Незважаючи на те, що кожен параметр закодований цілим числом, йому можуть бути поставлені у відповідність дійсні числа. При цьому операції кодування і декодування виконуються за допомогою відповідних функцій перетворення.

У деяких інших випадках зручніше представити хромосому у вигляді набору дійсних чисел. Це дозволяє позбутися операцій кодування і декодування, а також підвищити точність обчисленого розв'язку. Зазначимо, що вибір оптимального способу кодування визначається характером постановки задачі, яка досліджується.

Ступінь пристосованості кожної клітини визначається обчисленням відповідного значення цільової функції.

Для визначення батьківських клітин можуть застосовуватись наступні методи (назви походять від відповідних біологічних термінів):

1. Панміксія. Обидві батьківські клітини обираються випадковим чином.
2. Інбридинг. Перша батьківська клітина визначається випадково, а другою обирається клітина, яка найбільш схожа на першу.
3. Аутбридинг. Перша батьківська клітина визначається випадково, а другою обирається клітина, яка найменше схожа на першу.

Для виконання схрещення розроблено велику кількість різних операторів. Застосування того чи іншого оператора визначається насамперед обраним способом кодування хромосом. Головна вимога до процедури схрещення полягає у тому, щоби народжені в результаті клітини-потомки наслідували генетичну інформацію від обох батьків.

Мутація, так само як і схрещення, може відбуватися різними способами. Мета мутації: випадкова зміна генотипу клітин, що запобігає «зависанню» алгоритму у локальних екстремумах і забезпечує можливість дослідження усього заданого простору розв'язків.

Формування нового покоління відбувається шляхом відбору клітин, що виживають наприкінці ітерації. Відомі різні способи селекції: турнірна селекція, метод рулетки, метод ранжування, сігма-відсічення тощо [25]. Спільним для усіх методів селекції є те, що імовірність виживання клітини залежить від ступеню її пристосованості. Це забезпечує покращення загальної пристосованості нового покоління.

Таким чином, до основних параметрів генетичного алгоритму відносяться: розмір популяції, тривалість еволюції (кількість поколінь), метод визначення батьківських клітин, види операторів схрещення та мутації, імовірність мутацій, метод селекції клітин для нового покоління. Різні комбінації зазначених параметрів дозволяють створювати велику кількість модифікацій генетичного алгоритму. Кожен параметр характеризується певними значеннями вагових коефіцієнтів, змінюючи які можна виконати налаштування генетичного алгоритму для найшвидшого розв'язання заданого типу задач.

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. [25, 26], Частикова В. А. [59], Полі Р. [75], Саймона Д. [50], Янга К. [84]. 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 керування, це призводить до виникнення інтелектуальної групової поведінки. Система в цілому виявляється здатною знаходити кращі розв'язки, ніж це може зробити кожна з осіб окремо. Як і еволюційні алгоритми, дані методи також є наближеними. Їх збіжність не доведена строго математично, але експериментально встановлено, що у більшості практичних випадків вони дають досить хороший результат [25, 40, 51, 75].

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.

У порівнянні з класичними алгоритмами, методи ройового інтелекту особливо ефективні для знаходження екстремумів нелінійних мультимодальних функцій, а також для розв'язання задач великої розмірності. До недоліків слід віднести залежність швидкості збіжності від значень вільних параметрів і вагових коефіцієнтів, оптимальні значення яких можуть бути визначатися індивідуально для різних типів задач [20, 51, 82]

Методи ройового інтелекту можуть ґрунтуватися на різних алгоритмах. Так, метод рою частинок описує поведінку децентралізованої зграї птахів, колонії комах або бджолоїної колонії, які шукають місце з найбільшою концентрацією корму. Зграя птахів є типовим прикладом колективної поведінки тварин. Літаючи великими групами, вони майже ніколи не стикаються в повітрі. Зграя рухається плавно і скоординовано, немов їй хтось керує. А кожен, хто вішав в своєму дворі годівницю, знає, що через кілька годин її знайдуть усі птиці в окрузі. Справа тут аж ніяк не в ватажку, що віддає

накази – у багатьох видів птахів його взагалі немає. Так само, як і в колоніях мурашок та бджіл, поведінка зграї демонструє ефект виникнення ройового інтелекту. Птахи діють згідно з визначеними і відносно простими правилами. Кружляючи в небі, кожен з птахів стежить за своїми родичами і координує свій рух згідно їхнього положення. А знайшовши джерело корму, він сповістить про це інших членів зграї.

На останньому факті варто зупинитися докладніше, оскільки він відіграє одну з ключових ролей у даному методі оптимізації. Причини такого «альтруїзму» птахів (як і інших тварин, що діють подібним чином) були предметом численних досліджень соціобіологів. Одним із пояснень даного феномена є те, що переваги від такої соціальної співпраці для кожної особи виявляються більшими, ніж пов'язані з цим недоліки (необхідність боротьби за знайдену їжу з іншими особами).

Джерела корму, як правило, розташовані випадковим чином, тому наодинці птах може загинути, не знайшовши корму протягом тривалого часу. Однак якщо всі птахи будуть «грати за правилами», обмінюючись між собою інформацією про знахідки, то шанси кожного з них на виживання різко підвищуються. Таким чином, будучи неефективною для окремої особи, така стратегія є запорукою ефективності виживання зграї в цілому.

Метод штучної бджолоїної колонії також може застосовуватися для розв'язання задач оптимізації [2, 33]. Для збору нектару залучаються два види бджіл: бджоли-розвідники і бджоли-робітники. Перші проводять наближені дослідження території навколо вулика на предмет наявності нектару. Після повернення у вулик, бджоли-розвідники повідомляють інформацію про кількість нектару, напрямки його розташування і відстань до нього. Далі у найбільш придатні області пошуку вилітають бджоли-робітники, причому чим більше нектару в даній області, тим більше бджіл вилітає до неї. Крім збору нектару, в їх завдання входить уточнення інформації про дану та прилеглі до неї області.

Метод світлячків [25, 26, 59] – ще один поширений метод ройового інтелекту, що може застосовуватись для пошуку глобальних екстремумів нелінійних функцій. В основі математичного алгоритму лежать спостереження за поведінкою даного типу комах у природі. Вони випромінюють світло, яке є механізмом комунікації між особами: за його допомогою вони залучають осіб протилежної статі, повідомляють про наближення хижаків тощо. При розв'язанні задачі оптимізації, менш яскраві комахи рухаються у просторі розв'язків назустріч більш яскравим, при цьому «яскравість» особи визначається значенням цільової функції у даній точці. Якщо світлячок не бачить більш яскравого представника рою, він переміщається хаотично, поступово уповільнюючись. Дотримуючись цих правил, поступово весь рой збирається у точці екстремуму цільової функції.

Мурашиний алгоритм наслідує поведінку колонії мурах і може застосовуватись для ефективного розв'язання логістичних задач (наприклад, задачі комівояжера) та для пошуку маршрутів в графах [25, 54]. У цьому алгоритмі мурашина колонія розглядається як мультиагентна система, в якій всі агенти діють самостійно по дуже простим алгоритмам, але вся система в цілому демонструє інтелектуальну групову поведінку. Агенти можуть взаємодіяти як з допомогою прямого обміну інформацією (хімічний, візуальний контакт), так і за допомогою непрямого обміну. Він полягає у тому, що кожен агент може відмічати свій маршрут за допомогою певної речовини (феромона), після чого інші агенти можуть використовувати цю інформацію для визначення власного маршруту. В результаті концентрація феромонів на маршруті визначає пріоритет його вибору. Крім того, з часом феромон може випаровуватися, що забезпечує динамічність роботи алгоритму.

Імунні мережі [25] моделюють роботу клітин імунної системи. Так само, як і штучні нейронні мережі, імунні мережі здатні до навчання, не потребують заздалегідь відомої моделі задачі, а будують її самі на основі отриманої інформації. Такі методи ефективні для розв'язання задач прогнозування, класифікації (розпізнавання) та управління.

Нарешті зазначимо, що розглянуті вище генетичні алгоритми також можуть бути віднесені до класу ройових методів, оскільки в їх основу покладено еволюційне моделювання популяцій, які складаються з окремих організмів.

#### **1.4. Висновки по розділу 1**

1. Великі землетруси, які пройшли за останні десять років на території багатьох країн, внесли суттєві корективи в оцінку очікуваної величини сейсмічної інтенсивності. В результаті були істотно переглянуті карти сейсмічного районування, розрахункова сейсмічність багатьох регіонів збільшилася на 1, 2 і навіть на 3 бали. Тому важливою проблемою сучасного будівництва є підвищення сейсмостійкості будівель та споруд. При цьому також важливо проводити конструктивну модернізацію будівель, що експлуатуються, з метою забезпечення їх відповідності сучасним нормам сейсмостійкості та запобіганню можливим руйнівним наслідкам внаслідок землетрусу.

2. Згідно принципів сталого розвитку та циркулярної економіки, актуальним завданням є розробка і впровадження легковагових економічних будівель, які характеризуються низькою матеріаломісткістю та низьким споживанням ресурсів на всіх етапах свого життєвого циклу. Стійкість таких споруд забезпечується за допомогою спеціальних систем сейсмічного захисту: сейсмоізолюючих опор, інерційних гасників коливань, а також демпферів різних типів.

3. Останніми роками широке поширення одержали демпфери сухого тертя. Їх перевагами є простота і надійність конструкції, низька вартість, відсутність потреби у обслуговуванні, багаторазовість використання, а також високі дисипативні властивості, що забезпечують ефективний захист споруд від сейсмічних та динамічних навантажень. Необхідно відмітити, що простий і швидкий монтаж робить демпфери сухого тертя особливо зручними для

модернізації та підвищення сейсмічної стійкості вже існуючих будівель. Демпфери сухого тертя можуть бути адаптовані практично до будь-якого будинку.

4. При дослідженні динамічних характеристик будівель необхідно враховувати фізико-механічні властивості матеріалів, з яких виготовлені конструктивні елементи споруди. Останніми роками розробляються нові типи матеріалів із поліпшеними характеристиками. Одними з таких матеріалів є полімербетони. Наведено огляд літератури щодо складу полімербетонів, принципів їх виготовлення, основних властивостей та можливостей використання в будівництві. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що застосування полімербетонів для конструктивних елементів будівель дозволяє підвищити міцність споруд, покращити їх стійкість до дії агресивних середовищ та морозостійкість. Полімербетонні конструкції також характеризуються високою зносостійкістю та водонепроникністю, що загалом сприяє підвищенню їхнього строку експлуатації у порівнянні з конструкціями, виготовленими з традиційних цементних бетонів.

5. При розробці систем сейсмічного захисту на основі демпферів сухого тертя, складною задачею є визначення раціональних місць розташування демпферів всередині будівлі. Її розв'язання потребує комплексного аналізу динамічних властивостей споруди і, як правило, не може бути знайдено в рамках стандартних методів проектування. З математичної точки зору, це задача нелінійної неопуклої оптимізації, для розв'язання якої можуть застосовуватися різні підходи.

6. Аналіз сучасних методів нелінійної оптимізації показав, що методи штучного ройового інтелекту, які інтенсивно розвиваються останніми роками, 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.



7. На основі висновків, наведених вище, сформульовано мету дисертаційної роботи: визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя у багатоповерхових каркасних будівлях за допомогою методів ройового інтелекту, динамічне моделювання будівель із демпферами сухого тертя та дослідження їх коливань під дією періодичних і сейсмічних навантажень, дослідження динамічних характеристик будівель, виготовлених із різних матеріалів каркасу (залізобетону та полімербетону). Відповідно до поставленої мети, сформульовано завдання досліджень, які наведено у вступі.

### **1.5. Список використаних джерел у розділі 1**

У розділі 1 використано джерела [1–6, 8–12, 16–28, 30, 32–36, 39–45, 48–52, 54–62, 64–67, 69, 71–76, 80, 82, 84]. Їх найменування наведені у загальному списку використаних джерел.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

### 2.1. Алгоритм методу рою частинок

Метод рою частинок був запропонований Р. Еберхарт, Ю. Ші, Дж. Кеннеді [68] і спочатку розглядався як засіб моделювання соціальної поведінки людських спільнот. У монографії [68] наведено розгорнуте дослідження філософських аспектів феномену ройового інтелекту та, зокрема, методу рою частинок. У подальшому метод був спрощений та адаптований для розв'язання математичних задач оптимізації. Огляд практичних застосувань даного методу у різних галузях сучасної науки і техніки наведено у статті Р. Полі [75].

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

$$x_d^{\min} \leq x_d^{(i)} \leq x_d^{\max}, \quad d = 1, 2, 3, \dots, D. \quad (2.1)$$

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

$$\mathbf{x}_n^{(i+1)} = \mathbf{x}_n^{(i)} + \mathbf{v}_n^{(i)}, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{v}_n^{(i+1)} = w_0 \mathbf{v}_n^{(i)} + w_1 r_1 (\mathbf{p}_n^{(i)} - \mathbf{x}_n^{(i)}) + w_2 r_2 (\mathbf{g}^{(i)} - \mathbf{x}_n^{(i)}), \quad (2.3)$$

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  $0 < r_1, r_2 < 1$ .

У формулі (2.3) перший доданок визначає «інерцію» руху частинки. Наявність інерції запобігає стрибкоподібним змінам траєкторії. Рекомендовані значення коефіцієнта  $w_0$  знаходяться у інтервалі  $0.4 \leq w_0 \leq 0.9$  [25, 82]. Другий доданок формули (2.3) 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  $w_1 = w_2$ ,  $0.5 \leq w_1, w_2 \leq 2$  [25, 82]. 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 (2.2), лежать за межами області пошуку. Можуть застосовуватись моделі границь, що поглинають, відбивають, демпфірують або є прозорими [83]. 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 і порушуються умови обмежень (2.1), 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. Дослідження показали, що у багатьох практичних випадках хороші результати досягаються вже при  $n_{\max} = 10 \dots 30$  [25, 68]. В цілому, оптимальна кількість частинок може підбиратися індивідуально для кожної задачі.

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, яка поширюється на умовах вільної ліцензії GNU GPL. Розроблений програмний код наведено у додатку Б.

## 2.2. Тестова функція Розенброка

Для оцінки обчислювальної ефективності методів оптимізації запропоновано велику кількість тестових функцій (див. наприклад [25], додаток Б). Пошук екстремумів тестових функцій дозволяє імітувати різні ситуації, з якими можуть стикатися методи оптимізації при розв'язанні практичних задач, та дає можливість оцінити їх швидкість збіжності, точність, а також визначити раціональні значення параметрів алгоритмів.

Для практичної верифікації методу рою частинок розглянемо знаходження екстремумів деяких тестових функцій. Нехай розмірність задачі дорівнює двом,  $D = 2$ .

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

$$z = (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2 \quad (2.4)$$

і має глобальний мінімум  $z_{\min} = 0$  у точці  $x_1 = x_2 = 1$ . Графік функції (2.4) зображений на рис. 2.1.

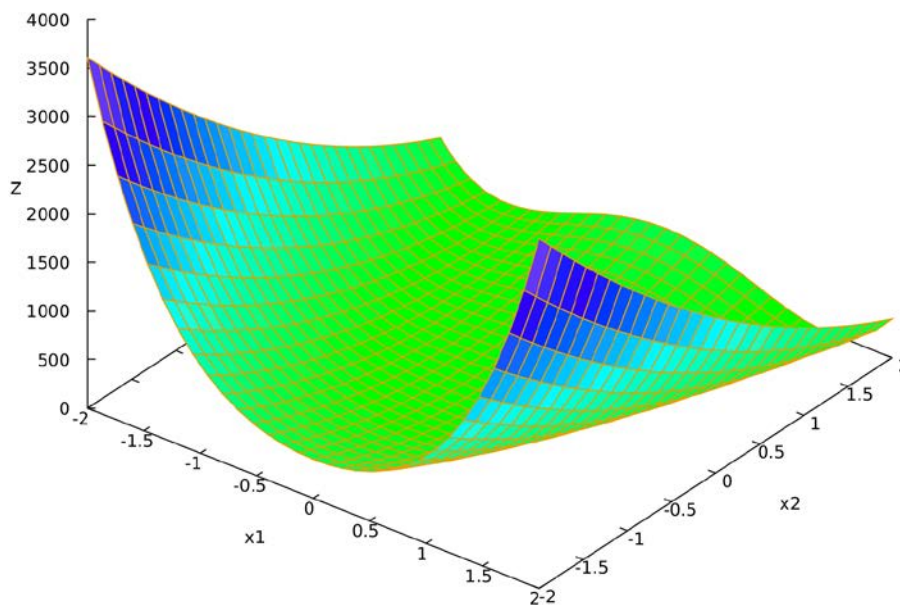


Рисунок 2.1 - Графік функції Розенброка

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.

Задаємо область пошуку співвідношеннями (2.1), де

$$x_1^{\min} = x_2^{\min} = -2, \quad x_1^{\max} = x_2^{\max} = 2. \quad (2.5)$$

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. 2.2, 2.3 наведено усереднені залежності, які ілюструють вплив розрахункових параметрів на швидкість збіжності методу. Обчислювальні експерименти показали, що найкраща швидкість досягається при  $n_{\max} = 16$  та  $w_1 = w_2 = 1$ .

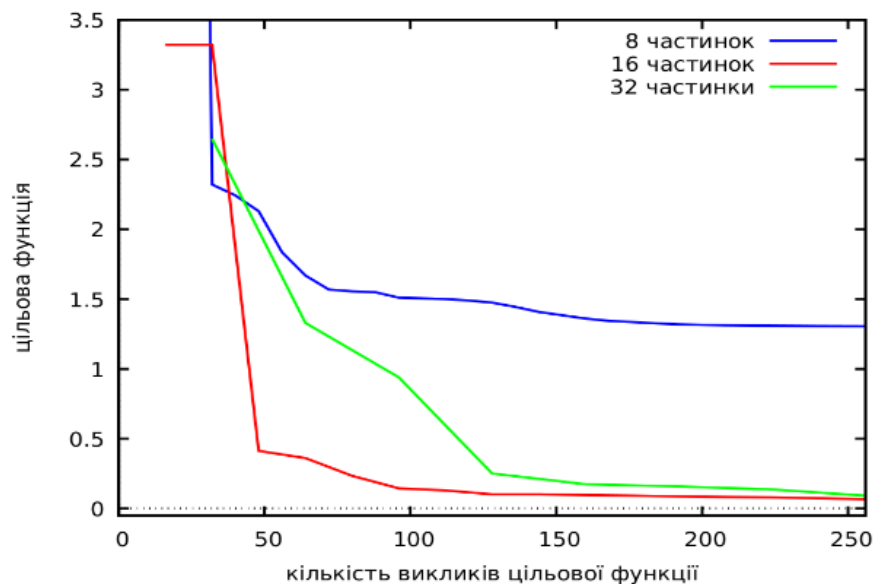


Рисунок 2.2 - Вплив кількості частинок на швидкість збіжності для функції

Розенброка:  $w_0 = 0.5$ ,  $w_1 = w_2 = 1$

Процес роботи методу оптимізації графічно ілюструється на рис. 2.4, де наведено контурний графік функції Розенброка (хрестиком відзначено глобальний мінімум) і показано положення частинок на різних ітераціях. При розрахунках прийнято  $n_{\max} = 16$ ,  $w_1 = w_2 = 1$ . Після 16 ітерацій, що відповідає 256 викликам цільової функції, рух частинок практично зупинився. При цьому знайдено наближене значення екстремуму  $z_{\min} \approx 0.0615$ .

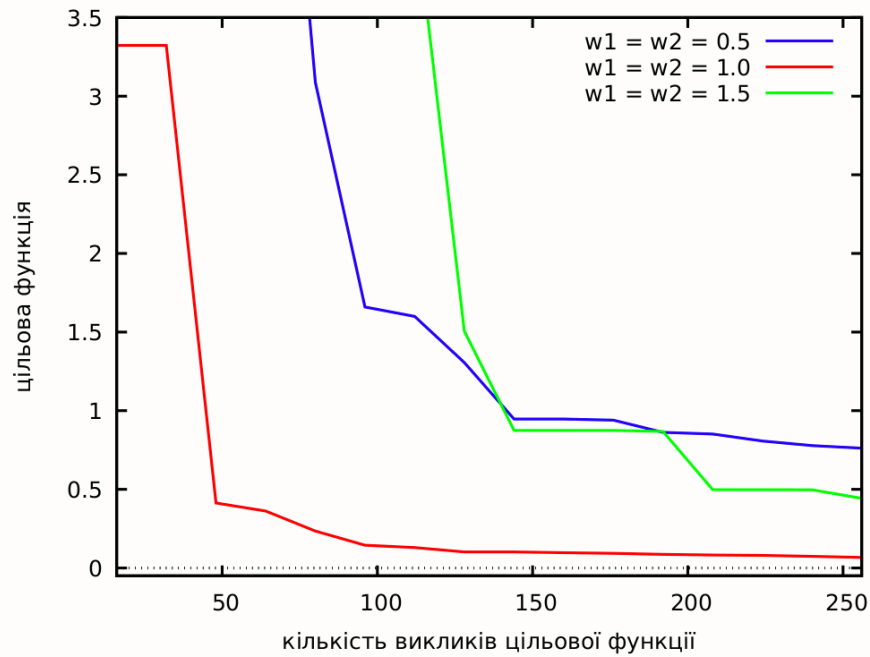


Рисунок 2.3 - Вплив значень вагових коефіцієнтів на швидкість збіжності для функції Розенброка:  $n_{\max} = 16$ ,  $w_0 = 0.5$

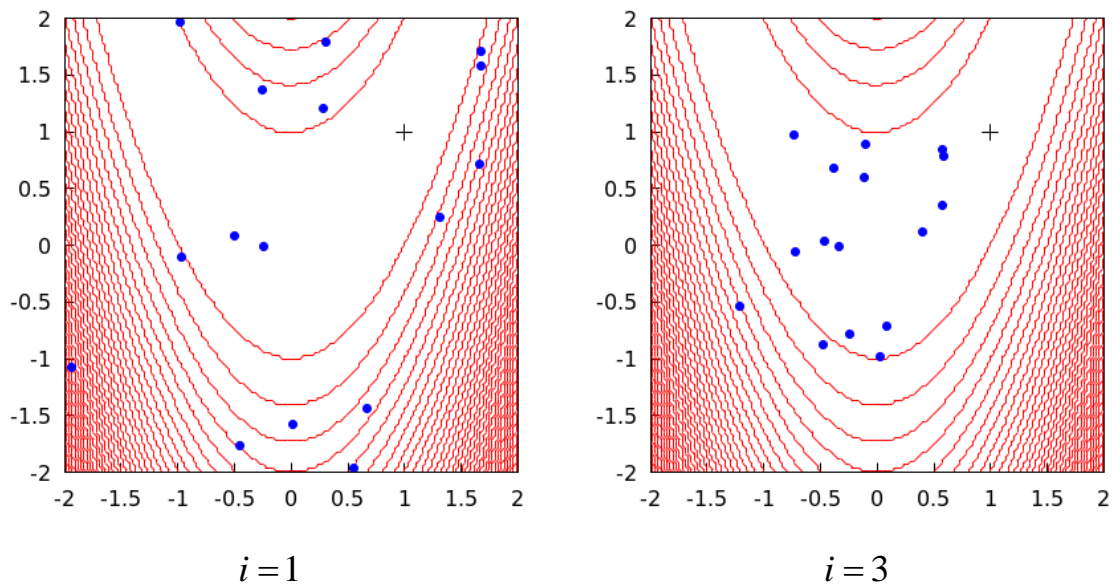


Рисунок 2.4 - Положення частинок у просторі розв'язків на різних ітераціях для функції Розенброка

Аналіз переміщень частинок у просторі розв'язків дозволяє зробити наступні висновки. Після перших чотирьох ітерацій ройовим інтелектом визначено наявність «долини» у ландшафті функції, що досліджується. Далі популяція повільно рухається вздовж долини у пошуку точки екстремуму.

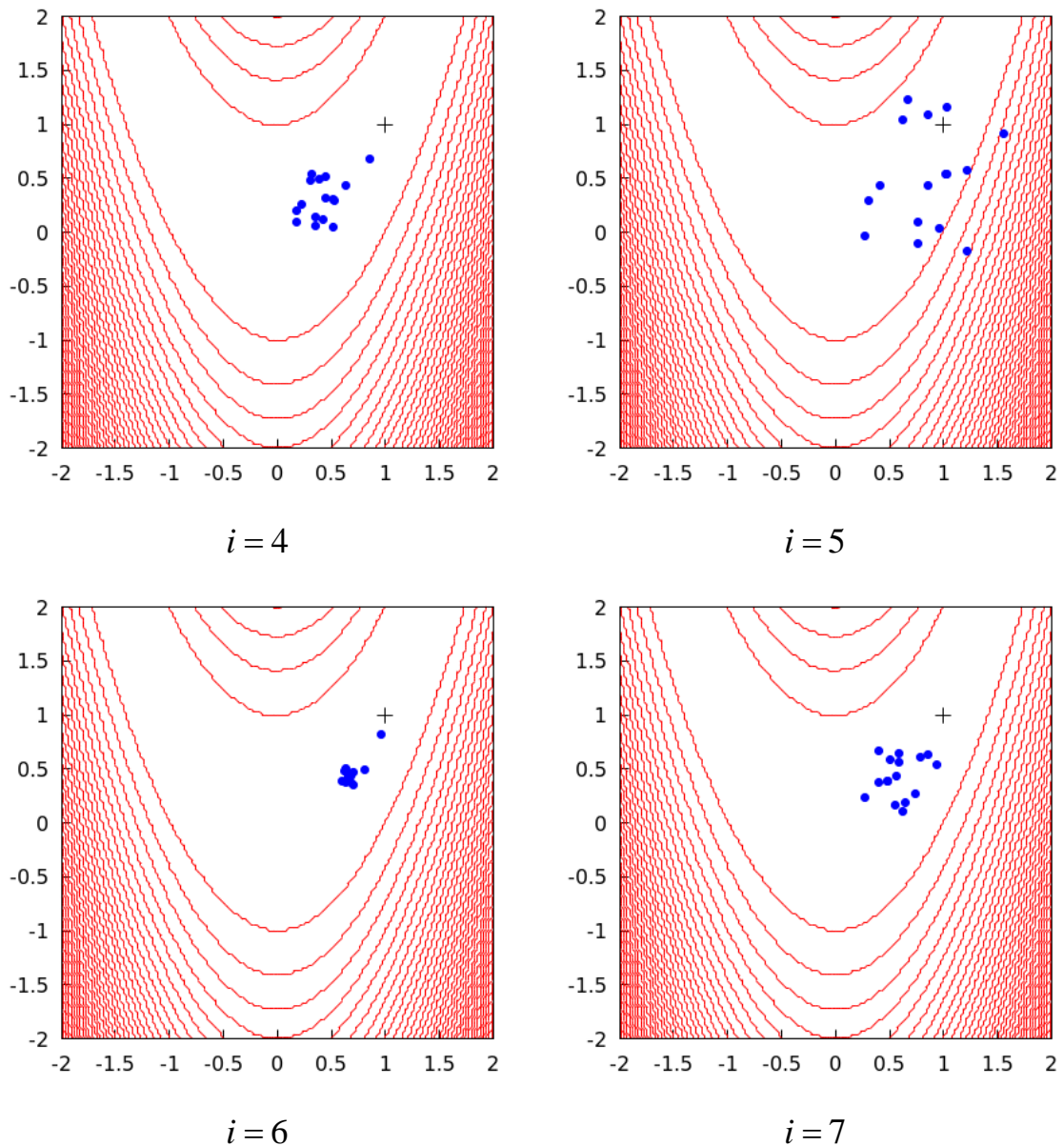


Рисунок 2.4 - Положення частинок у просторі розв'язків на різних ітераціях для функції Розенброка (продовження)

Локальні флуктуації частинок, що спостерігаються на 5-ій, 7-ій і частково на 9-ій ітераціях, спричинені наявністю випадкових величин у формулі (2.3) і забезпечують більш повне дослідження простору розв'язків. Наприкінці пошуку усі частинки наближаються до точки екстремуму цільової функції, при цьому їх швидкості поступово уповільнюються.

Зазначимо, що знаходження екстремумів функцій долинного типу є складною задачею для класичних методів оптимізації. Метод рою частинок дозволяє ефективно її розв'язати.



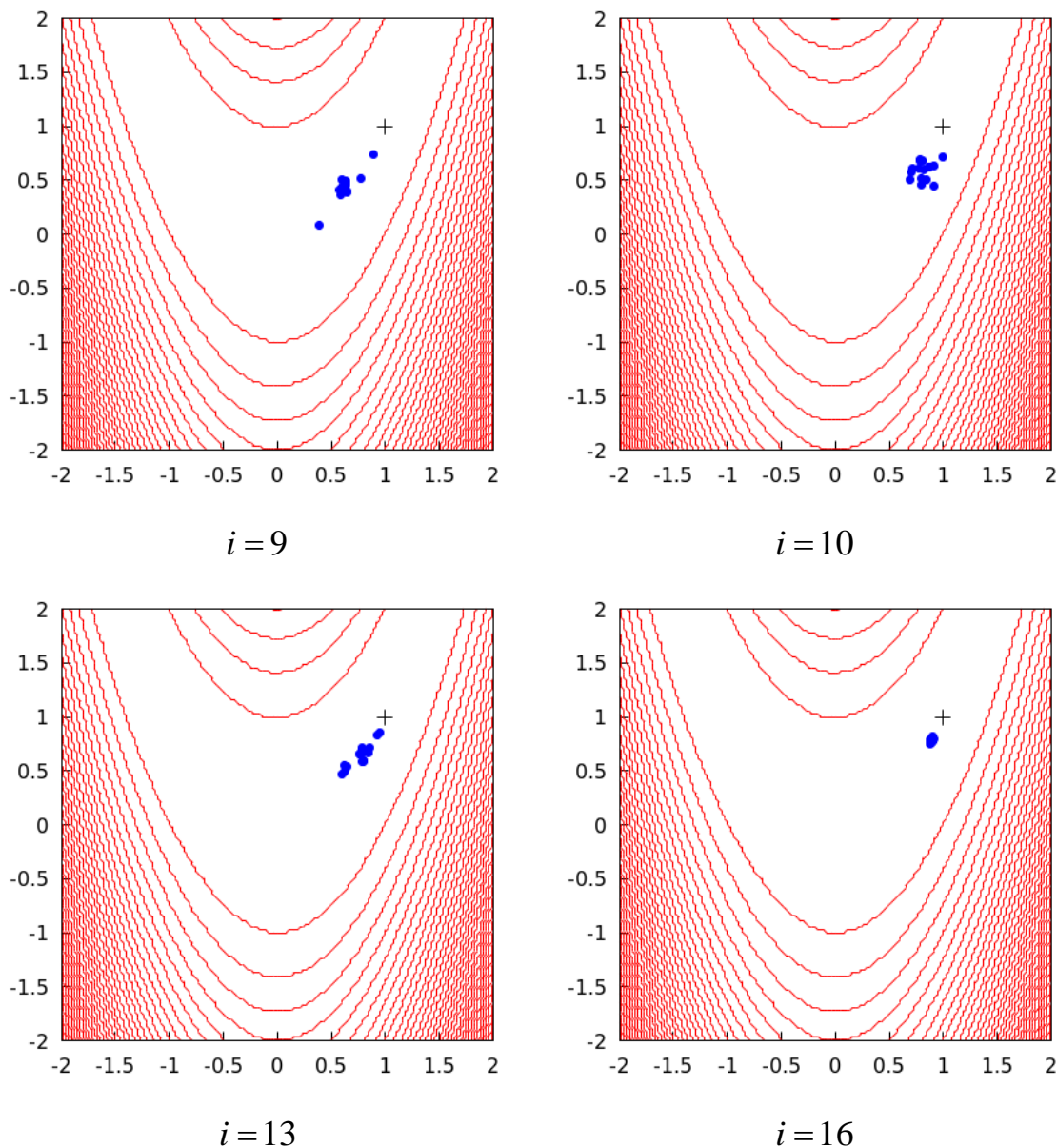


Рисунок 2.4 - Положення частинок у просторі розв'язків на різних ітераціях для функції Розенброка (закінчення)

### 2.3. Тестова функція Растрігіна

Одним із прикладів мультимодальних функцій є функція Растрігіна

$$z = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10[\cos(2\pi x_1) + \cos(2\pi x_2)], \quad (2.6)$$

графік якої наведено на рис. 2.5. Глобальний мінімум  $z_{\min} = 0$  знаходиться у точці  $x_1 = x_2 = 0$ .

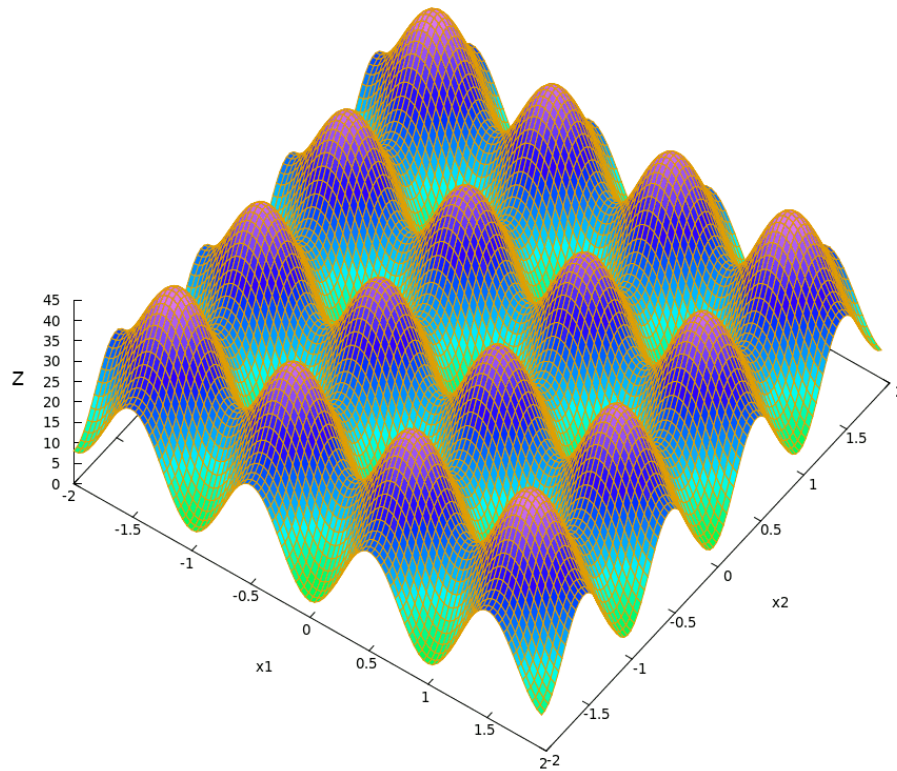


Рисунок 2.5 - Графік функції Растрігіна

Визначення глобального мінімуму цієї функції ускладнено через велику кількість локальних екстремумів, що може викликати «зависання» класичних алгоритмів оптимізації. Застосування методу рою частинок дозволяє ефективно дослідити весь простір розв'язків та знайти глобальний мінімум при відносно невеликій кількості обчислень.

Область пошуку задана співвідношеннями (2.1), (2.5). Рис. 2.6, 2.7 ілюструють залежність швидкості збіжності методу від кількості частинок  $n_{\max}$  та від значень вагових коефіцієнтів  $w_1$ ,  $w_2$ . При розрахунках прийнято  $w_0 = 0.5$ . У даному прикладі найкращий результат одержано при  $n_{\max} = 32$ ,  $w_1 = w_2 = 1$ . Положення частинок на різних ітераціях наведено на рис. 2.8. Після 16 ітерацій (512 викликів цільової функції) переважна більшість частинок майже зупинилася в околиці глобального мінімуму та знайдено наближене значення екстремуму  $z_{\min} \approx 0.4975$ .

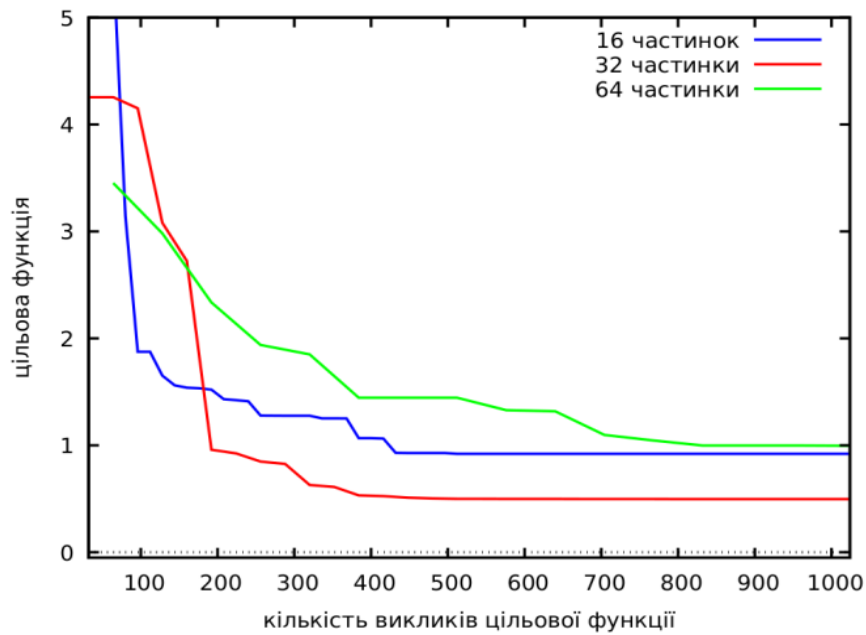


Рисунок 2.6 - Вплив кількості частинок на швидкість збіжності для функції

Растрігіна:  $w_0 = 0.5$ ,  $w_1 = w_2 = 1$

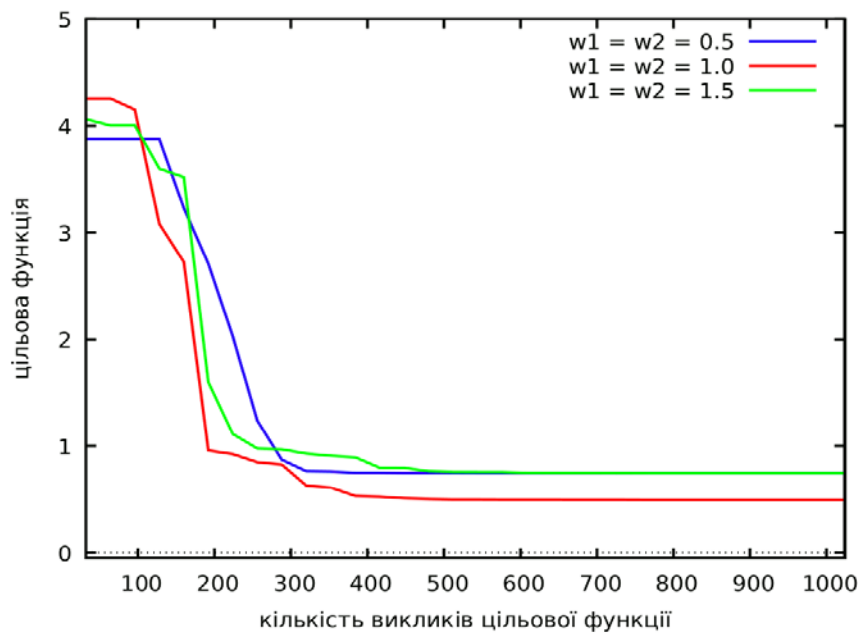


Рисунок 2.7 - Вплив значень вагомих коефіцієнтів на швидкість збіжності для

функції Растрігіна:  $n_{\max} = 32$ ,  $w_0 = 0.5$

У даному прикладі роботу методу рою частинок можна описати наступним чином. Вже на 3-ій ітерації визначено наближене положення глобального мінімуму. Після цього частинки продовжують дослідження заданого простору розв'язків і знаходять декілька локальних екстремумів.

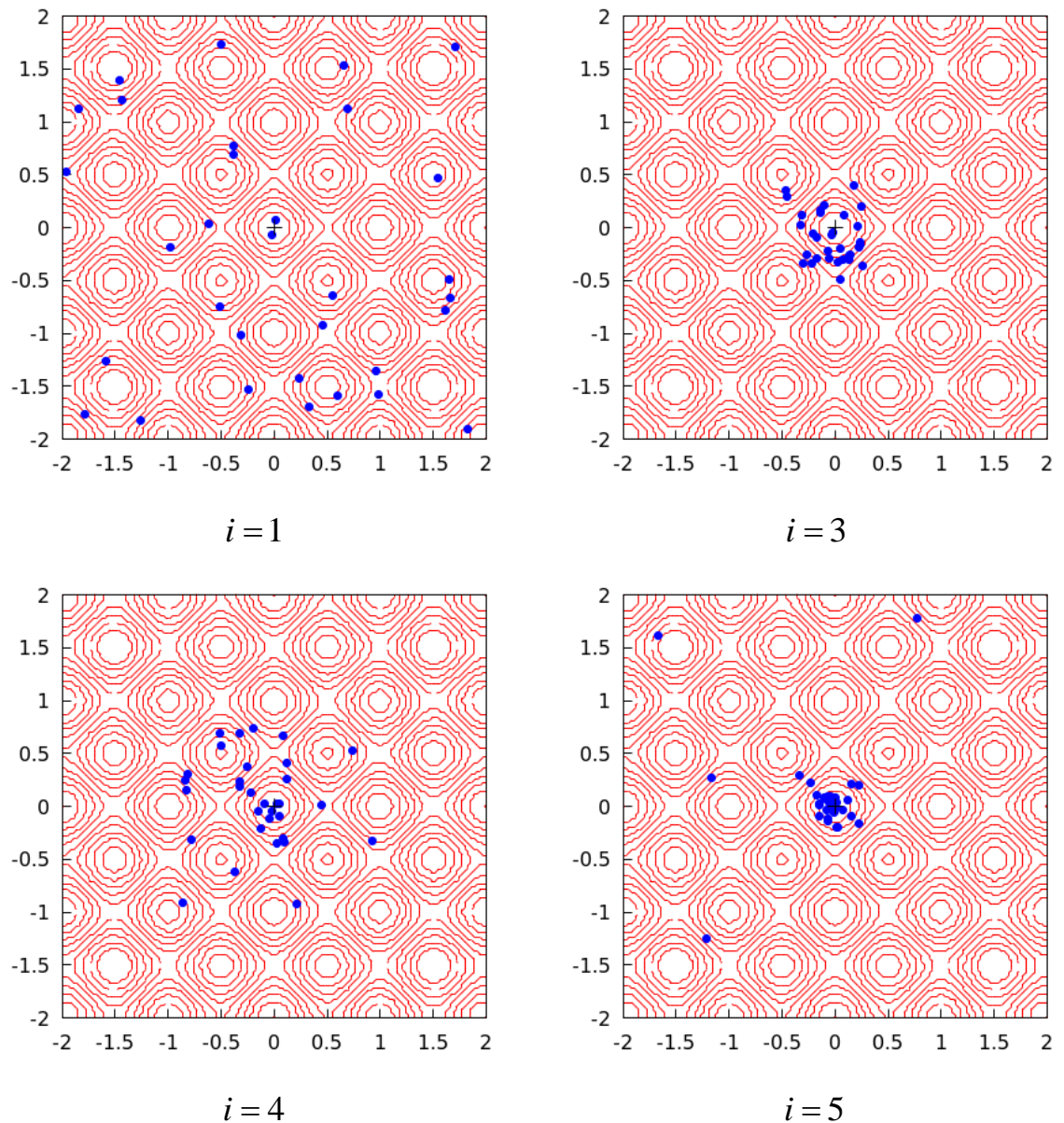


Рисунок 2.8 - Положення частинок у просторі розв'язків на різних ітераціях для функції Растрігіна

Збалансоване поєднання «інерційної», «когнітивної» та «соціальної» складових поведінки частинок, задане математичною моделлю (2.2), (2.3), дозволяє ройовому інтелекту уникнути «зависання» у локальних мінімумах та наприкінці пошуку однозначно визначити розташування глобального екстремуму цільовою функції. При цьому уповільнення руху переважаючої частини популяції в околиці знайденого розв'язку дає можливість визначити оптимальний момент зупинки процесу пошуку.

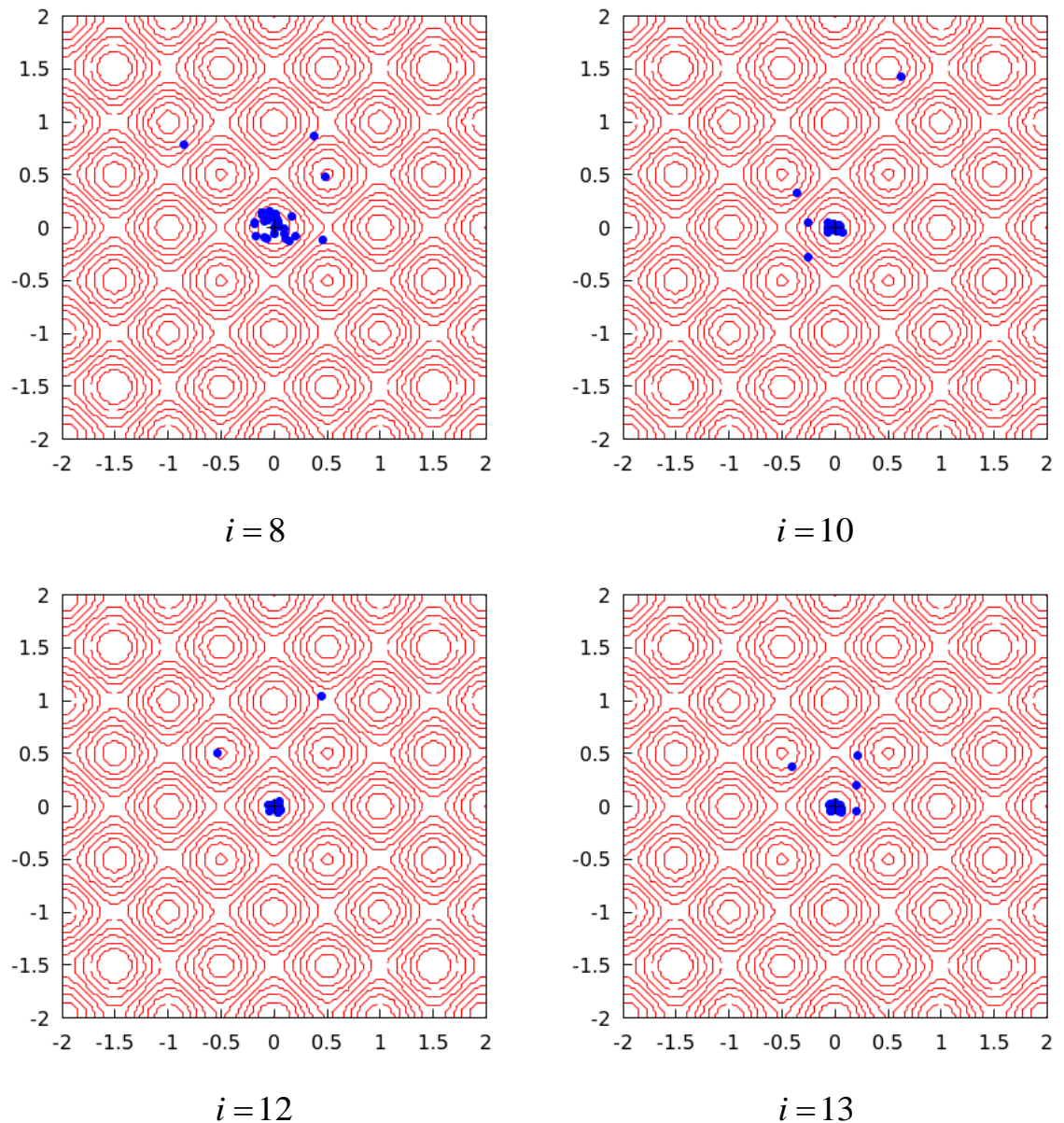


Рисунок 2.8 - Положення частинок у просторі розв'язків на різних ітераціях для функції Растрігіна (продовження)

#### 2.4. Порівняльний аналіз методу рою частинок та генетичного алгоритму

Генетичні алгоритми [12, 21, 41, 50] розв'язання задач оптимізації ґрунтуються на основних принципах біологічної теорії еволюції: схрещенні індивідуумів (клітин), розмноженні, мутації та природньому відборі. Кожна клітина відповідає одному із розв'язків задачі, а процес еволюції призводить до

появи нових поколінь, більш «пристосованих» до виживання. При цьому «пристосованість» визначається відповідним значенням цільової функції, яке прямує до екстремуму. Генетичні алгоритми набули широкого поширення після публікації у 1975 році монографії Дж. Холланда [69], яка стала основоположною роботою у даній галузі.

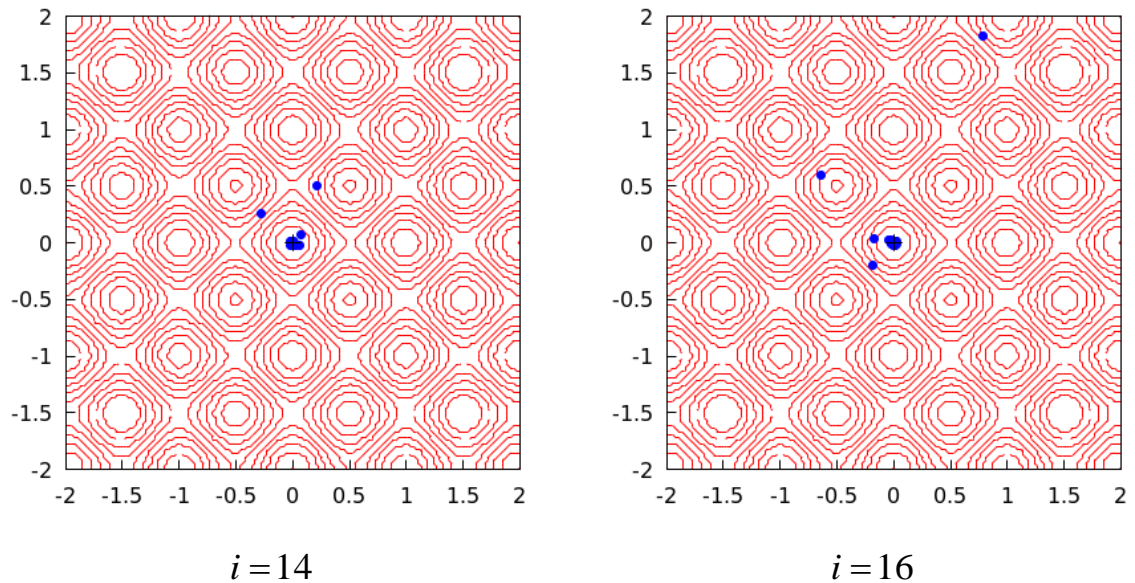


Рисунок 2.8 - Положення частинок у просторі розв'язків на різних ітераціях для функції Растрігіна (закінчення)

Класична схема генетичного алгоритму має наступний вигляд:

1. Створення початкової популяції клітин. Клітини представлені набором хромосом, що є аргументами цільової функції.
2. Селекція батьківських клітин.
3. Схрещення батьківських клітин та народження потомків.
4. Мутація потомків.
5. Відбір клітин, що виживають і створюють нову популяцію.

Кроки 2–5 повторюються ітераційно до досягнення заданого критерію завершення пошуку.

На сьогоднішній день розроблено велику кількість генетичних алгоритмів, які відрізняються різними способами кодування хромосом,

операторами селекції, схрещення, мутації та відбору. Сучасний огляд відомих підходів наведено у монографії А. П. Карпенко [25]. У даній роботі розглянемо одну із класичних схем.

Порівняємо роботу генетичного алгоритму та методу рою частинок при визначенні екстремумів тестових функцій Розенброка та Растрігіна. Оскільки пошук виконується у неперервній області, використовуємо кодування хромосом дійсними числами як таке, що найбільш відповідає постановці задачі. Клітини визначаються наборами хромосом  $\mathbf{x}_n^{(i)} = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \dots, x_D^{(i)}\}$ , де  $x_d^{(i)}$  – аргументи цільової функції;  $n$  – номер клітини,  $n = 1, 2, 3, \dots, n_{\max}$ ;  $d$  – номер хромосоми,  $d = 1, 2, 3, \dots, D$ ;  $D$  – розмірність задачі;  $i$  – номер ітерації,  $i = 0, 1, 2, \dots, i_{\max}$ .

Початкова популяція генерується випадковим чином у області пошуку, заданій умовами (2.1). Батьківські клітини обираються методом панміксії, що передбачає рівноймовірну селекцію пари батьків із усієї популяції. Зазначимо, що при цьому кожна клітина може стати членом декількох пар. Кількість батьківських пар є одним із параметрів методу. Прийmemo, що кількість пар дорівнює половині популяції, при цьому кожна пара батьків народжує двох потомків. Таким чином, кількість новонароджених клітин дорівнює кількості клітин у попередньому поколінні.

Для схрещення застосовуємо арифметичний оператор кросоверу, так що

$$\mathbf{y}_{n_1}^{(i)} = r\mathbf{x}_{n_1}^{(i)} + (1-r)\mathbf{x}_{n_2}^{(i)}, \quad \mathbf{y}_{n_2}^{(i)} = r\mathbf{x}_{n_2}^{(i)} + (1-r)\mathbf{x}_{n_1}^{(i)}, \quad (2.7)$$

де  $\mathbf{y}_{n_1}^{(i)}$ ,  $\mathbf{y}_{n_2}^{(i)}$  – набори хромосом клітин-потомків;  $n_1$ ,  $n_2$  – номери клітин,  $1 \leq n_1, n_2 \leq n_{\max}$ ;  $r$  – випадкове число в інтервалі  $0 < r < 1$ .

Після цього відбувається мутація кожного з потомків шляхом арифметичного зсуву значень хромосом за формулою:

$$y_d^{(i)*} = y_d^{(i)} - \gamma_d (2r_d - 1), \quad (2.8)$$

де  $\gamma_d$  – коефіцієнт мутації;  $r_d$  – випадкові числа,  $0 < r_d < 1$ . При цьому одержуємо  $y_d^{(i)} - \gamma_d < y_d^{(i)*} < y_d^{(i)} + \gamma_d$ . Зазначимо, що генотипи мутованих клітин повинні відповідати умовам обмежень (2.1), що визначають задану область пошуку. Тоді

$$x_d^{\min} \leq y_d^{(i)*} \leq x_d^{\max}, \quad d = 1, 2, 3, \dots, D. \quad (2.9)$$

Якщо умова (2.9) не виконується, одержаний варіант генотипу відкидається і мутація проводиться повторно.

Створення наступного покоління  $\mathbf{x}_n^{(i+1)}$  відбувається шляхом відбору найбільш «пристосованих» індивідумів. Серед множини клітин-батьків  $\mathbf{x}_n^{(i)}$  і множини клітин-мутантів  $\mathbf{y}_n^{(i)*} = \{y_1^{(i)*}, y_2^{(i)*}, y_3^{(i)*}, \dots, y_D^{(i)*}\}$  виживають ті, для яких значення цільової функції найближчі до екстремуму. Кількість клітин  $n_{\max}$  у кожному поколінні залишається постійною.

Розглянемо визначення мінімумів тестових функцій Розенброка та Растрігіна за допомогою описаного генетичного алгоритму. Розроблений програмний код наведено у додатку В. Для порівняння з методом рою частинок, використано такі самі розміри популяцій та кількість ітерацій. На рис. 2.9, 2.10 наведено порівняння швидкості збіжності двох методів. Чисельні дані одержано шляхом арифметичного усереднення результатів десятих розрахунків кожним із методів. При розрахунках прийнято  $\gamma_d = \bar{\gamma} (x_d^{\max} - x_d^{\min})$ , де  $\bar{\gamma}$  – безрозмірний коефіцієнт мутації,  $\bar{\gamma} = 0.1$ . Можна зробити висновок, що обидва методи дозволяють наближено визначити екстремуми цільових функцій при приблизно однаковій витраті обчислювальних ресурсів. Зазначимо, що ефективність генетичного алгоритму може бути підвищена шляхом пошуку оптимальної комбінації операторів селекції, схрещення та мутації.



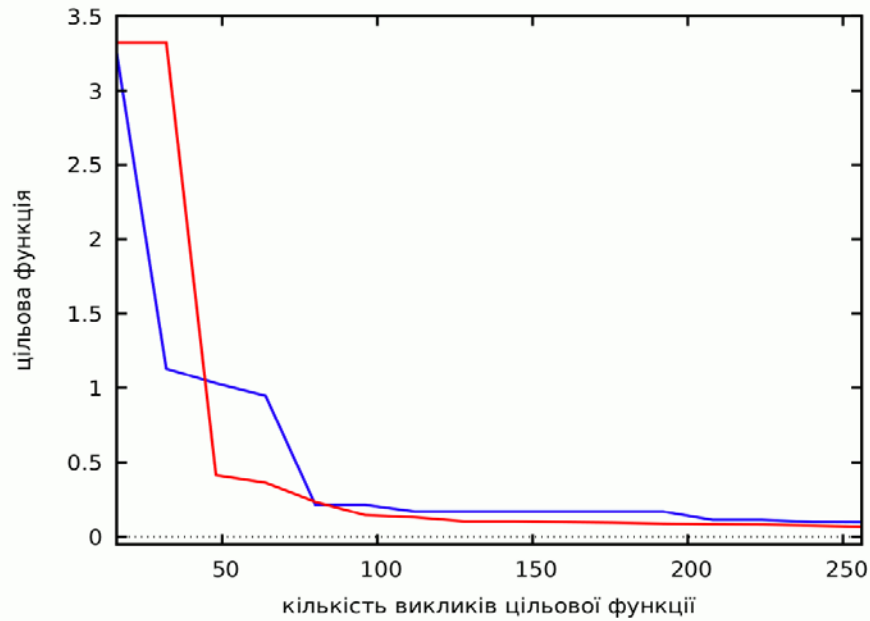


Рисунок 2.9 - Швидкість збіжності методу рою частинок (червоний) та генетичного алгоритму (синій) при визначенні мінімуму функції Розенброка

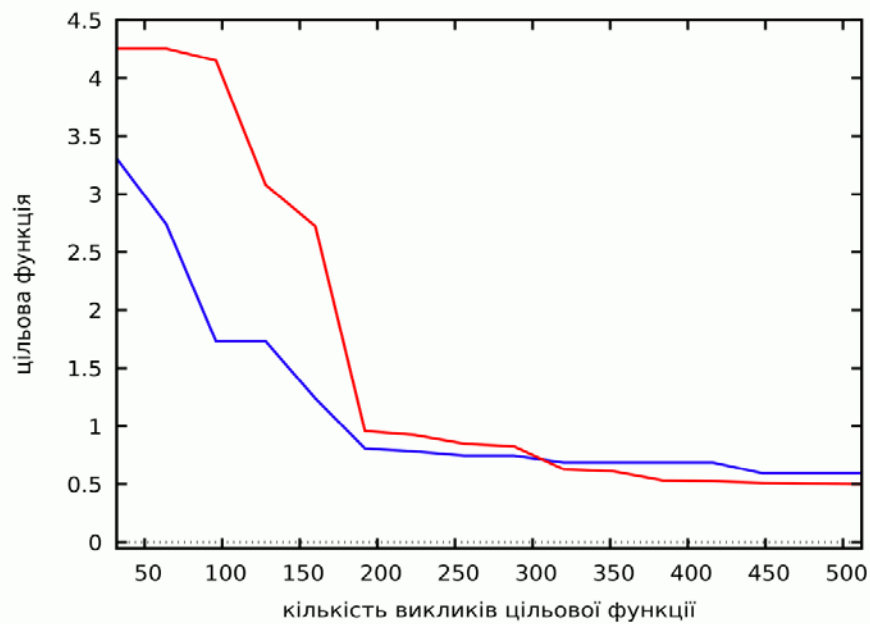


Рисунок 2.10 - Швидкість збіжності методу рою частинок (червоний) та генетичного алгоритму (синій) при визначенні мінімуму функції Растрігіна

Процеси генетичної еволюції популяції при пошуку мінімумів функцій Розенброка та Растрігіна проілюстровано на рис. 2.11, 2.12, де кожна частинка відповідає одній клітині, а положення частинок у просторі розв'язків  $(x_1, x_2)$  визначається значеннями їх хромосом.

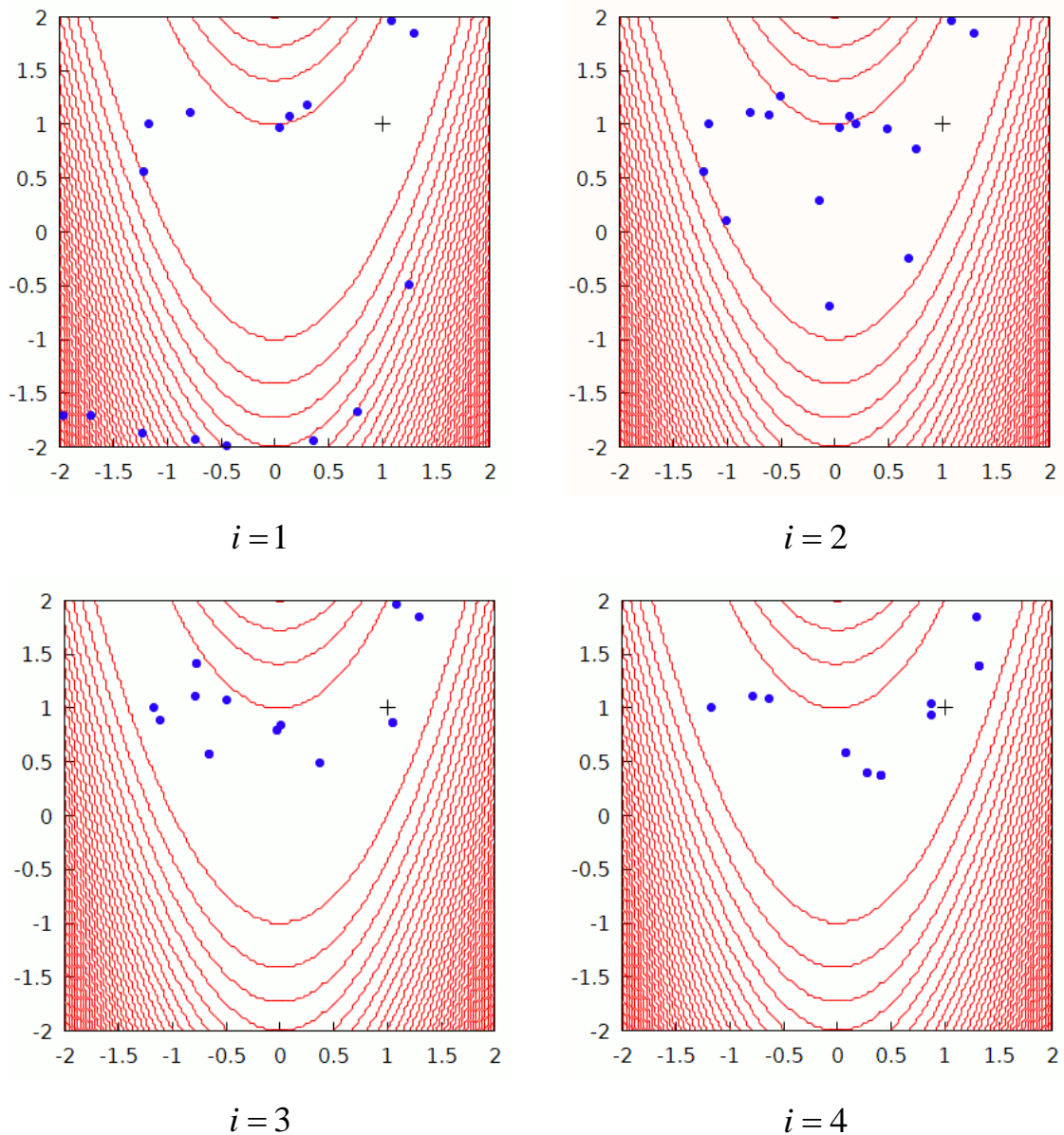


Рисунок 2.11 - Генетична еволюція популяції при пошуку мінімуму функції Розенброка

При пошуку мінімуму функції Розенброка генетичний алгоритм, так само як і метод рою частинок, досить швидко визначає наявність «долини» у ландшафті функції, що досліджується (див. ітерацію 3 на рис. 2.11). Але після цього спостерігаються хаотичні зміни генотипів клітин без вираженого наближення до точки екстремуму (впродовж до 10-ї ітерації). Починаючи з ітерації 13, можна спостерігати формування домінуючого генотипу, який відповідає оптимальному розв'язку.

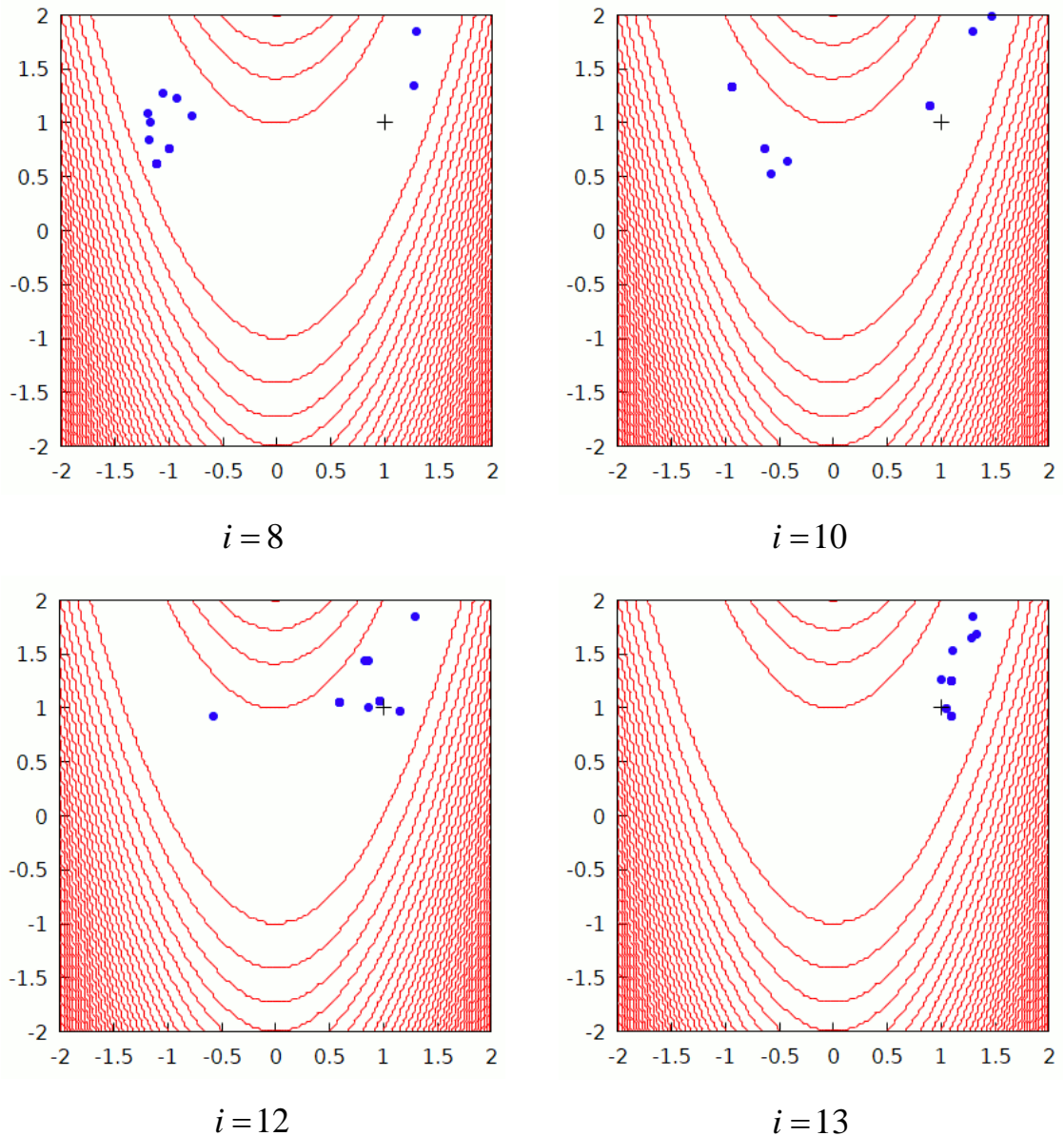


Рисунок 2.11 - Генетична еволюція популяції при пошуку мінімуму функції Розенброка (продовження)

При дослідженні мультимодальної функції Растрігіна, на відміну від методу рою частинок, генетичний алгоритм не демонструє швидкого визначення глобального мінімуму. Впродовж 10-ти ітерацій частинки, що уособлюють значення хромосом клітин, хаотично рухаються між чисельними локальними екстремумами. Лише приблизно на 12-ій – 14-ій ітераціях популяція демонструє формування домінуючого генотипу, який дозволяє однозначно визначити положення глобального екстремуму.

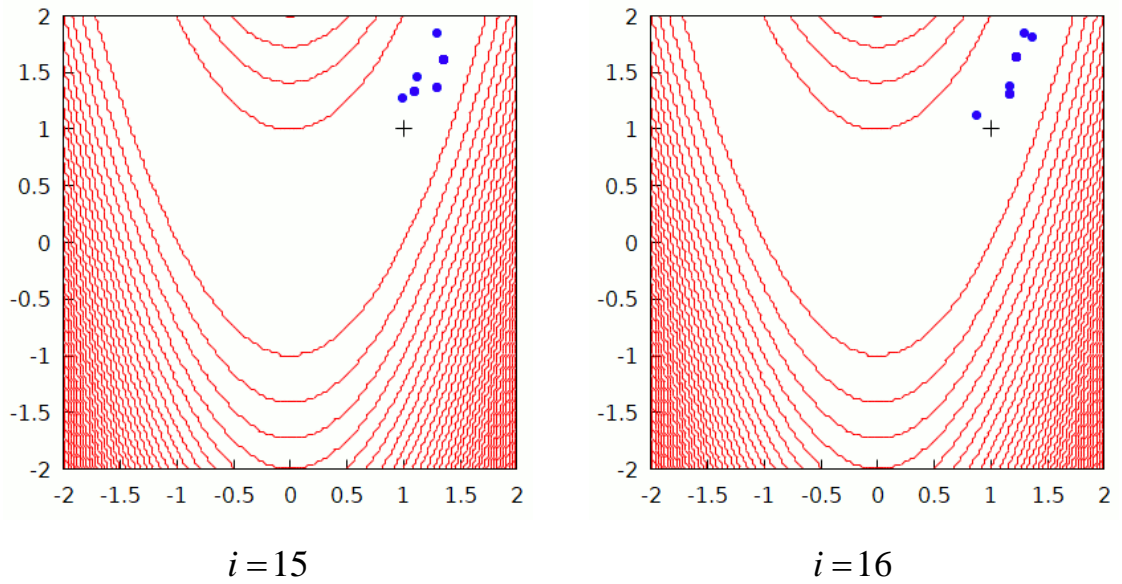


Рисунок 2.11 - Генетична еволюція популяції при пошуку мінімуму функції Розенброка (закінчення)

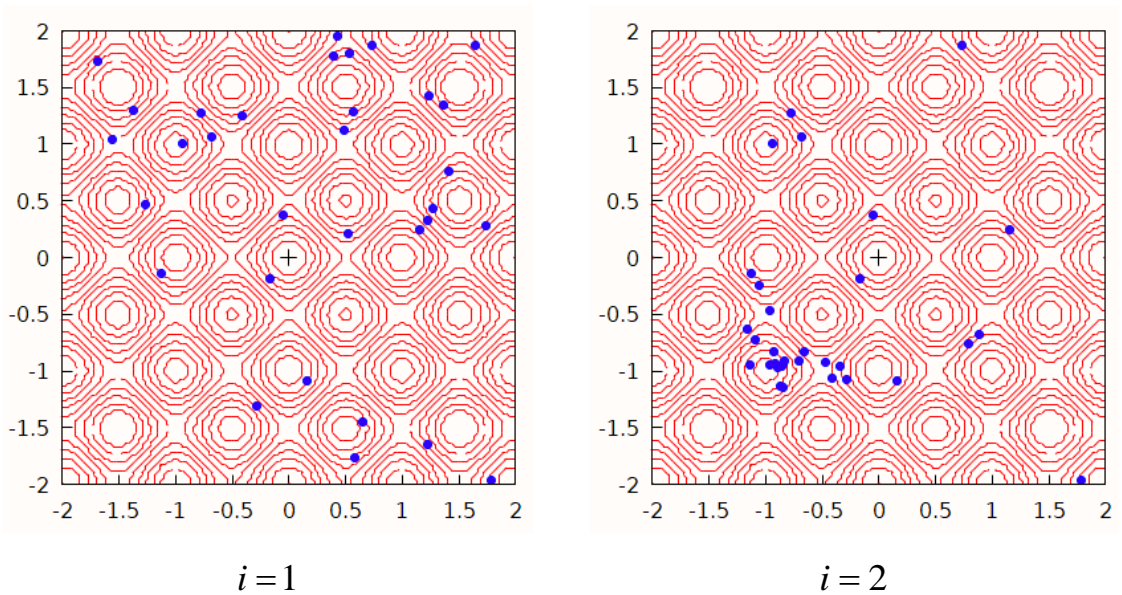


Рисунок 2.12 - Генетична еволюція популяції при пошуку мінімуму функції Растрігіна

Відзначимо, що метод рою частинок забезпечує поступове уповільнення руху всіх частинок та їх концентрацію в околиці екстремуму (рис. 2.4, 2.8). Натомість у розглянутому варіанті генетичного алгоритму частинки не зупиняються, а продовжують стохастично рухатися поблизу екстремуму (рис. 2.11, 2.12). У цьому разі критерієм завершення ітераційного процесу може бути

стагнація пошуку, коли знайдене значення екстремуму не покращується протягом декількох останніх ітерацій.

Чисельні експерименти показали, що відносно малі значення коефіцієнту мутації  $\bar{\gamma} < 0.1$  призводять до «зависання» генетичного алгоритму у локальних екстремумах. Натомість при  $\bar{\gamma} > 0.15 \dots 0.2$  спостерігаються швидкі скачки частинок, що заважає формуванню домінуючого генотипу.

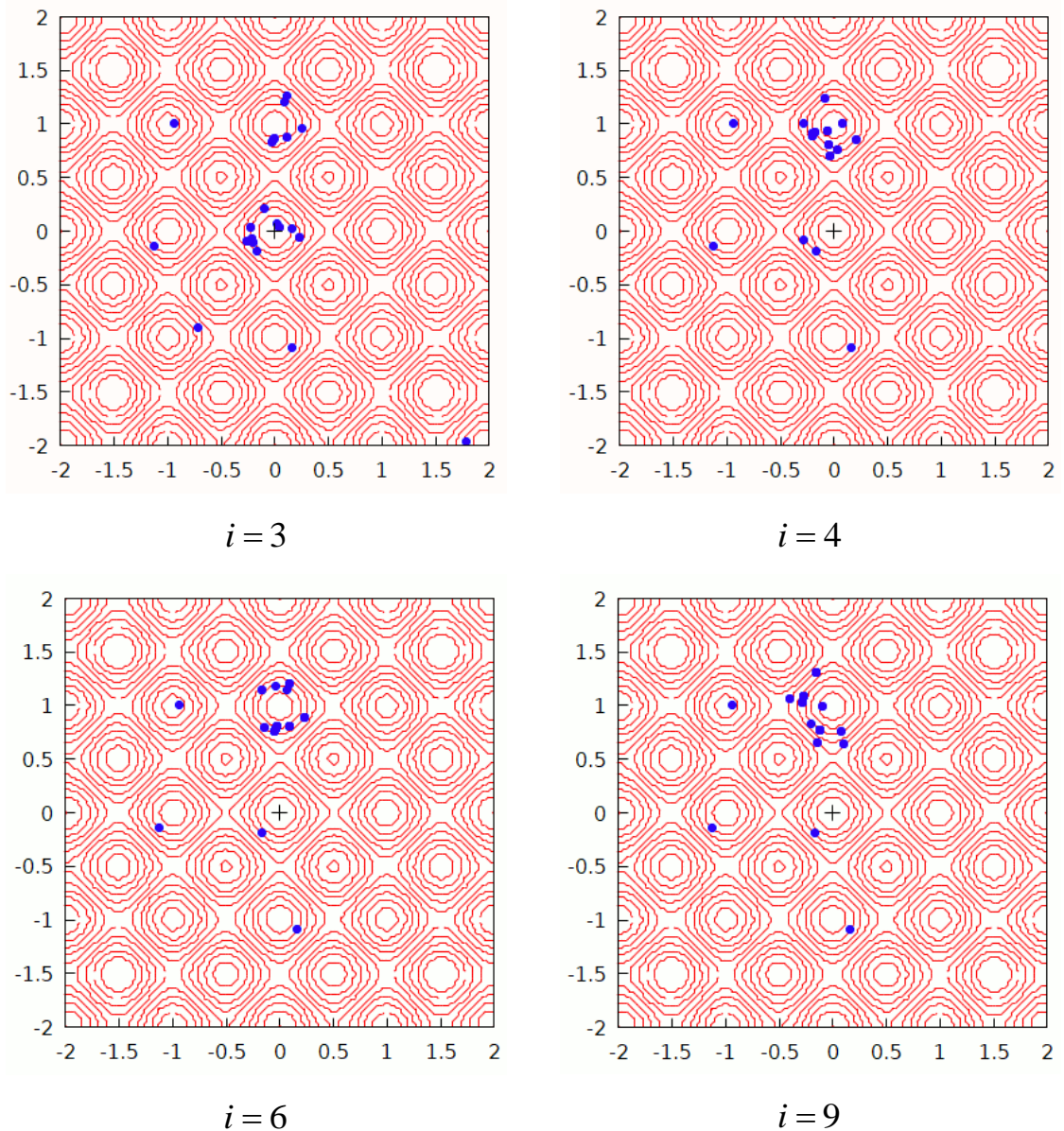


Рисунок 2.12 - Генетична еволюція популяції при пошуку мінімуму функції Растрігіна (продовження)

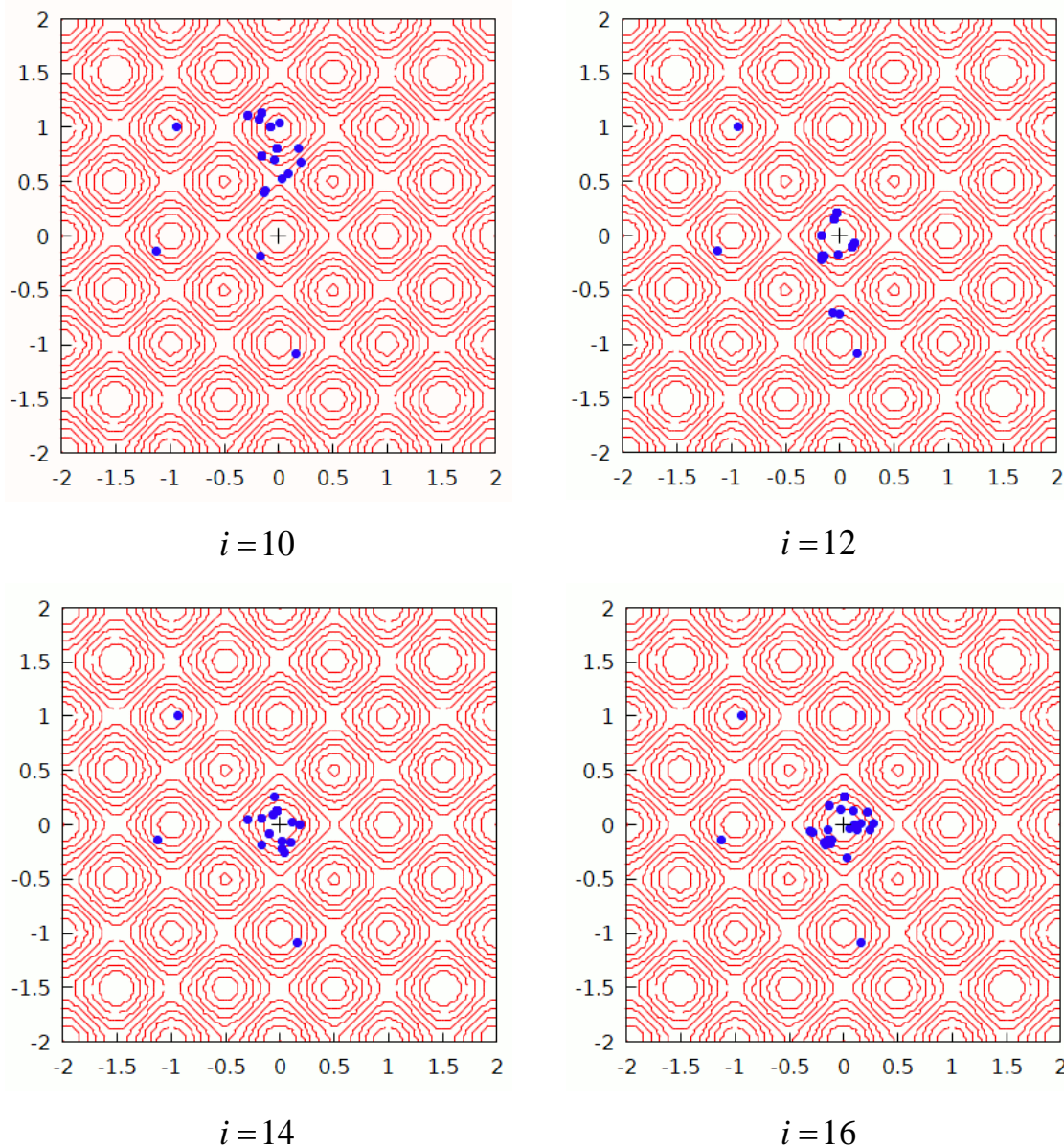


Рисунок 2.12 - Генетична еволюція популяції при пошуку мінімуму функції Растрігіна (закінчення)

## 2.5. Висновки по розділу 2

1. Для розв'язання задач нелінійної оптимізації сформульовано чисельний алгоритм методу рою частинок та наведено розрахункові формули, за якими обчислюються положення частинок у просторі розв'язків на кожній ітерації процесу пошуку. Задано умови обмежень, які визначають область пошуку. Проаналізовано різні типи граничних умов, що регулюють поведінку

частинки, якщо її координати потрапляють за межі простору розв'язків. Сформульовано критерії завершення процесу пошуку. Розроблено програмний код для реалізації методу рою частинок у системі комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima.

2. Для практичної верифікації методу рою частинок розглянуто задачі знаходження екстремумів тестових функцій: «долинної» функцію Розенброка та мультимодальної функції Растрігіна. Досліджено вплив розміру популяції на швидкість збіжності методу. Визначено значення вагових коефіцієнтів, при яких пошук глобальних екстремумів потребує менше обчислювальних витрат.

3. Сформульовано чисельну схему генетичного алгоритму, який може застосовуватись для знаходження екстремумів нелінійних неопуклих функцій. 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 комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima.

4. 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.

5. На основі висновків, наведених вище, у наступних розділах дисертаційної роботи для визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя використовується метод рою частинок.

## **2.6. Список використаних джерел у розділі 2**

У розділі 2 використано джерела [12, 21, 25, 41, 50, 68, 69, 75, 82, 83]. Їх найменування наведені у загальному списку використаних джерел.



### РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ ДЕМПФЕРІВ У КАРКАСНИХ БУДІВЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ЛІРА-САПР

#### 3.1. Демпфери сухого тертя

Сейсмічні демпфери широко використовуються для гасіння коливань будівель під час землетрусів. Існує багато типів сейсмічних амортизаторів і демпферів [80]. Як правило, демпфірування за рахунок сил тертя виявляється одним із найбільш ефективних методів поглинання сейсмічної енергії в будівництві [72–74].

Демпфери сухого тертя (рис. 3.1) працюють за принципом фрикційного гальма, перетворюючи кінетичну енергію руху в тепло. Демпфери проектуються таким чином, щоб просковзування їх фрикційних елементів відбувалося до руйнування конструкції. Таким чином, демпфери діють як запобіжники багаторазового використання і не потребують заміни після землетрусу. При цьому будівля виявляється здатною витримати землетрус без значних ушкоджень конструкції.

Демпфери сухого тертя демонструють однакову механічну поведінку як при розтягненні, так і при стисканні. Також їх характеристики практично не змінюються протягом усього періоду експлуатації. Це робить дані пристрої особливо зручними для моделювання і проектування. Їх можна застосовувати практично в будь-яких конструкціях, що спрощує впровадження передових інженерних технологій сейсмічного захисту в традиційне проектування будівель та споруд.

Хоча будь-які два дотичних сталевих елемента будуть забезпечувати ефект тертя, часто буває важко отримати стабільні результати. Якщо встановити занадто низьке значення сили тертя, демпфер може просковзнути під робочими навантаженнями, а якщо встановити занадто високе значення – демпфер може взагалі не спрацювати. При неякісному виготовленні або

використанні невідповідних матеріалів, робота демпфера може бути порушена переривчастим тертям, пристрій може піддаватися холодному зварюванню або надмірному ослабленню болтів. Тому демпфери сухого тертя повинні виготовлятися в контрольованих умовах, індивідуально і ретельно перевірятися, щоб гарантувати їх правильну роботу [31].



Рисунок 3.1 - Демпфери сухого тертя виробництва канадської компанії QuakeTek Inc. (<https://www.quaketek.com>)

Кожний демпфер сухого тертя індивідуально налаштовується і тестується, щоб переконатися, що він витримує навантаження і переміщення, змодельовані інженером-будівельником. Це забезпечує максимально можливу ступінь упевненості у фактичному значенні сили тертя. Ця точність особливо важлива при використанні фрикційного демпфера в якості обмежувача зусилля.

Незважаючи на те, що на сучасному ринку представлено багато конкуруючих технологій сейсмічного захисту і не існує єдиної технології, однаково найкращої для всіх будівель, лише деякі з них мають універсальність та ефективність. Використання демпферів сухого тертя забезпечує надійний

захист від землетрусів, роблячи будівельні споруди більш ефективними і істотно скорочуючи витрати на будівництво [80].

У сучасній інженерній практиці демпфери сухого тертя, як правило, моделюються у спеціалізованому програмному забезпеченні для проектування конструкцій як елементи зв'язку з прямокутною петлею гістерезису. Основними технологічними параметрами демпферу є необхідна сила тертя і робочий діапазон переміщень. Промисловістю виробляються демпфери із зусиллями тертя в діапазоні від 2 кН до 1500 кН. Паралельне встановлення декількох демпферів дозволяє створювати великі зусилля тертя до 6000 кН і більше [53]. Маса самих демпферів змінюється в залежності від заданого зусилля тертя і діапазону переміщень.

Як показали дослідження, оптимальні зусилля тертя повинні складати від 75% до 130% динамічних навантажень, що виникають під час землетрусу [80]. При цьому раціональними вважаються такі проектні рішення, коли сума зусиль тертя всіх демпферів приблизно дорівнює половині ваги споруди [73, 74, 80].

Демпфери сухого тертя можуть бути встановлені в сталеві, залізобетонні, бетонні або дерев'яні рами. Як правило, вони встановлюються у вигляді діагональних розкосів і можуть бути адаптовані практично до будь-якого будинку.

На рис. 3.2–3.4 наведено приклади застосування демпферів сухого тертя у реальних будівельних об'єктах. Хмарочос Torres Cuarzo, зведений у Мехіко у 2018 році, має висоту 180 метрів. Сейсмічний захист забезпечується за допомогою 450 демпферів сухого тертя, встановлених у вигляді розкосів у центральному прольоті будинку (рис. 3.2).

Сейсмічна модернізація Університету Лаваля в Канаді, виконана за допомогою демпферів сухого тертя, забезпечила ефективне підвищення стійкості будівель із мінімальним впливом на зовнішній вигляд фасадів та внутрішніх інтер'єрів (рис. 3.3).

Простота і швидкість встановлення демпферів сухого тертя дозволила провести реконструкцію корпусів найсучаснішого у Латинській Америці

медичного центру Valle del Lili (Колубмія) не зупиняючи лікарняну діяльність і без порушень графіку запланованих операцій (рис. 3.4). Висока технологічність процесу монтажу демпферів сухого тертя робить їх одним із найзручніших засобів підвищення сейсмічної стійкості будівель, що експлуатуються.

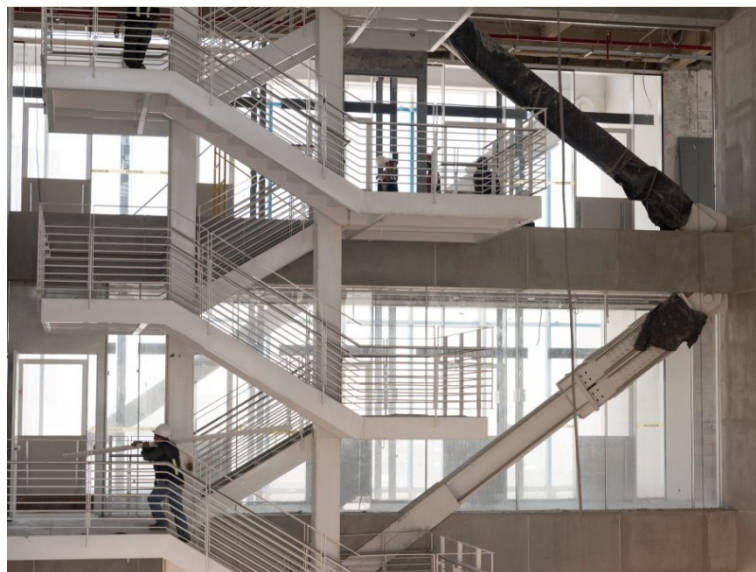


Рисунок 3.2 - Хмарочос Torres Cuarzo, Мехіко (<https://www.quaketek.com>)



Рисунок 3.3 - Університет Лавалю, Канада (<https://www.quaketek.com>)



Рисунок 3.4 - Медичний центр Valle del Lili, Колумбія  
(<https://www.quaketek.com>)

### **3.2. 2D модель десятиповерхового будинку із залізобетонним каркасом**

Розглянемо 2D модель десятиповерхового будинку із залізобетонним каркасом, який складається з колон перерізом 400x400 мм та ригелів перерізом 300x700 мм (рис. 3.5). Модуль Юнга матеріалу каркасу  $E = 32.5$  ГПа і густина

$\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$ . Вага будівлі становить 1328 кН.

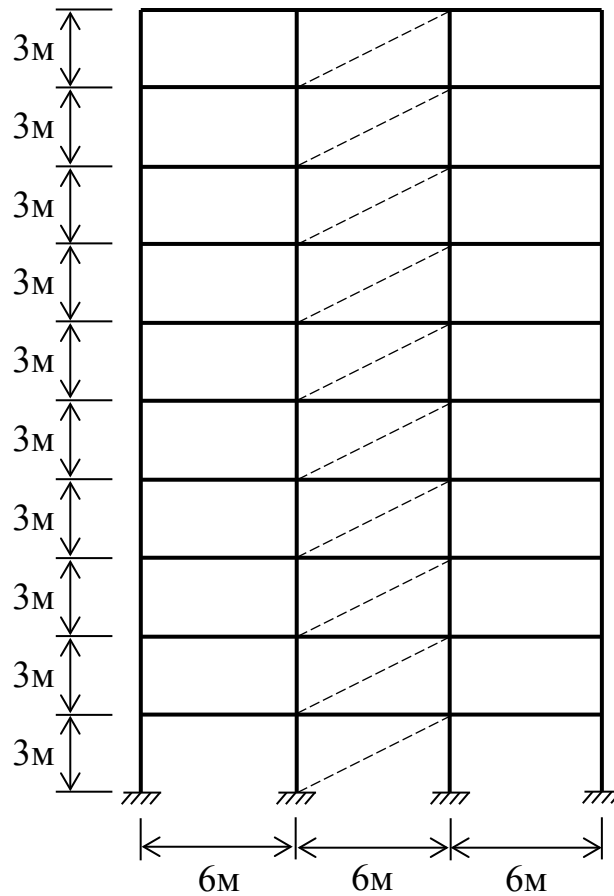


Рисунок 3.5 - Модель десятиповерхового каркасного будинку

За допомогою модального аналізу у програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР визначено частоти та періоди власних коливань (табл. 3.1). Відзначимо, що періоди перших трьох форм власних коливань належать до діапазону переважаючих періодів сейсмічних акселерограм 0.1...2 с [13] і, таким чином, є небезпека резонансу у випадку землетрусу.

Таблиця 3.1 - Частоти та періоди власних коливань

	1 форма	2 форма	3 форма	4 форма	5 форма	6 форма
Частота $f$ , Гц	1.75	5.28	8.99	12.6	16.3	16.5
Період $T$ , с	0.571	0.189	0.111	0.0791	0.0613	0.0605

### 3.3. Розрахунок на сейсмічне навантаження

Виконано розрахунок на сейсмічне навантаження у ПК ЛІРА-САПР для наступних значень параметрів [13]: категорія ґрунту за сейсмічними властивостями II; розрахункова амплітуда прискорення основи  $0.4g$  (відповідає району сейсмічності 9 балів); коефіцієнт непружньої деформації  $k_1 = 1$ ; коефіцієнт відповідальності споруди  $k_2 = 1.4$ ; коефіцієнт поверховості  $k_3 = 1.2$ ; коефіцієнт нелінійного деформування ґрунту  $k_{гр} = 1$ ; напрямні косинуси сейсмічного впливу  $C_x = 1$ ,  $C_y = C_z = 0$  (розрахункові сейсмічні навантаження діють горизонтально). За результатами розрахунку максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу склали 176 мм.

### 3.4. Нестационарні коливання будівлі під дією періодичного навантаження та розв'язання задачі оптимізації

Прийmemo, що у центральному прольоті будинку може бути встановлено три демпфера у вигляді розкосів. Можливі місця розташування демпферів позначено на рис. 3.1 штриховими лініями. Зусилля тертя кожного демпферу становить  $N = 220$  кН, а сума їх зусиль дорівнює половині ваги конструкції, що відповідає рекомендаціям, наведеним у літературі [73, 74, 80]. Необхідно визначити, на яких поверхах потрібно розташувати демпфери для максимального сейсмічного захисту.

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 з амплітудою 200 кН. При цьому за відсутності демпферів максимальні переміщення верхнього поясу складають 170 мм, що наближено відповідає результатам розрахунку на сейсмічний вплив, наведеним вище.



Нестационарний динамічний розрахунок виконано за допомогою підсистеми «Динаміка-плюс». На рис. 3.6 показано, як переміщення змінюються у часі. Зовнішнє навантаження діє впродовж десяти періодів (5.71с), після чого відбуваються вільні коливання будівлі, амплітуда яких дуже повільно зменшується завдяки силам внутрішнього тертя конструкції.

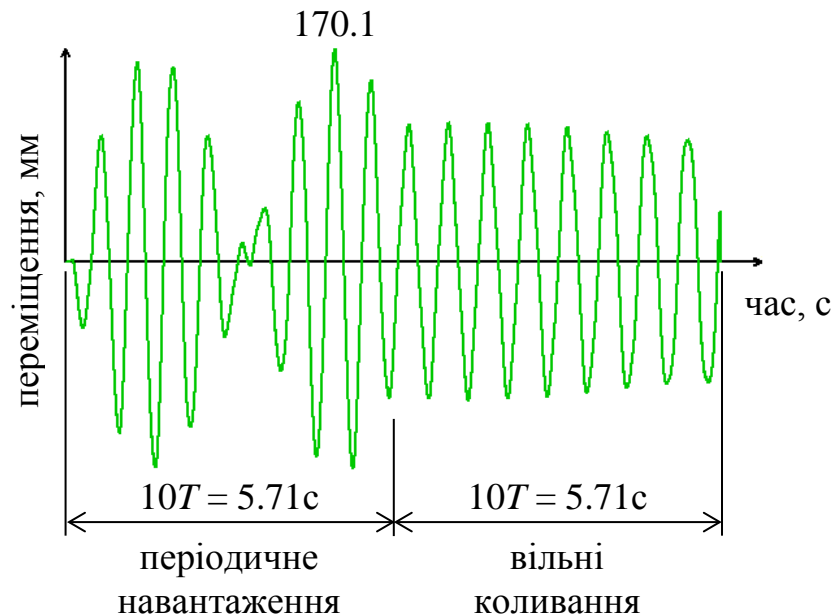


Рисунок 3.6 - Горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу без демпфірування

Рациональне 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 за допомогою фізично-нелінійного скінченного елемента (СЕ) типу 255. Коли зусилля невелике, СЕ 255 веде себе як пружній зв'язок, а після досягнення граничного значення  $N$  подальші переміщення відбуваються без зростання зусилля (рис. 3.7). Таким чином, СЕ 255 реалізує модель ідеально-пластичного тіла. Така модель використовується в літературі як наближена апроксимація елементів, що демпфірують [47].

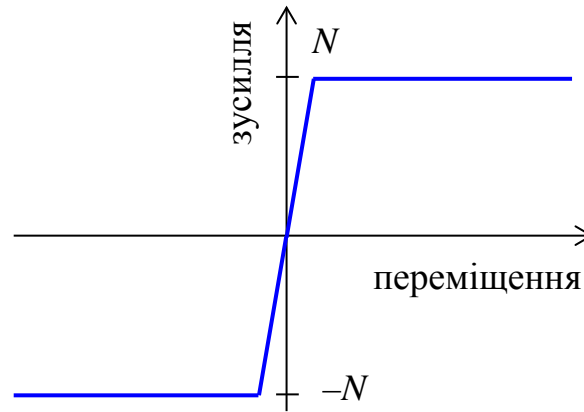


Рисунок 3.7 - Схематична діаграма деформування SE 255

Для розв'язання задачі оптимізації використано популяцію з восьми частинок. Роботу методу рою частинок ілюстровано на рис. 3.8, де у таблицях показані положення частинок на кожній ітерації. Кожен рядок відповідає окремій частинці. Варіанти розташування демпферів представлено послідовністю з десяти цифр 0, 1 або 2, які позначають кількість демпферів на відповідних поверхах. На 8-й ітерації всі частинки зупинилися в однаковому положенні, при якому цільова функція досягає мінімуму. Таким чином, визначено раціональне розташування демпферів на 2, 5 і 6 поверхах. Зазначимо, що оптимальний розв'язок було знайдено вже на 3-й ітерації до остаточної зупинки частинок.

0001100001	1001010000	0002000000	0001100000
0001010010	1001010000	1000001000	0100001000
0000120000	1001010000	0010010000	0010010000
0110001000	1001010000	0101010000	0101010000
0010010000	0101010000	0010110000	0010110000
2000000100	0011010000	0010200000	0010200000
1011000000	1010010000	0000100100	1000101000
0100010010	1001010000	0100110000	0100110000
$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$

Рисунок 3.8 - Результати роботи методу рою частинок

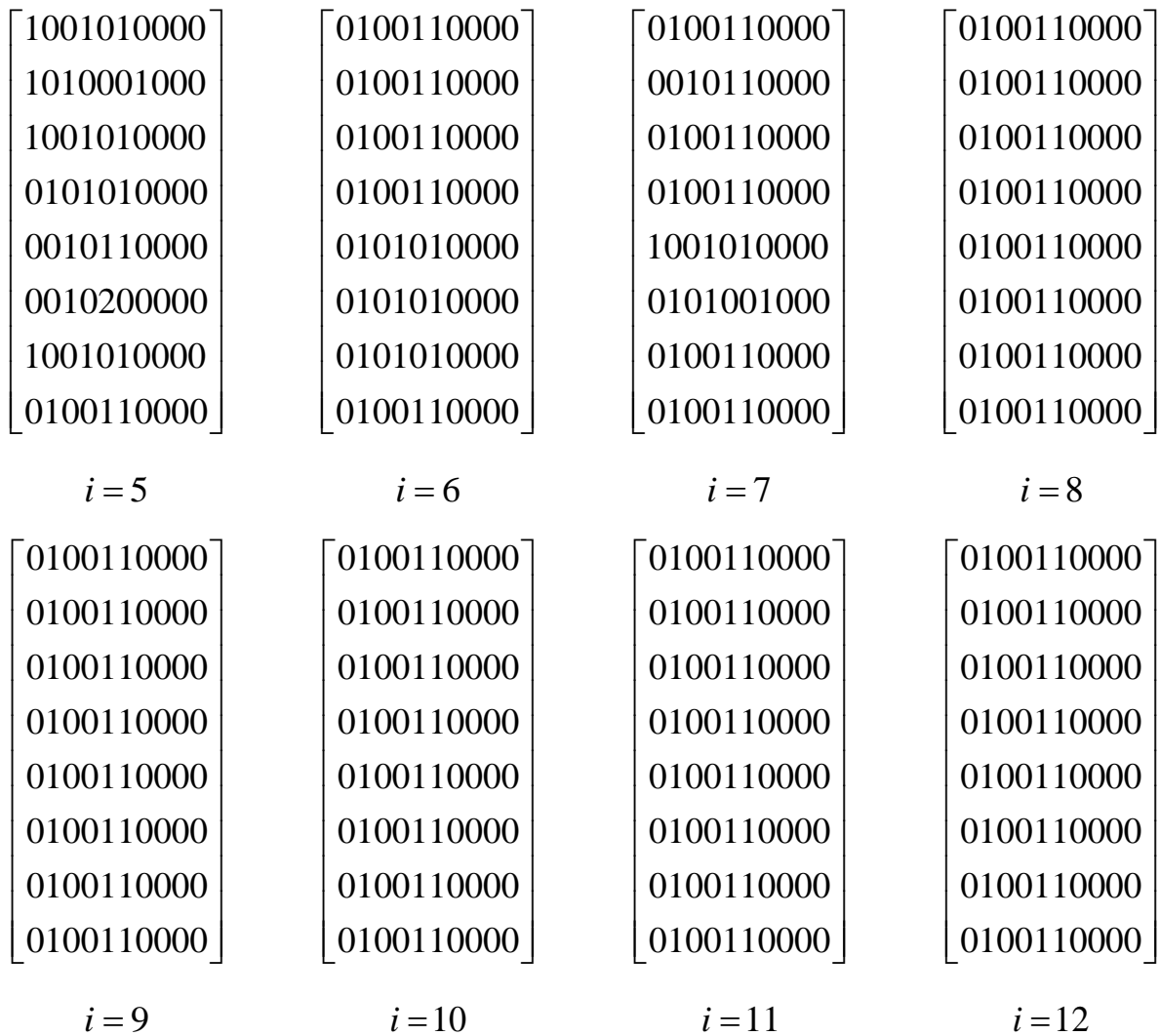


Рисунок 3.8 - Результати роботи методу рою частинок (продовження)

Переміщення верхнього поясу каркасу із встановленими демпферами наведено на рис. 3.9.

### 3.5. Властивості полімербетонних конструкцій

Динамічні характеристики будівель та їх реакція на дію сейсмічних та динамічних навантажень суттєвим чином залежать від механічних властивостей матеріалу каркасу. Останніми роками розробляються нові типи конструкційних матеріалів із поліпшеними характеристиками: високою міцністю, стійкістю до дії агресивних середовищ, морозостійкістю тощо. Одними з таких матеріалів є полімербетони [45].

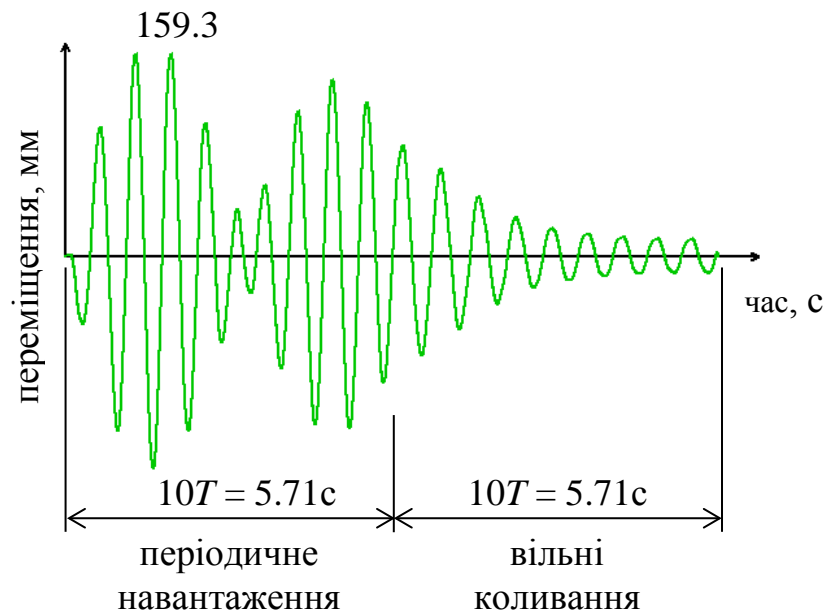


Рисунок 3.9 - Горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу з демпферами

Полімербетони (у літературі також зустрічаються назви полімерцементні бетони, пластобетони, бетонополімери) – загальна назва нових типів бетонів, створених з метою ліквідації або зменшення недоліків цементного бетону. У цих матеріалах мінеральне в'язуче (цемент, силікат) частково або повністю замінюється полімерними смолами. У порівнянні з традиційними бетонами, полімербетони мають більшу міцність на розтягнення, меншу крихкість, у них більш високі водонепроникність, морозостійкість, опір стиранню, довговічність та стійкість до дії агресивних рідин і газів. Останнє дозволяє успішно використовувати полімербетони у цехах хімічної, харчової, целюлозної промисловості, забезпечуючи високу корозійну стійкість несучих конструкцій.

Переваги полімербетонів:

- Границя міцності вище, ніж у звичайного бетону у 4–6 разів (міцність на стиск) та до 10 разів (міцність на розтягнення).
- Хімічна пасивність та висока стійкість до дії агресивних речовин.

- Висока морозостійкість (витримують 300–500 циклів заморожування і відтавання, при яких зберігаються первинні фізико-механічні властивості).
- Опір стиранню у 10–15 разів вище, ніж у звичайного бетону.
- Короткий час застигання суміші.
- Щільна і рівна поверхня.
- Ремонтопридатність. Пошкоджене місце достатньо залити невеликою кількістю нової суміші, яка завдяки високій адгезії повністю відновлює стан конструкції.
- Естетичний зовнішній вигляд, різноманітність відтінків і фактур.

Основним недоліком полімербетонів є відносно велика вартість. Більше 90% складу полімербетонів становить заповнювач. Заповнювачем може бути широкий перелік матеріалів: щебінка, гравій, мінеральне борошно, кварцовий пісок, стружка деревини. Також можуть використовуватися дрібнодисперсні матеріали, такі як тальк, графітовий порошок, подрібнені базальт, туф, граніт, слюда тощо. Кількість в'язучого, як правило, становить близько 5%. В'язучим виступають термореактивні або термопластичні смоли: поліефірна (найбільш бюджетний варіант), епоксидна, фуранова, фенолформальдегідная, карбамідоформальдегідна та інші. Окрім заповнювача та в'язучого, у складі полімербетонів присутні затверджувач, пластифікатори, барвники.

В залежності від типу заповнювачу та розміру його фракцій, розрізняють наступні класи полімербетонів:

1. Надважкий. Містить заповнювач із фракцією найбільшого розміру (від 2 до 4 сантиметрів), а густина матеріалу складає від 2400 до 4000 кг/м<sup>3</sup>. Використовується для елементів конструкцій, працюючих під дією високих навантажень (фундаменти, несучі конструкції, каркаси будівель та споруд).

2. Важкий. Розмір фракцій заповнювача не перевищує 2 сантиметри; густина від 1500 до 2400 кг/м<sup>3</sup>. Такі полімербетони використовуються для

будівельних конструкцій та для виготовлення декоративного литтєвого каміння, що імітує дорогі натуральні матеріали (наприклад, мармур).

3. Легкий. Як правило, заповнювач має такий же розмір фракцій, як і у важких полімербетонів, але кількість заповнювача менша. Густина складає від 500 до 1500 кг/м<sup>3</sup>. Дані матеріали характеризуються поліпшеними теплоізоляційними властивостями і можуть використовуватись для зовнішніх несучих огорожень з метою зменшення тепловитрат будинків.

4. Надлегкий. Відрізняється найменшими розмірами фракцій заповнювача – не більше 1 см, при цьому густина знаходиться у діапазоні від 300 до 500 кг/м<sup>3</sup>. В якості заповнювача застосовуються стружка, перліт, пробка, полістирол. Надлегкі полімербетони використовуються в якості теплової ізоляції, а також при зведенні внутрішніх перегородок.

5. Литтєве каміння. Для його виготовлення використовуються дрібнодисперсні заповнювачі з розміром фракцій до 0.15 мм. Такі матеріали застосовуються для виробництва елементів декору та підлог.

Типові фізико-механічні характеристики полімербетонів наступні:

- густина 300...3000 кг/м<sup>3</sup>;
- міцність на стиск 50...110 МПа;
- міцність на згин 3...11 МПа;
- опір стиранню 0.02...0.03 г/см<sup>2</sup>;
- коефіцієнт теплопровідності 0.05...0.85 Вт/(м·К);
- модуль Юнга 10...40 ГПа;
- поглинання води за добу 0.05...0.5 %;
- морозостійкість F300...F500.

### **3.6. Оцінка розмірів конструктивних елементів та ваги полімербетонної будівлі**

Розглянемо, як зміняться динамічні характеристики десятиповерхового будинку (рис. 3.5), якщо конструкцію каркасу буде виготовлено з

полімербетону. Наведені вище дані свідчать, що густина і модуль Юнга полімербетонів, які можуть застосовуватись для зведення каркасу, приблизно дорівнюють аналогічним характеристикам цементних бетонів, тоді як міцність полімербетонів у кілька разів вища. Завдяки цьому можна зменшити розміри поперечних перерізів конструктивних елементів, зменшити вагу та матеріаломісткість споруди.

Оцінимо зменшення поперечних розмірів елементів каркасу наступним чином. Колони працюють на стиск, а ригелі – на згин. Запишемо умови міцності для колон

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \sigma_{\max} \quad (3.1)$$

і для ригелів

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_{\max}, \quad (3.2)$$

де  $\sigma$  – нормальні напруження, що виникають у матеріалі;  $\sigma_{\max}$  – границя міцності;  $N$  – поздовжнє зусилля;  $M$  – згинальний момент;  $A$  – площа поперечного перерізу квадратних колон,  $A = b_1^2$ ;  $b_1$  – ширина перерізу колони;  $W$  – осьовий момент опору поперечного перерізу прямокутних ригелів,  $W = b_2 b_3^2 / 6$ ;  $b_2, b_3$  – ширина та висота перерізу ригелю відповідно.

Визначимо коефіцієнт підвищення міцності  $\eta$  полімербетонної будівлі:

$$\eta = \frac{\sigma_{\max}^{(p)}}{\sigma_{\max}}, \quad (3.3)$$

де  $\sigma_{\max}^{(p)}$ ,  $\sigma_{\max}$  – границі міцності полімербетону та цементного бетону відповідно.

Співвідношення (3.1) – (3.3) дозволяють обчислити поперечні розміри  $b_1^{(p)}$ ,  $b_2^{(p)}$ ,  $b_3^{(p)}$  конструктивних елементів полімербетонної споруди, для яких одержано прості аналітичні формули:

$$b_1^{(p)} = \frac{b_1}{\eta^{1/2}}, b_2^{(p)} = \frac{b_2}{\eta^{1/3}}, b_3^{(p)} = \frac{b_3}{\eta^{1/3}}. \quad (3.4)$$

Таким чином, площа поперечного перерізу колон зменшиться у  $\eta$  разів, а ригелів – у  $\eta^{2/3}$  разів. Зазначимо, що такий розрахунок носить оціночний характер, оскільки не розглядаються умови стійкості колон.

На рис. 3.10 наведено вагу каркасу в залежності від коефіцієнту  $\eta$ . Одержані результати свідчать, що підвищення міцності матеріалу у 5 разів дозволяє знизити вагу будівлі у 3.4 рази. Це дозволяє знизити матеріаломісткість і вартість споруди, а також заощадити використання природних ресурсів.

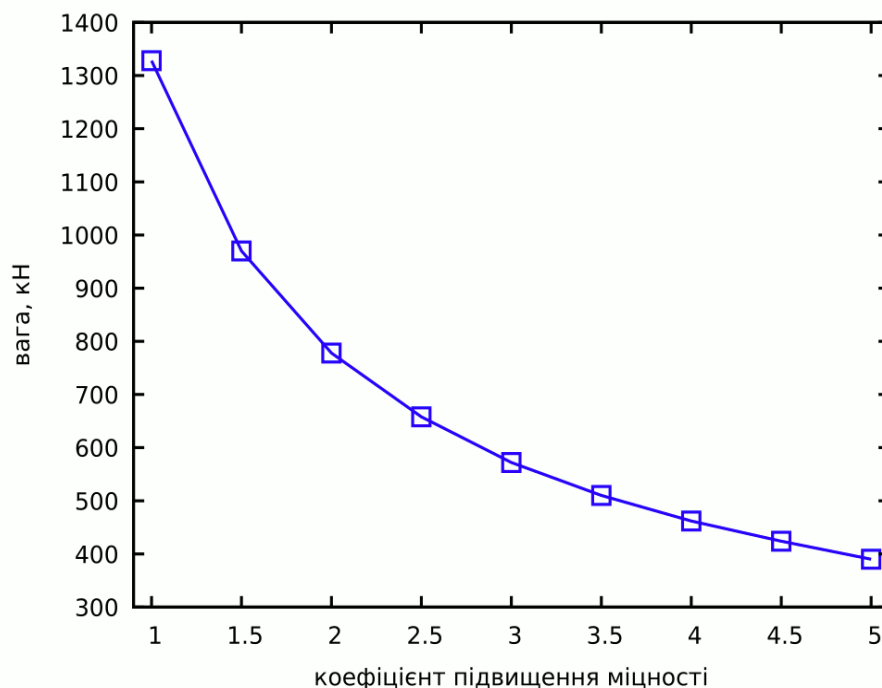


Рисунок 3.10 - Вага десятиповерхового будинку з полімербетонним каркасом



### 3.7. Динамічні характеристики десятиповерхового полімербетонного будинку

Зменшення ваги конструкції призводить до підвищення частот власних коливань. Але зі зменшенням поперечних розмірів конструктивних елементів також зменшується жорсткість споруди, що у свою чергу призводить до зниження власних частот. Таким чином, ці два ефекти у певній мірі компенсують дію один одного. На рис. 3.11 наведено частоти перших шести форм власних коливань полімербетонної будівлі (цифрами позначено номери форм). У цілому підвищення міцності матеріалу у 5 разів і відповідне зменшення поперечних перерізів колон та ригелів призводить до зниження значень власних частот приблизно у 2 рази. Зазначимо, що при цьому періоди усіх перших шести форм власних коливань потрапляють до сейсмічно-небезпечного діапазону 0.1...2 с. Компенсувати зменшення жорсткості полімербетонної будівлі при динамічних навантаженнях можна шляхом встановлення демпферів сухого тертя.

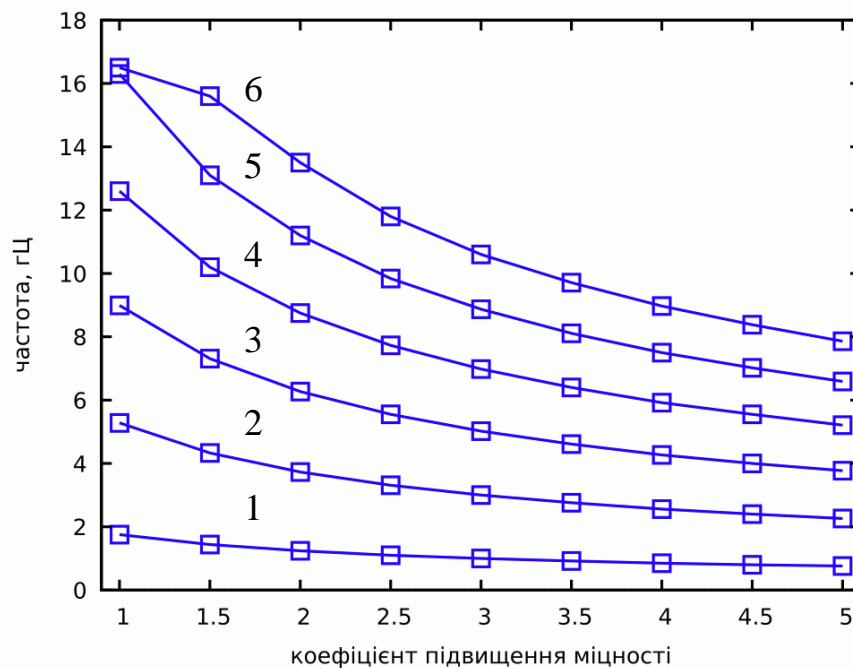


Рисунок 3.11 - Частоти власних коливань десятиповерхового будинку з полімербетонним каркасом: 1...6 – номери форм коливань

Розрахунок полімербетонної будівлі на сейсмічне навантаження виконано у ПК ЛІРА-САПР відповідно до значень розрахункових коефіцієнтів, представлених у п. 3.2. На рис. 3.12 наведено максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу в залежності від коефіцієнту підвищення міцності  $\eta$ . Можна зробити висновок, що дана залежність носить майже лінійний характер.

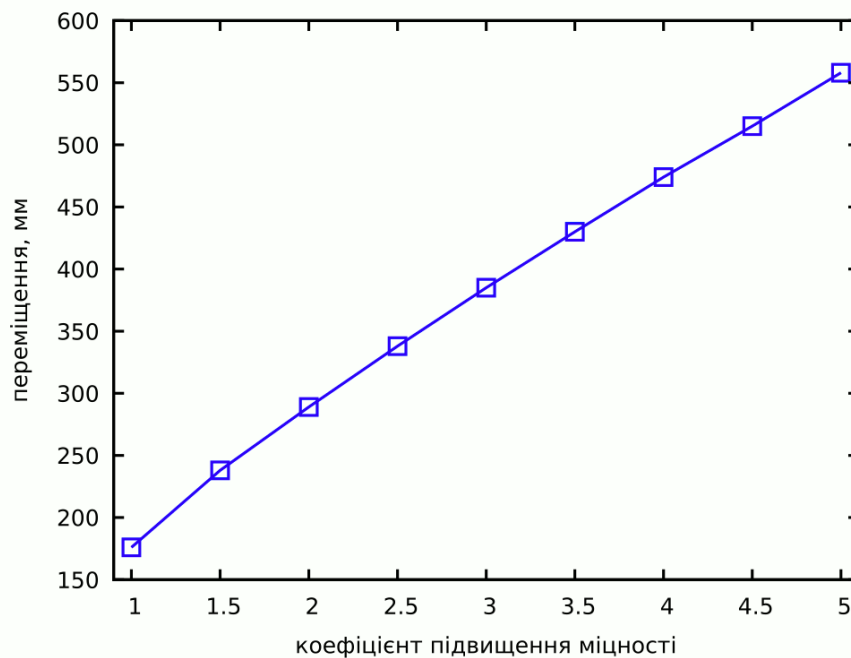


Рисунок 3.12 - Максимальні переміщення верхнього поясу полімербетонного каркасу під дією сейсмічного навантаження

### 3.8. Висновки по розділу 3

1. Виконано аналіз конструктивних особливостей, фізико-механічних характеристик та методів моделювання демпферів сухого тертя. У дисертаційній роботі при розрахунках будівель у ПК ЛІРА-САПР роботу демпферів описано за допомогою фізично-нелінійного СЕ 255. Діаграма деформування СЕ 255 відповідає моделі ідеально-пластичного тіла: коли зусилля невелике, СЕ 255 веде себе як пружний зв'язок, а після досягнення

граничного значення зусилля, що дорівнює силі тертя демпфера, подальші переміщення відбуваються без зростання зусилля.

2. Розглянуто 2D модель десятиповерхового каркасного будинку. Розрахунки виконувались у ПК ЛПРА-САПР. За допомогою модального аналізу визначено частоти та періоди власних коливань. Необхідно відмітити, що періоди перших трьох форм власних коливань належать до діапазону переважаючих періодів сейсмічних акселерограм 0.1...2 с, що приведе до виникнення резонансів під час землетрусу. Виконано розрахунок на сейсмічний вплив та визначено максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркасу.

3. Досліджено задачу раціонального розташування демпферів у випадку періодичного навантаження, прикладеного горизонтально до опорних вузлів каркасу. Розглянуто конструктивну схему, коли у центральному прольоті будинку може бути встановлено три демпфера у вигляді розкосів. Частоту навантаження прийнято рівною частоті першої форми власних коливань, що відповідає найнебезпечнішому випадку резонансу. Амплітуду навантаження визначено таким чином, щоби переміщення верхнього поясу каркасу дорівнювали значенням, одержаним вище за допомогою розрахунку на сейсмічний вплив. Навантаження діяло впродовж заданого проміжку часу, після чого відбувалися вільні коливання будівлі. Цільовою функцією прийнято амплітуду переміщень верхнього поясу каркасу через певний час після зняття навантаження. Нестационарний динамічний розрахунок виконано у ПК ЛПРА-САПР за допомогою підсистеми «Динаміка-плюс».

4. Задачу оптимізації розв'язано за допомогою методу рою частинок. Використано популяцію з восьми частинок. Оптимальний розв'язок знайдено на 3-ій ітерації, а на 8-ій ітерації усі частинки запинилися у точці глобального мінімуму цільової функції. За результатами пошуку визначено раціональне розташування демпферів на поверхах 2, 5, 6, що забезпечує найшвидше згасання коливань споруди.

5. 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 за міцність звичайних цементних бетонів, що дозволяє зменшити поперечні перерізи конструктивних елементів, зменшити вагу та матеріаломісткість споруди.

6. На основі аналізу умов міцності, запропоновано аналітичні формули, що дозволяють наближено оцінити поперечні розміри колон та ригелів, виготовлених з полімербетону. Визначено, що підвищення міцності матеріалу у 5 разів дозволяє знизити вагу будівлі у 3.4 рази.

7. Виконано аналіз динамічних характеристик полімербетонного каркасу будинку. При підвищення 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 полімербетонної будівлі на сейсмічний вплив. Одержані чисельні результати свідчать, що амплітуда переміщень полегшеної полімербетонної конструкції лінійно пропорційна міцності матеріалу каркасу.

### **3.9. Список використаних джерел у розділі 3**

У розділі 3 використано джерела [13, 31, 45, 47, 53, 72–74, 80]. Їх найменування наведені у загальному списку використаних джерел.

## РОЗДІЛ 4. ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ДЕМПФЕРАМИ СУХОГО ТЕРТЯ

### 4.1. 2D модель шестиповерхового будинку із залізобетонним каркасом

Розглянемо 2D модель шестиповерхового будинку із залізобетонним каркасом (рис. 4.1). Перерізи елементів становлять: 400x400 мм (колони) та 250x600 мм (ригелі). Вага конструкції становить 720 кН. Передбачається, що демпфери сухого тертя можуть бути встановлені у вигляді розкосів у центральному прольоті; місця їх можливого розташування позначено на рис. 4.1 штриховими лініями.

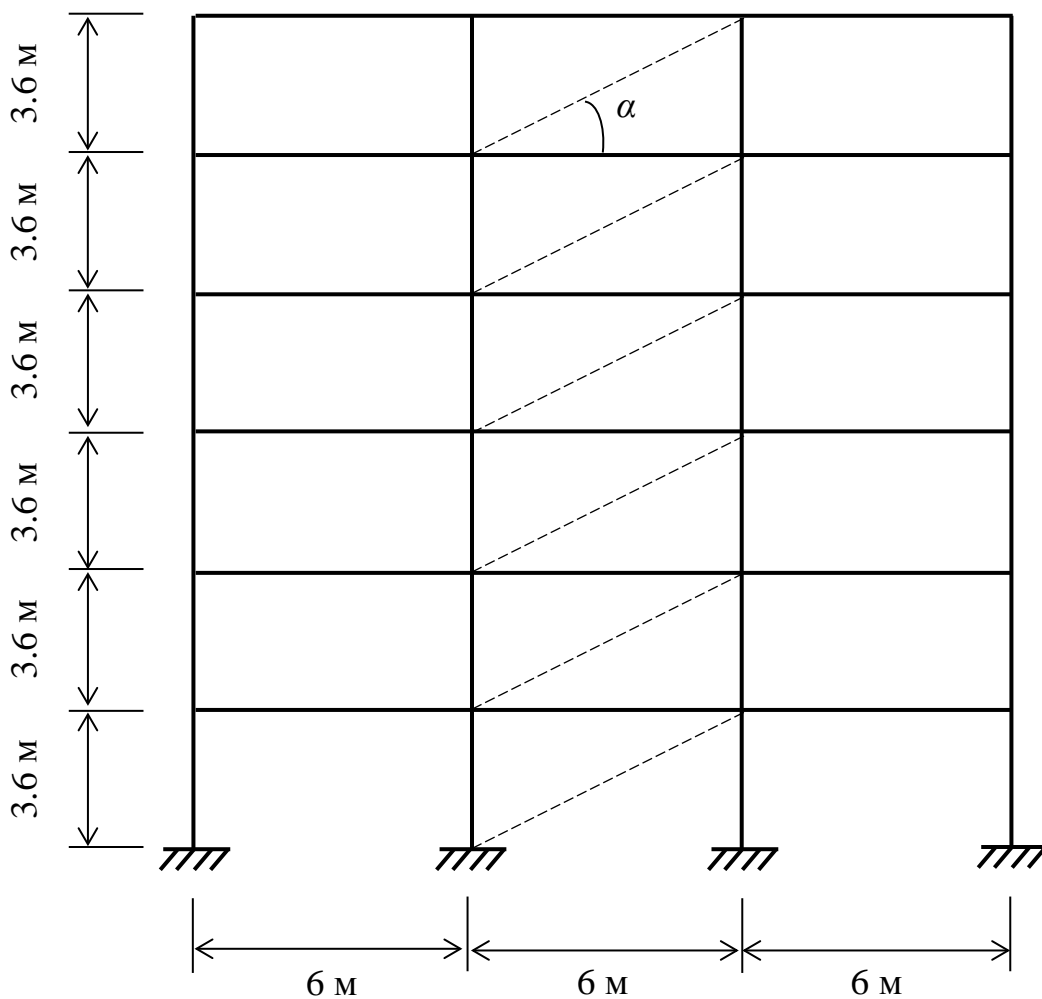


Рисунок 4.1 - Модель шестиповерхового каркасного будинку

## 4.2. Розрахункова схема та вихідні рівняння руху

У випадку горизонтального сейсмічного навантаження напружено-деформований стан будинку визначається головним чином згинальними деформаціями колон, тоді як поздовжніми деформаціями елементів каркасу можна знехтувати. Відповідно до цього припущення, приймемо наближену розрахункову схему у вигляді вертикального консольного стрижня із зосередженими масами, які розташовані на рівні перекриттів та можуть переміщуватись у горизонтальному напрямку (рис. 4.2).

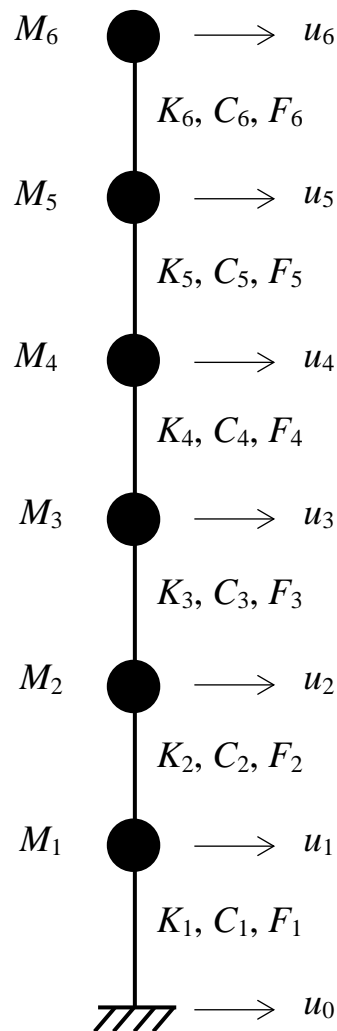


Рисунок 4.2 - Розрахункова схема із зосередженими масами

Рівняння руху запишуться наступним чином:

$$M_k \ddot{u}_k + K_k (u_k - u_{k-1}) + C_k (\dot{u}_k - \dot{u}_{k-1}) + F_k - \\ - K_{k+1} (u_{k+1} - u_k) - C_{k+1} (\dot{u}_{k+1} - \dot{u}_k) - F_{k+1} = 0, \quad (4.1)$$

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,  $1 \leq k \leq 6$ ;  $u_0$  – горизонтальне переміщення основи. Точка зверху позначає диференціювання за часом. Відповідно до фізичного змісту задачі, у рівняннях (4.1)  $u_7 = \dot{u}_7 = K_7 = C_7 = F_7 = 0$ .

Модуль Юнга матеріалу каркасу  $E = 32.5$  ГПа і густина  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Тоді 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  $\delta = 0.3$  [13]. Тоді знаходимо  $C_k = (\delta/\pi) \sqrt{M_k K_k} = 88.4$  кН·с/м.

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

$$F_k = N_{kx} \operatorname{sgn}(\dot{u}_k - \dot{u}_{k-1}), \quad (4.2)$$

де  $N_{kx}$  – проекція зусилля тертя демпферу  $N_k$  на горизонтальну вісь,  $N_{kx} = N_k \cos \alpha$ ;  $\alpha$  – кут нахилу демпферу (див. рис. 4.1); функція  $\operatorname{sgn}(\cdot)$  дорівнює

$$\operatorname{sgn}(x) = 1 \text{ при } x > 0, \\ \operatorname{sgn}(x) = 0 \text{ при } x = 0, \\ \operatorname{sgn}(x) = -1 \text{ при } x < 0.$$

Рівняння (4.2) описує прямокутну петлю гістерезису непружної деформації демпфера. Запропонована теоретична модель добре узгоджується з експериментальними даними [77] (рис. 4.2). Відзначимо, що співвідношення (4.2) вносить суттєву нелінійність у динамічні рівняння (4.1).

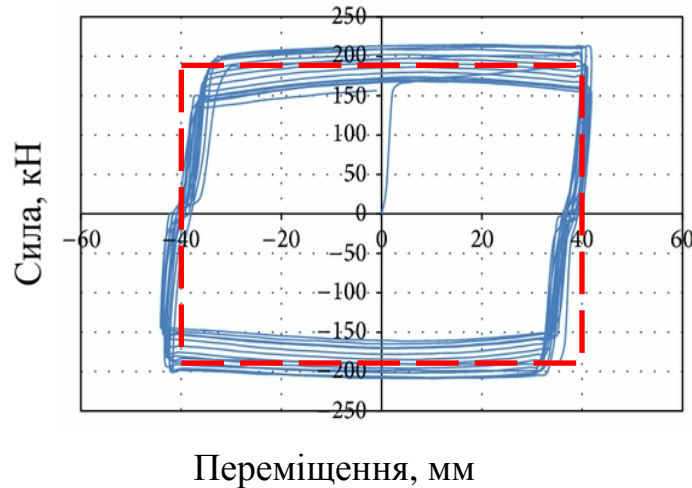


Рисунок 4.3 - Діаграма деформування демпфера сухого тертя. Червоний – теоретична модель (4.2); синій – експеримент [77]

### 4.3. Модальний аналіз та порівняння запропонованої моделі з розрахунками у програмному комплексі ЛІРА-САПР

Для підтвердження достовірності запропонованої розрахункової моделі, розглянемо вільні коливання конструкції без демпферів та внутрішнього тертя. Прийmemo  $C_k = F_k = 0$ ,  $M_k = M$ ,  $K_k = K$  та будемо шукати періодичний розв'язок у вигляді

$$u_0 = 0, u_k = A_k \sin(2\pi ft), \quad (4.3)$$

де  $A_k$  – амплітуди переміщень поверхів,  $f$  – частота коливань. Підставивши (4.3) у рівняння (4.1), одержуємо однорідну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для невідомих амплітуд  $A_k$ :



$$\begin{aligned}
 A_5 + (4\pi^2 f^2 M / K - 1) A_6 &= 0, \\
 A_4 + (4\pi^2 f^2 M / K - 2) A_5 + A_6 &= 0, \\
 A_3 + (4\pi^2 f^2 M / K - 2) A_4 + A_5 &= 0, \\
 A_2 + (4\pi^2 f^2 M / K - 2) A_3 + A_4 &= 0, \\
 A_1 + (4\pi^2 f^2 M / K - 2) A_2 + A_3 &= 0, \\
 (4\pi^2 f^2 M / K - 2) A_1 + A_2 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Система (4.4) має нетривіальний розв'язок тоді і тільки тоді, якщо визначник матриці, складеної з її коефіцієнтів, дорівнює нулю. Виконуючи дану умову, знаходимо характеристичне рівняння

$$\begin{aligned}
 4096\pi^{12}M^6f^{12} - 11264\pi^{10}KM^5f^{10} + 11520\pi^8K^2M^4f^8 - \\
 - 5376\pi^6K^3M^3f^6 + 1120\pi^4K^4M^2f^4 - 84\pi^2K^5Mf^2 + K^6 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Рівняння (4.5) дозволяє обчислити власні частоти конструкції (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Частоти та періоди власних коливань моделі  
із зосередженими масами

	1 форма	2 форма	3 форма	4 форма	5 форма	6 форма
Частота $f$ , Гц	2.96	8.70	13.9	18.4	21.7	23.8
Період $T$ , с	0.338	0.115	0.0719	0.0543	0.0461	0.0420

На рис. 4.4 одержані результати порівняно із даними чисельного розрахунку методом скінченних елементів, який виконано у програмному комплексі ЛІРА-САПР для вихідної 2D моделі (рис. 4.1). 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 [13], що спричиняє небезпеку виникнення резонансу під час землетрусу.

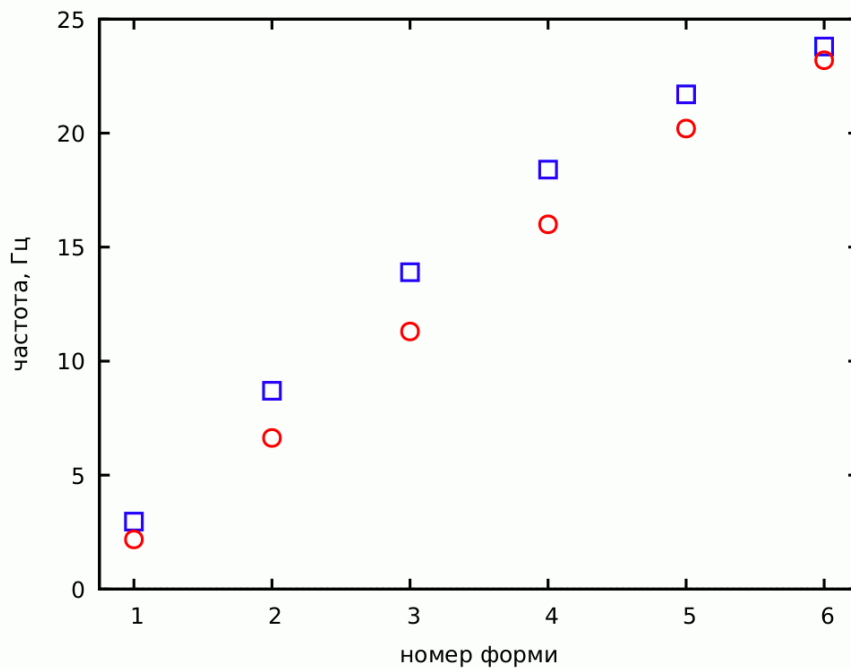


Рисунок 4.4 - Власні частоти вільних коливань: □ модель із зосередженими масами; ○ вихідна модель, розрахунок у програмному комплексі ЛІРА-САПР

На рис. 4.5 наведено перші шість форми власних коливань, визначені за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР для вихідної 2D моделі будинку. Аналіз характеру деформацій конструкції свідчить, що переважаючими є горизонтальні переміщення поверхів. Динамічний напружено-деформований стан будівлі визначається насамперед згинальними деформаціями колон. При цьому поздовжні деформації конструктивних елементів, спричинені коливаннями, є незначними і у першому наближенні ними можна знехтувати. Це підтверджує справедливість фізичних припущень, покладених в основу моделі із зосередженими масами. Зауважимо, що зі збільшенням частоти точність даної моделі буде зменшуватися.

В наступному розділі запропонована модель використовується для досліджень нестационарних коливань каркасних будівель.

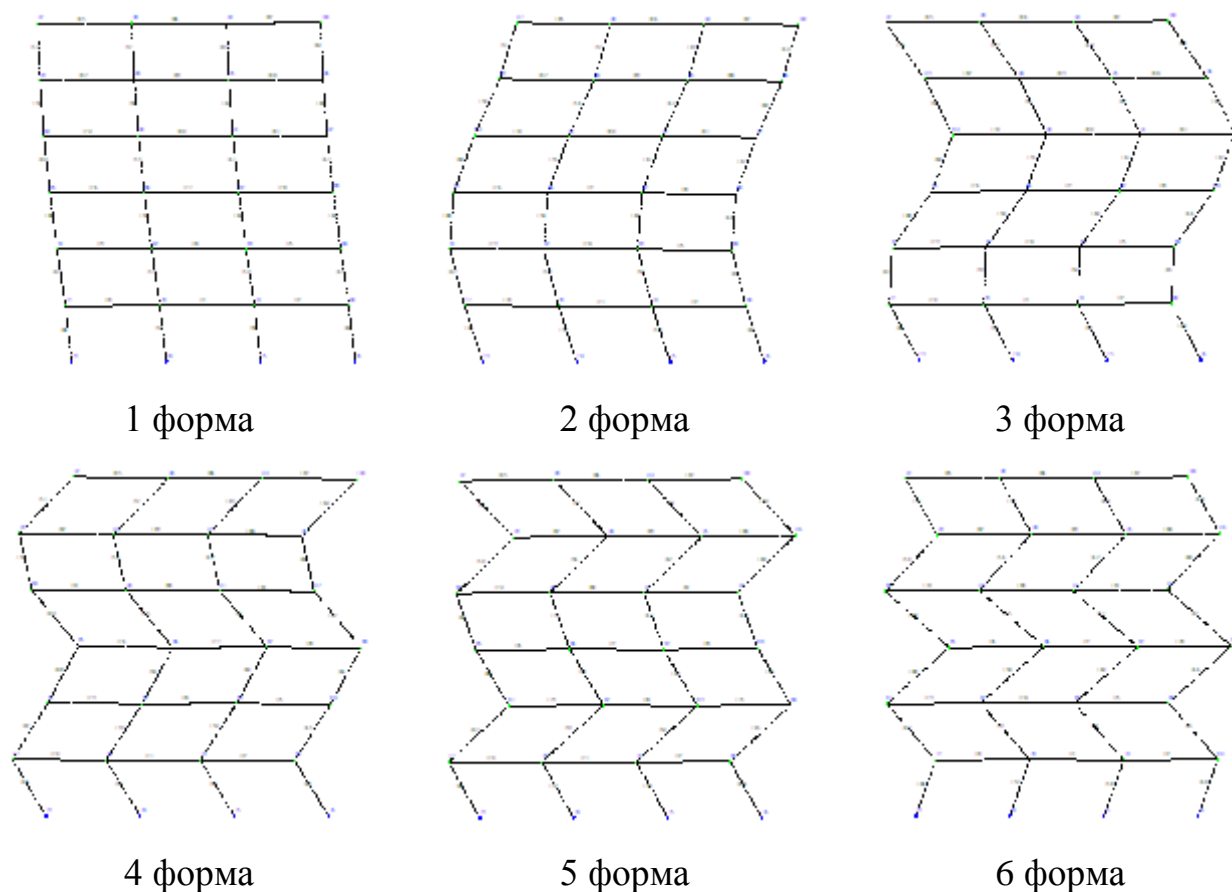


Рисунок 4.5 - Форми власних коливань, визначені у програмному комплексі ЛІРА-САПР

#### 4.4. Застосування методу Рунге-Кутти для динамічних розрахунків каркасних будівель

У подальшому нелінійні рівняння руху (4.1), доповнені відповідними початковими умовами, інтегровано чисельно за допомогою методу Рунге-Кутти четвертого порядку. Чисельна процедура зводиться до наступного.

Шляхом заміни змінних  $\dot{u}_k = v_k$ , запишемо шість диференціальних рівнянь руху другого порядку (4.1) у вигляді дванадцяти диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\dot{u}_k = Q_k(v_k), \quad \dot{v}_k = R_k(u_{k-1}, u_k, u_{k+1}, v_{k-1}, v_k, v_{k+1}), \quad (4.6)$$

де

$$Q_k(v_k) = v_k,$$

$$R_k(u_{k-1}, u_k, u_{k+1}, v_{k-1}, v_k, v_{k+1}) = -\frac{1}{M_k} \left[ K_k(u_k - u_{k-1}) + C_k(v_k - v_{k-1}) + F_k - \right. \\ \left. - K_{k+1}(u_{k+1} - u_k) - C_{k+1}(v_{k+1} - v_k) - F_{k+1} \right].$$

Фізичний зміст введених змінних:  $v_k$  – швидкості поверхів;  $v_0$  – швидкість основи.

Дискретизуємо інтервал інтегрування  $0 \leq t \leq t_{\max}$  сіткою з кроком  $\Delta t$ , так що  $t = m\Delta t$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Позначимо значення функцій, що розшуковуються, у вузлах сітки наступним чином:  $u_k^{(m)} = u_k(m\Delta t)$ ,  $v_k^{(m)} = v_k(m\Delta t)$ . Початкові умови мають вигляд:  $u_0(0) = u_0^{(0)}$ ,  $u_k(0) = u_k^{(0)}$ ,  $v_0(0) = v_0^{(0)}$ ,  $v_k(0) = v_k^{(0)}$ . Знаючи  $u_0^{(0)}$ ,  $u_k^{(0)}$ ,  $v_0^{(0)}$ ,  $v_k^{(0)}$ , розв'язок системи (4.6) обчислюється за ітераційними формулами [29]:

$$u_k^{(m+1)} = u_k^{(m)} + \frac{1}{6}(p_1 + 2p_2 + 2p_3 + p_4), \quad (4.7)$$

$$v_k^{(m+1)} = v_k^{(m)} + \frac{1}{6}(s_1 + 2s_2 + 2s_3 + s_4),$$

де

$$p_1 = Q_k(v_k^{(m)})\Delta t, \quad (4.8)$$

$$s_1 = R_k(u_{k-1}^{(m)}, u_k^{(m)}, u_{k+1}^{(m)}, v_{k-1}^{(m)}, v_k^{(m)}, v_{k+1}^{(m)})\Delta t,$$

$$p_2 = Q_k\left(v_k^{(m)} + \frac{s_1}{2}\right)\Delta t,$$

$$s_2 = R_k\left(u_{k-1}^{(m)} + \frac{p_1}{2}, u_k^{(m)} + \frac{p_1}{2}, u_{k+1}^{(m)} + \frac{p_1}{2}, v_{k-1}^{(m)} + \frac{s_1}{2}, v_k^{(m)} + \frac{s_1}{2}, v_{k+1}^{(m)} + \frac{s_1}{2}\right)\Delta t,$$

$$p_3 = Q_k \left( v_k^{(m)} + \frac{s_2}{2} \right) \Delta t,$$

$$s_3 = R_k \left( u_{k-1}^{(m)} + \frac{p_2}{2}, u_k^{(m)} + \frac{p_2}{2}, u_{k+1}^{(m)} + \frac{p_2}{2}, v_{k-1}^{(m)} + \frac{s_2}{2}, v_k^{(m)} + \frac{s_2}{2}, v_{k+1}^{(m)} + \frac{s_2}{2} \right) \Delta t,$$

$$p_4 = Q_k \left( v_k^{(m)} + s_3 \right) \Delta t,$$

$$s_4 = R_k \left( u_{k-1}^{(m)} + p_3, u_k^{(m)} + p_3, u_{k+1}^{(m)} + p_3, v_{k-1}^{(m)} + s_3, v_k^{(m)} + s_3, v_{k+1}^{(m)} + s_3 \right) \Delta t.$$

У наступному розділі динамічні розрахунки каркасних будівель методом Рунге-Кутти виконано у середовищі комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Махіта. Чисельну процедуру (4.7), (4.8) реалізовано із використанням бібліотек стандартних підпрограм. Розроблений програмний код наведено у додатку Г.

#### 4.5. Верифікація чисельної процедури динамічного розрахунку

Для перевірки запропонованої чисельної процедури, розглянемо модельну задачу про згасаючі власні коливання системи з одним ступенем вільності за відсутності демпферів сухого тертя. Відповідно до (4.1), рівняння руху має вигляді:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0. \quad (4.9)$$

Заміна змінної  $\dot{u} = v$  дозволяє перейти від диференційного рівняння другого порядку (4.9) до системи двох диференційних рівнянь першого порядку:

$$\dot{u} = Q(v), \quad \dot{v} = R(u, v), \quad (4.10)$$

де  $Q(v) = v$ ,  $R(u, v) = -(Ku + Cv)/M$ .

Відповідно до методу Рунге-Кутти, чисельний розв'язок системи (4.10) можна знайти за наступними ітераційними формулами:

$$\begin{aligned} u^{(m+1)} &= u^{(m)} + \frac{1}{6}(p_1 + 2p_2 + 2p_3 + p_4), \\ v^{(m+1)} &= v^{(m)} + \frac{1}{6}(s_1 + 2s_2 + 2s_3 + s_4), \end{aligned} \quad (4.11)$$

де

$$\begin{aligned} p_1 &= Q(v^{(m)})\Delta t, \quad s_1 = R(u^{(m)}, v^{(m)})\Delta t, \\ p_2 &= Q\left(v^{(m)} + \frac{s_1}{2}\right)\Delta t, \quad s_2 = R\left(u^{(m)} + \frac{p_1}{2}, v^{(m)} + \frac{s_1}{2}\right)\Delta t, \\ p_3 &= Q\left(v^{(m)} + \frac{s_2}{2}\right)\Delta t, \quad s_3 = R\left(u^{(m)} + \frac{p_2}{2}, v^{(m)} + \frac{s_2}{2}\right)\Delta t, \\ p_4 &= Q(v^{(m)} + s_3)\Delta t, \quad s_4 = R(u^{(m)} + p_3, v^{(m)} + s_3)\Delta t. \end{aligned} \quad (4.12)$$

У співвідношеннях (4.11), (4.12)  $m$  – номер ітерації,  $m = 0, 1, 2, \dots$ ;  $u^{(m)} = u(m\Delta t)$ ;  $v^{(m)} = v(m\Delta t)$ . Значення  $u^{(0)}$ ,  $v^{(0)}$  визначаються з початкових умов:  $u^{(0)} = u(0)$ ,  $v^{(0)} = v(0)$ .

Модельна задача, що розглядається, може бути розв'язана аналітично. Прийmemo наступні початкові умови:

$$u(0) = A, \quad v(0) = 0, \quad (4.13)$$

де  $A$  – початкова амплітуда коливань. Щоб задовільнити умови (4.13), розв'язок рівняння (4.9) представимо у вигляді

$$u = Ae^{-\beta t} \cos(2\pi ft), \quad (4.14)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт згасання;  $f$  – частота коливань.

Величини  $\beta$  і  $f$  є власними значеннями задачі (4.9), (4.13). Підставивши анзац (4.14) у рівняння (4.9) і прирівнявши до нуля коефіцієнти при членах виду  $\cos(2\pi ft)$ ,  $\sin(2\pi ft)$ , знаходимо

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M} - \beta^2}, \quad (4.15)$$

$$\beta = \frac{C}{2M}. \quad (4.16)$$

Для наведених у п. 4.2 значень маси поверху  $M = 1.20 \cdot 10^4$  кг, жорсткості  $K = 7.13 \cdot 10^7$  Н/м та коефіцієнту в'язкості  $C = 8.84 \cdot 10^4$  Н·с/м, знаходимо  $f = 12.2$  Гц і  $\beta = 3.68$  с<sup>-1</sup>. Період коливань складає  $T = 1/f = 0.0820$  с.

Зазначимо, що коефіцієнт згасання майже не впливає на частоту власних коливань. Якщо у формулі (4.15) прийняти  $\beta = 0$ , одержимо  $f = 12.3$  Гц. При цьому похибка розв'язку становить усього 0.11%, а при округленні до трьох значущих збільшується до 0.82%.

На рис. 4.6–4.8 одержані чисельний (4.11), (4.12) і аналітичний (4.14)–(4.16) розв'язки порівнюються між собою при різних значеннях кроку інтегрування  $\Delta t$ . Моделювання виконано на часовому інтервалі  $t_{\max} = 10T = 0.82$  с. Червоним позначено результати інтегрування методом Рунге-Кутти, а синім – розрахунки за формулою (4.14).

При великих значеннях кроку інтегрування,  $\Delta t > 0.02$  с, чисельна процедура розходиться вже на перших ітераціях. При  $\Delta t = 0.02$  с чисельний розрахунок стабілізується і наближено відтворює якісний характер динамічної поведінки системи (рис. 4.6). Але точність розв'язку низька. Чисельні та аналітичні дані узгоджуються на дуже короткому часовому інтервалі впродовж приблизно половини першого періоду коливань. Зі зменшенням кроку інтегрування,  $\Delta t = 0.015$  с, область практичної придатності чисельного розв'язку збільшується до 2–3 періодів коливань (рис. 4.7).

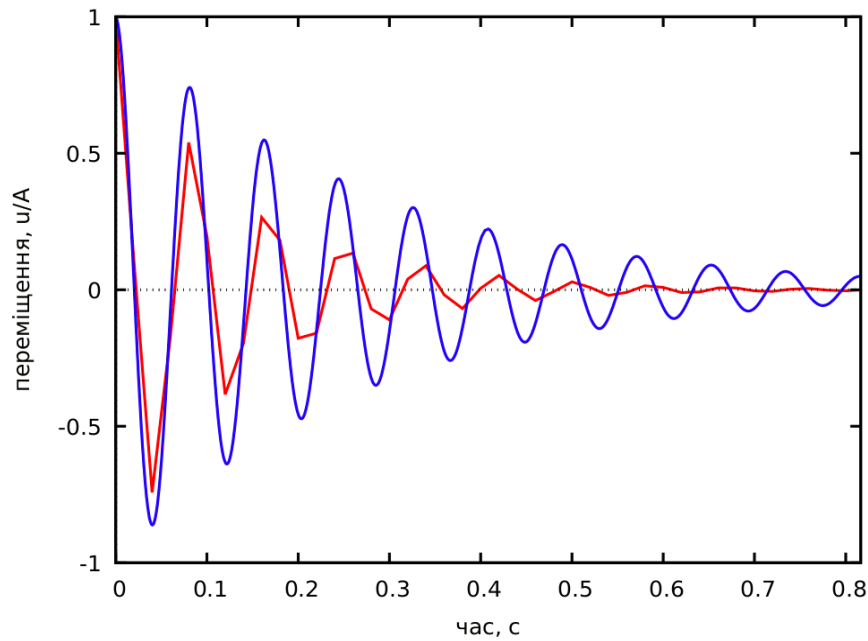


Рисунок 4.6 - Безрозмірні переміщення динамічної системи з одним ступенем вільності:  $\Delta t = 0.02$  с

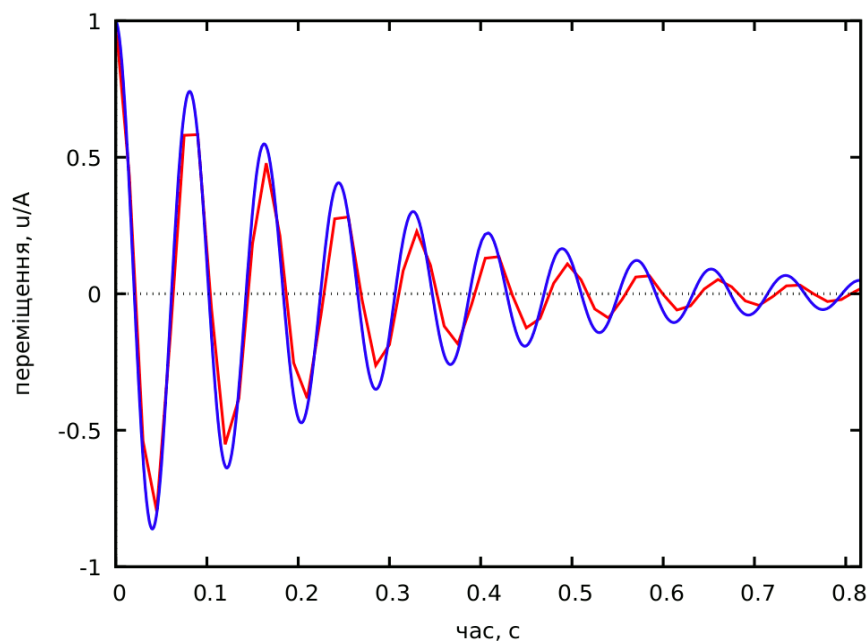


Рисунок 4.7 - Безрозмірні переміщення динамічної системи з одним ступенем вільності:  $\Delta t = 0.015$  с

Подальше зменшення кроку інтегрування до  $\Delta t = 0.01$  с дозволяє досягнути високої точності чисельного розв'язку. Результати інтегрування методом Рунге-Кутти візуально практично співпадають із точним аналітичним розв'язком на заданому часовому інтервалі  $t_{\max} = 10T = 0.82$  с (рис. 4.8).



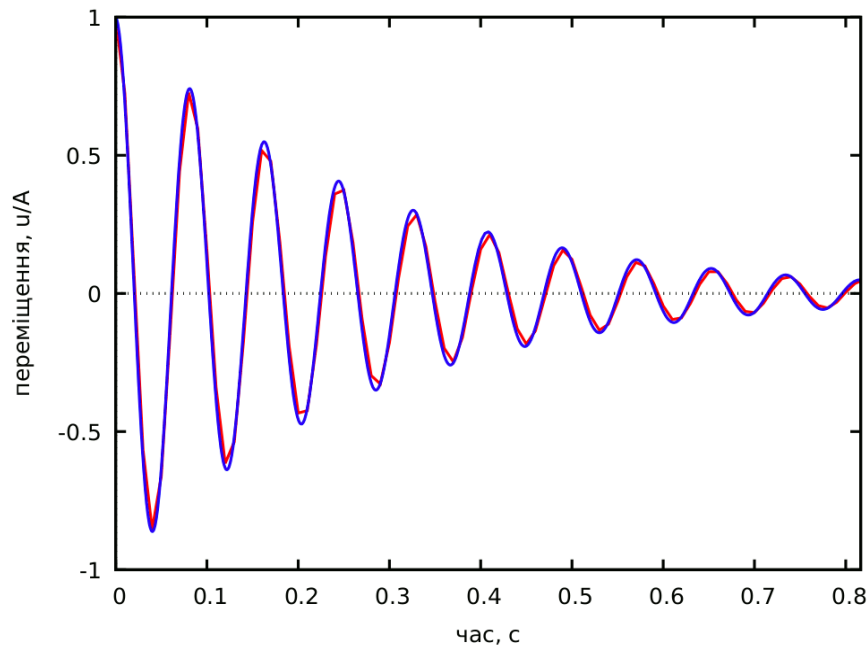


Рисунок 4.8 - Безрозмірні переміщення динамічної системи з одним ступенем вільності;  $\Delta t = 0.01$  с

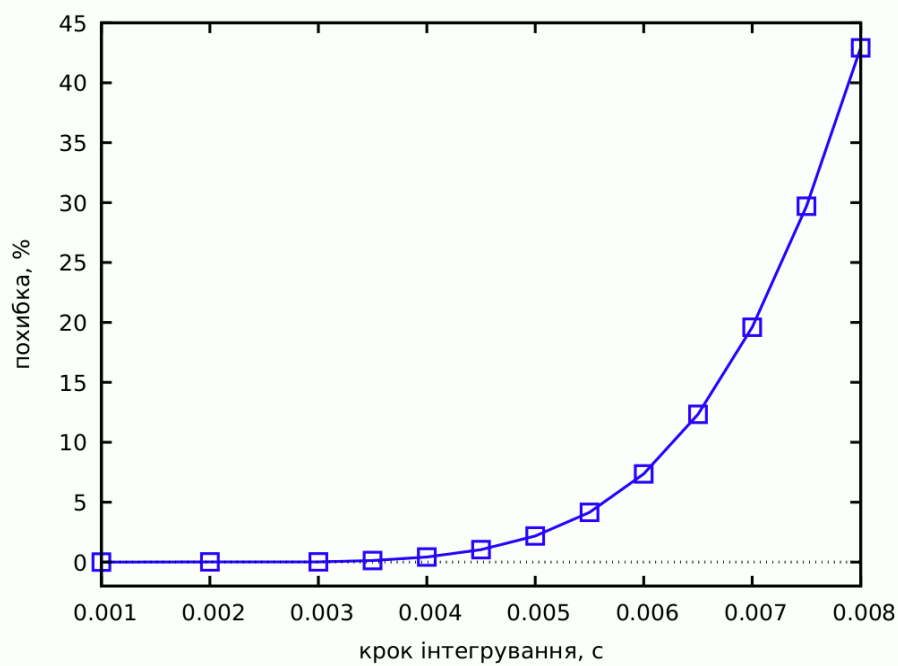


Рисунок 4.9 – Відносна похибка методу Рунге-Кутти

На рис. 4.9 наведено залежність відносної похибки чисельного розв'язку від величини кроку інтегрування  $\Delta t$ . Порівняно результати для переміщення  $u$  у момент часу  $t_{\max} = 100T = 8.20$  с після початку коливань. Аналіз одержаних результатів дозволяє зробити висновок, що дана залежність близька до експоненційної.

#### 4.6. Висновки по розділу 4

1. Розроблено наближену аналітичну модель, що описує динамічну поведінку багатопверхових будівель. Розглянуто 2D модель шестипверхового каркасного будинку. Розрахункову схему прийнято у вигляді вертикального консольного стрижня із зосередженими масами, які розташовані на рівні перекриттів та можуть переміщуватись у горизонтальному напрямку. Складено систему вихідних диференціальних рівнянь руху конструкції. Реакцію демпферів сухого тертя описано за допомогою прямокутної петлі гістерезису непружної деформації, що добре узгоджується з відомими експериментальними даними. Зазначимо, що наявність демпферів вносить суттєву нелінійність у систему вихідних рівнянь руху.

2. Для підтвердження достовірності запропонованої аналітичної моделі, виконано порівняння обчислених на її основі частот власних коливань із результатами модального аналізу вихідної конструкції у ПК ЛІРА-САПР. Знайдені аналітичні та чисельні розв'язки добре узгоджуються 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 моделі із зосередженими масами.

3. Для чисельного інтегрування вихідної системи нелінійних диференціальних рівнянь руху запропоновано використання методу Рунге-Кутти. Шляхом відповідної заміни змінних, шість диференціальних рівнянь руху другого порядку зведено до дванадцяти диференціальних рівнянь першого порядку. Часовий інтервал дискретизовано сіткою із заданим кроком. Наведено розрахункові формули, що дозволяють обчислити значення питомих функцій у вузлах сітки. Запропоновану чисельну процедуру реалізовано у системі

комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima з використанням бібліотек стандартних підпрограм.

4. 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.

#### **4.7. Список використаних джерел у розділі 4**

У розділі 4 використано джерела [13, 29, 77]. Їх найменування наведені у загальному списку використаних джерел.

## РОЗДІЛ 5. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ ДЕМПФЕРІВ У КАРКАСНИХ БУДІВЛЯХ ПРИ ПЕРІОДИЧНИХ ТА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

### 5.1. Розв'язання задачі оптимізації у випадку періодичного резонансного навантаження

У даному розділі розглянемо випадок, коли у центральному прольоті шестиповерхового будинку (рис. 4.1) може бути встановлено три демпфера. Сума зусиль тертя демпферів дорівнює половині ваги конструкції [80], тоді зусилля одного демпфера складає  $N = 120$  кН.

Розглянемо дві цільові функції, які необхідно мінімізувати: переміщення поверхів

$$\max [u_k(k_1, k_2, k_3)] \rightarrow \min \quad (5.1)$$

та відносні перекося поверхів

$$\max [d_k(k_1, k_2, k_3)] = \max \left( \frac{|u_k - u_{k-1}|}{h_k} \right) \rightarrow \min . \quad (5.2)$$

Тут  $h_k$  – висота поверху;  $k_1, k_2, k_3$  – номери поверхів, на яких можуть бути встановлено демпфери. Умови обмежень мають вигляд:

$$1 \leq k_1, k_2, k_3 \leq 6 . \quad (5.3)$$

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. Прийmemo наступні початкові умови:

$$u_k(0) = \dot{u}_k(0) = 0, \quad 0 \leq k \leq 6; \quad (5.4)$$

$$\dot{u}_k(0) = 0, \quad 1 \leq k \leq 6. \quad (5.5)$$

Тоді

$$\ddot{u}_0 = a_0 \sin(2\pi ft), \quad (5.6)$$

де  $f = 2.96$  Гц (табл. 4.1). Інтегруючи вираз (5.6) з урахуванням умови (5.4), одержуємо формули для швидкостей  $\dot{u}_0$  та переміщень  $u_0$  основи:

$$\dot{u}_0 = -\frac{a_0}{2\pi f} \cos(2\pi ft), \quad u_0 = -\frac{a_0}{4\pi^2 f^2} \sin(2\pi ft). \quad (5.7)$$

Систему диференціальних рівнянь руху (4.1), доповнену початковими умовами (5.4), (5.5) і співвідношеннями (5.6), (5.7), інтегровано чисельно за допомогою методу Рунге-Кутти (п. 4.4). Крок інтегрування прийнято рівним  $\Delta t = 0.001$  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 (табл. 4.1). 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. Розв'язуючи задачі оптимізації (5.1), (5.3) та (5.2), (5.3), одержано однаковий результат:  $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ . Таким чином, мінімальні переміщення та мінімальні перекося поверхів досягаються при встановленні трьох демпферів на першому поверсі. 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. 5.1, 5.2 наведено результати для максимальних переміщень та перекосів поверхів. Позначено: 1 – конструкція без демпферів, 2 – рівномірний розподіл зусиль демпферів по всім поверхам, 3 – раціональне розташування демпферів.

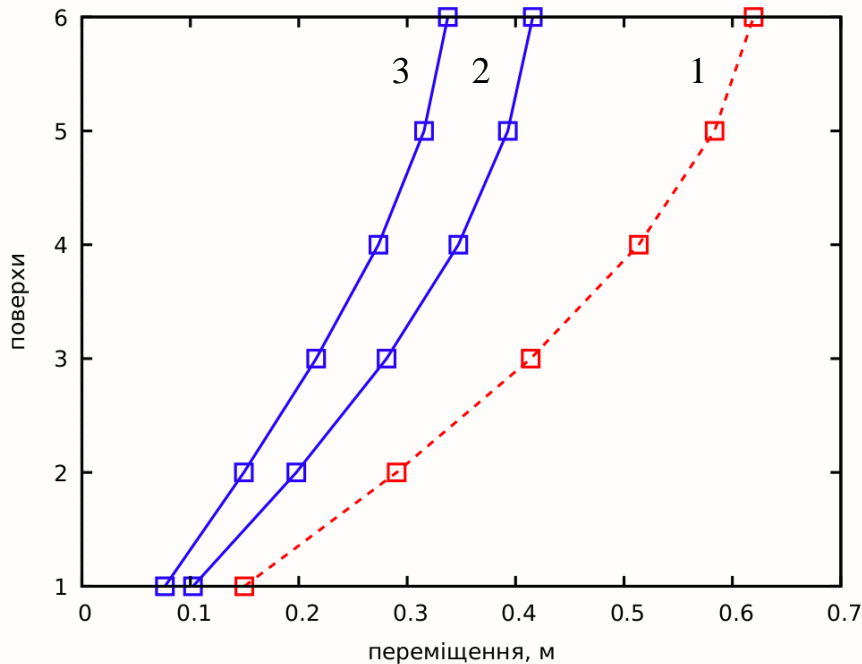


Рисунок 5.1 - Переміщення поверхів під дією періодичного навантаження

## 5.2. Математична модель сейсмічного навантаження

Навантаження, що виникають внаслідок землетрусів, носять стохастичний характер. Відповідно до методів математичної статистики, такі фізичні явища можуть бути представлені у вигляді гауссовського процесу – сукупності випадкових величин із нормальним законом розподілу [79]. 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 нормативних вимог [13]. Прискорення ґрунту опишемо стохастичним гауссовським процесом у вигляді суперпозиції гармонічних хвиль із дискретно заданими частотами  $f_j$  і випадковими фазами  $\varphi_j$ :

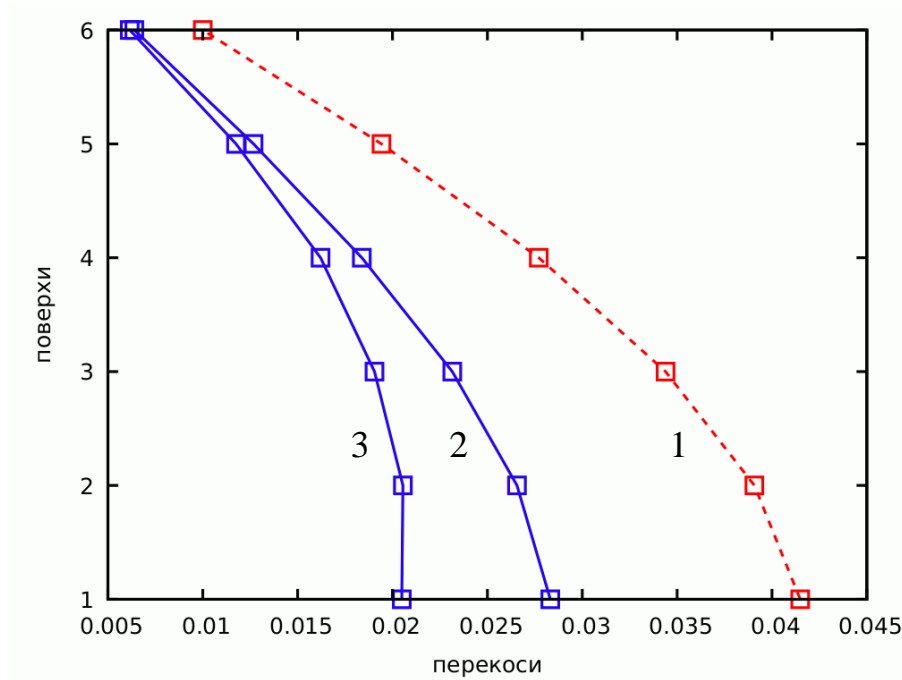


Рисунок 5.2 - Перекоси поверхів під дією періодичного навантаження

$$\ddot{u}_0 = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \sqrt{2S(f_j)\Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \varphi_j), \quad (5.8)$$

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.

Спектральну гуштину енергії землетрусу визначено за допомогою емпіричної моделі Канаї-Таїмі [70, 81]:

$$S(f) = S_0 \frac{1 + 4\zeta_g^2 (f/f_g)^2}{\left[1 - (f/f_g)^2\right]^2 + 4\zeta_g^2 (f/f_g)^2}, \quad S_0 = \frac{a_p^2}{p_g^2 \pi^2 f_g \left[2\zeta_g + (2\zeta_g)^{-1}\right]}. \quad (5.9)$$

У формулах (5.9)  $f_g$  – переважуюча 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. 5.1). На рис. 5.3 наведено розподіл енергії землетрусу в залежності від частоти для різних типів ґрунтів. М'які ґрунти характеризуються високою концентрацією сейсмічної енергії на низьких частотах 1...1.5 Гц. Для скельних ґрунтів характерним є більш рівномірний розподіл енергії, яка досягає максимуму в діапазоні приблизно 2...6 Гц. Акселерограми землетрусів, побудовані на основі моделі (5.8)–(5.9), представлено на рис. 5.4.

Таблиця 5.1 - Динамічні параметри ґрунтів [78]

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

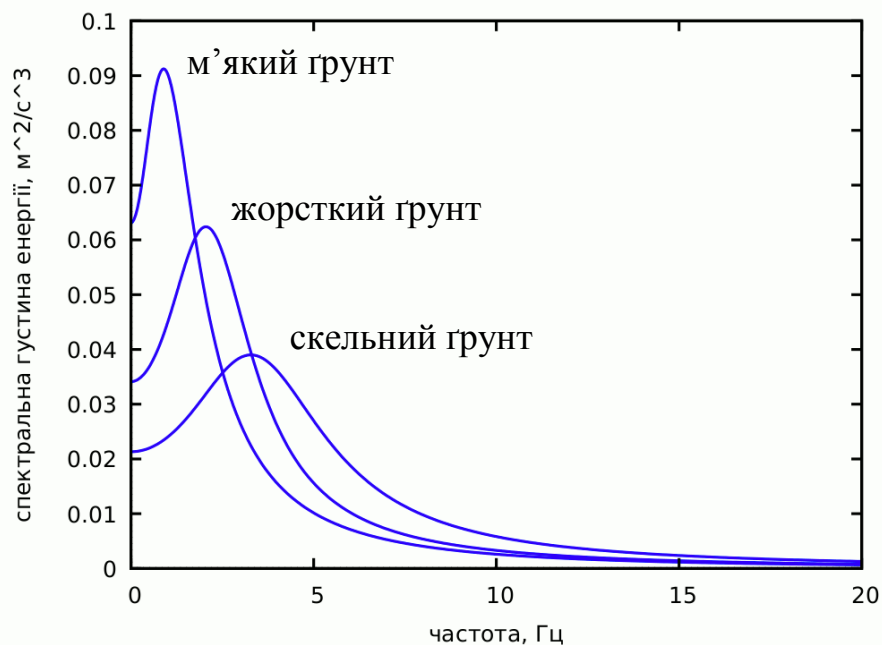
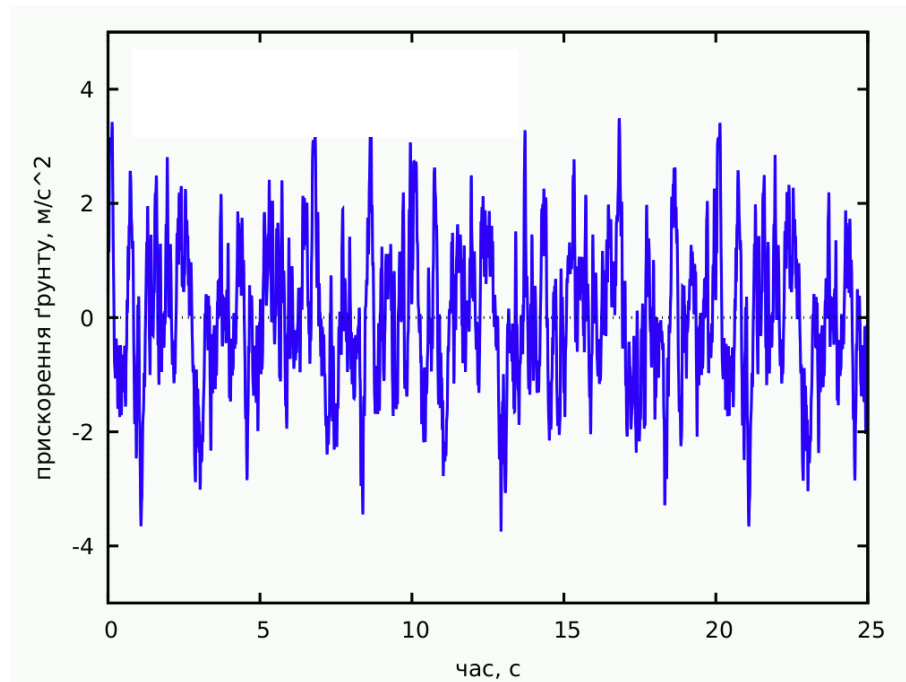


Рисунок 5.3 - Спектральна густина  $S(f)$  енергії землетрусу





*a)* м'який ґрунт

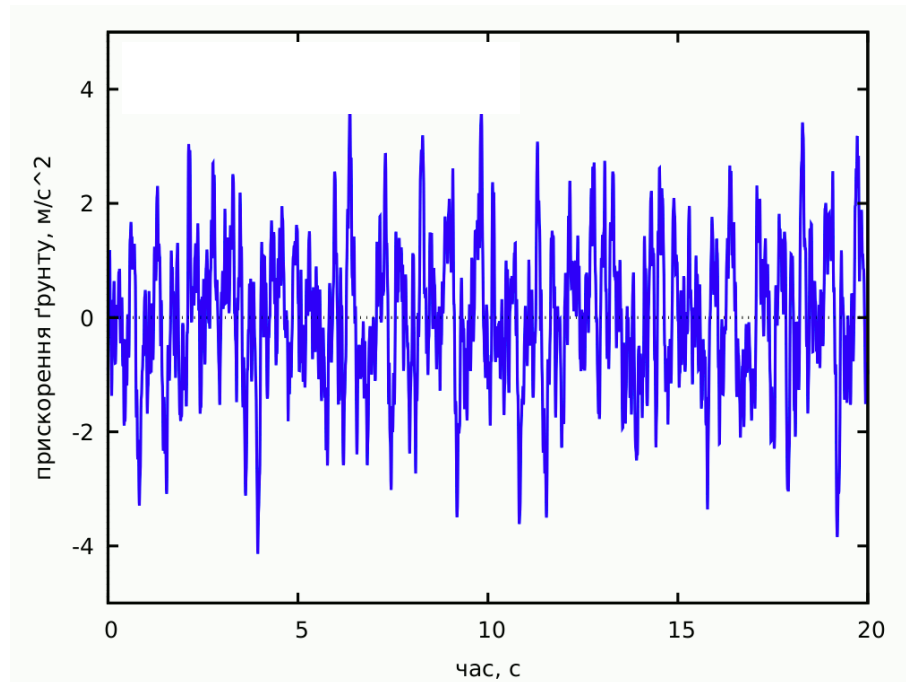
Рисунок 5.4 - Акселерограми для різних типів ґрунтів

### 5.3. Розв'язання задачі оптимізації у випадку сейсмічного навантаження

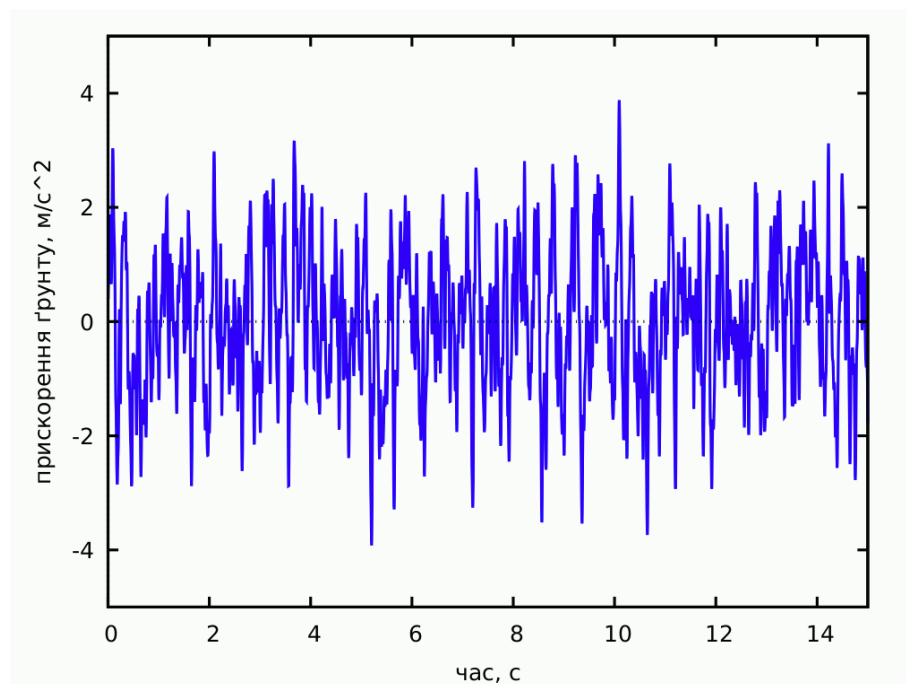
Чисельні розв'язки, що описують коливання будинку під дією сейсмічного навантаження, одержано шляхом інтегрування рівнянь руху (4.1) методом Рунге-Кутти (п. 4.4) з урахуванням співвідношення (5.8) і початкових умов

$$u_0(0) = 0, u_k(0) = \dot{u}_k(0) = \ddot{u}_k(0) = 0, 1 \leq k \leq 6.$$

Крок інтегрування  $\Delta t = 0.001$  с, точність одержаних розв'язків для  $u_k$  складає три значущих цифри. Інтервал інтегрування дорівнює розрахунковій тривалості землетрусу (табл. 5.1).



б) жорсткий ґрунт



в) скельний ґрунт

Рисунок 5.4 - Акселерограми для різних типів ґрунтів (продовження)

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. Розв'язок задачі (5.1), (5.3) (мінімізація переміщень поверхів)

передбачає встановлення демпферів на поверхах 1, 3, 4; а розв’язок задачі (5.2), (5.3) (мінімізація перекосів) – на поверхах 1, 2, 3. В останньому випадку також досягнуто найменших прискорень поверхів, що робить такий варіант кращим.

Одержані результати для перекосів та прискорень поверхів будинку із залізобетонним каркасом наведено на рис. 5.5–5.8. Червоні лінії відповідають конструкції без демпферів, а сині – знайденому раціональному розташуванню демпферів на поверхах 1, 2, 3.

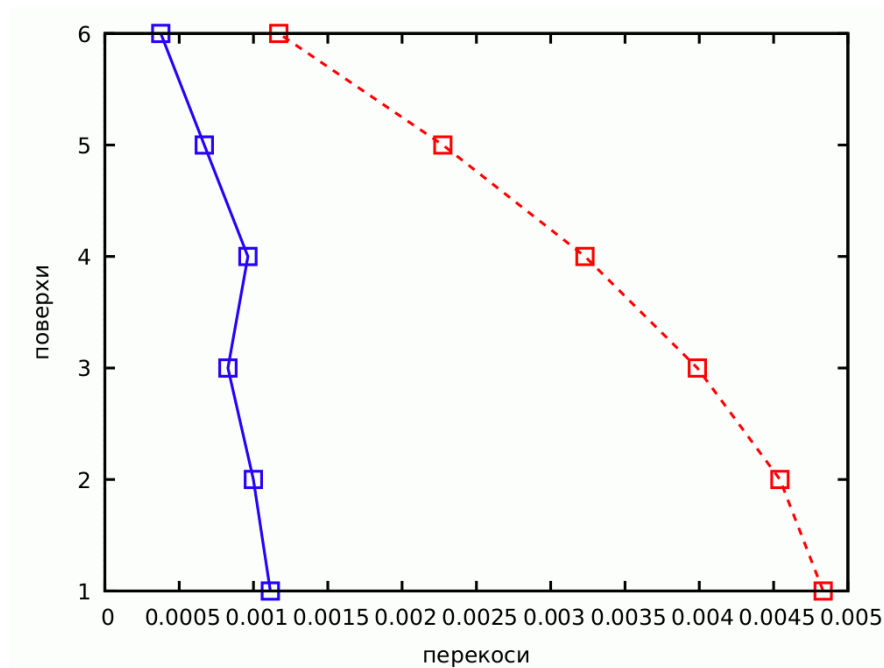


Рисунок 5.5 - Перекози поверхів будинку під дією сейсмічного навантаження

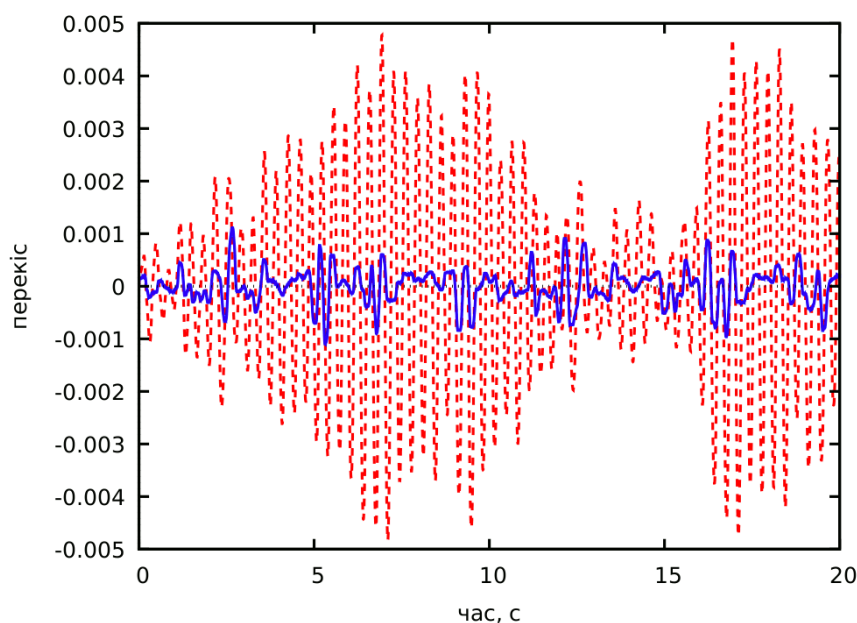


Рисунок 5.6 - Перекіс 1-го поверху будинку під дією сейсмічного навантаження

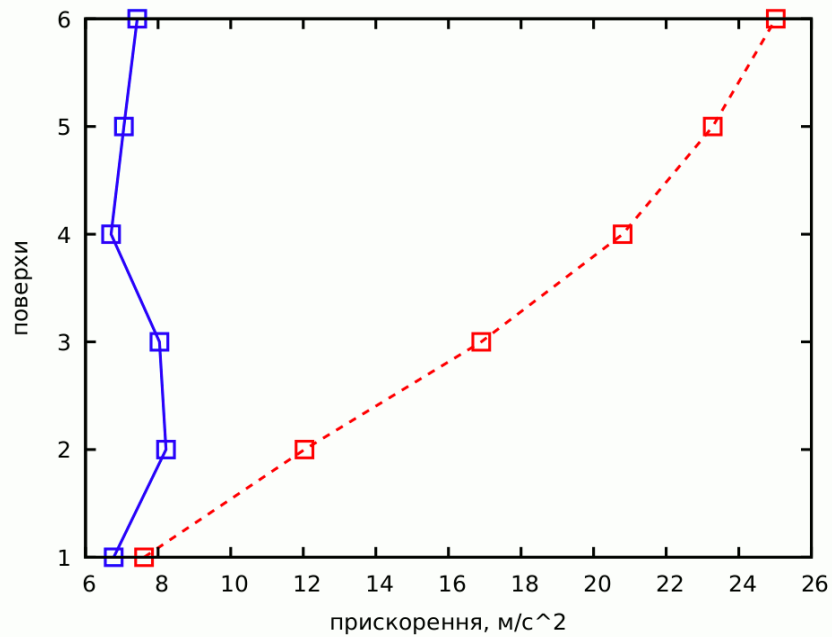


Рисунок 5.7 - Прискорення поверхів під дією сейсмічного навантаження

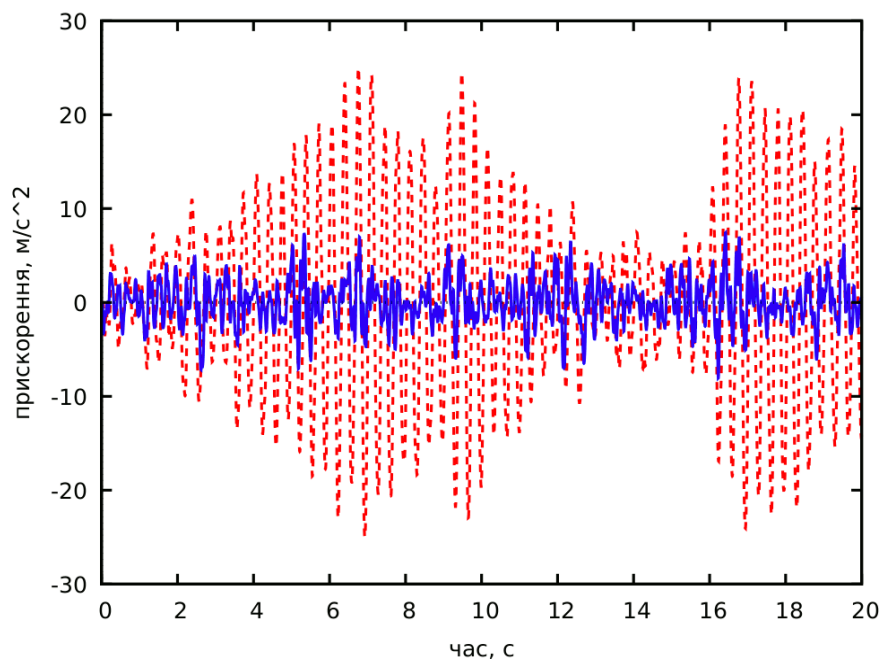


Рисунок 5.8 - Прискорення 6-го поверху під дією сейсмічного навантаження

#### 5.4. Динамічні характеристики шестиповерхового полімербетонного будинку

Розглянемо динамічні характеристики шестиповерхового будинку (рис. 4.1), каркас якого виготовлений із полімербетону. Для аналізу використовується наближена розрахункова схема у вигляді моделі із

зосередженими масами (рис. 4.2). Поперечні розміри конструктивних елементів задано співвідношеннями (3.4). Залежність ваги споруди від коефіцієнту підвищення міцності  $\eta$  наведено на рис. 5.9. Збільшення міцності матеріалу у 5 разів і відповідне зменшення площини перерізів колон та ригелів (із дотриманням умов міцності (3.1), (3.2)) дозволяє знизити вагу конструкції у 3.6 рази.

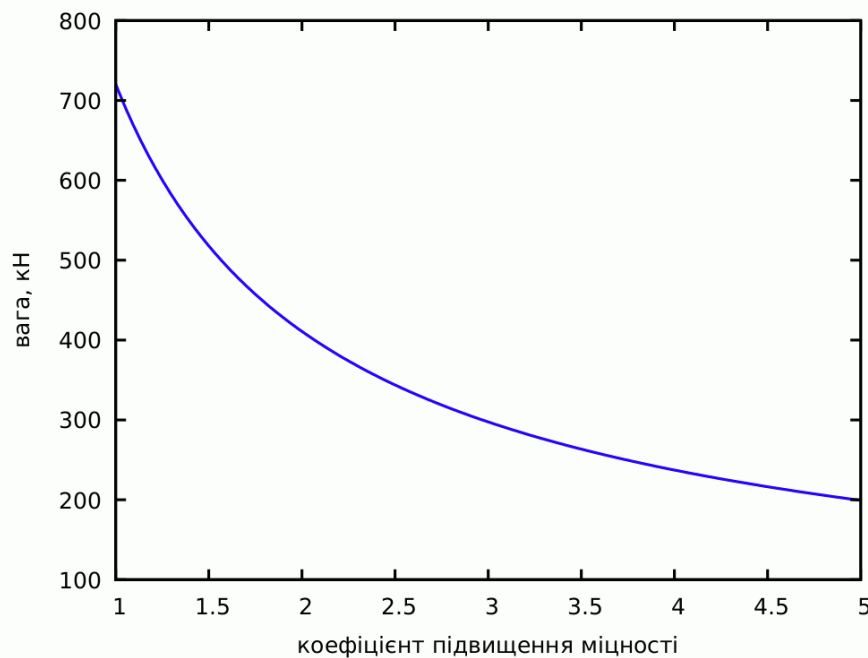


Рисунок 5.9 - Вага шестиповерхового будинку з полімербетонним каркасом

Частоти власних коливань полімербетонного будинку визначено за методикою, наведеною у п. 4.3. Одержані результати представлено на рис. 5.10. Цифрами позначено номери форм коливань. Підвищення міцності матеріалу каркасу у 5 разів призводить до зниження значень власних частот у 2.6 рази. При цьому періоди усіх шести форм власних коливань потрапляють до діапазону переважаючих періодів сейсмічних акселерограм 0.1...2 с, що загалом призводить до зниження сейсмостійкості будівлі. Можна зробити висновок, що підвищення міцності матеріалу будівлі разом із відповідним зменшенням перетинів конструктивних елементів та їх маси у кінцевому результаті призводить до зменшення частот власних коливань.

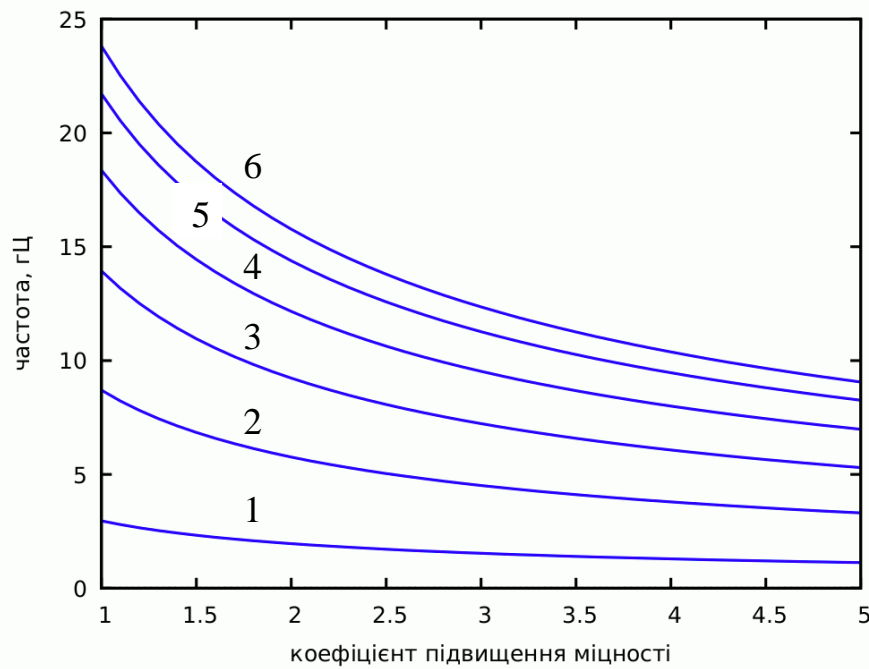


Рисунок 5.10 - Частоти власних коливань шести поверхового будинку з полімербетонним каркасом: 1...6 – номери форм коливань

### 5.5. Динамічна реакція полімербетонного будинку на дію періодичного навантаження

У випадку періодичного навантаження, прискорення основи будинку задано формулою (5.6), де частота навантаження  $f$  дорівнює частоті першої форми власних коливань і  $a_0 = 0.4g$ . Швидкості та переміщення основи визначаються співвідношеннями (5.7), а початкові умови мають вигляд (5.4) (5.5). Систему рівнянь руху (4.1), (5.4)–(5.7) інтегровано чисельно за допомогою методу Рунге-Кутти (п. 4.4). Крок інтегрування дорівнює  $\Delta t = 0.001$  с; інтервал інтегрування складає  $t_{\max} = 80T$  с, де  $T$  – період першої форми власних коливань. За цей час коливання будинку виходять на стаціонарний режим і амплітуди переміщень досягають максимуму.

Одержані результати для переміщень та перекосів поверхів полімербетонного будинку без демпферів наведено на рис. 5.11, 5.12. Розрахунки виконано для різних значень коефіцієнту підвищення міцності  $\eta$ .

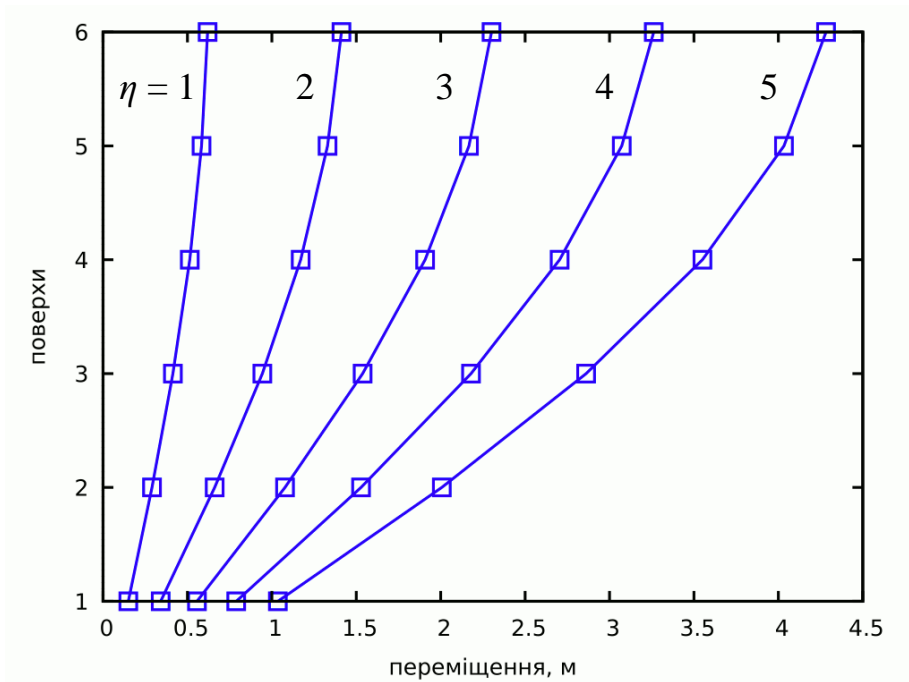


Рисунок 5.11 - Переміщення поверхів будинку з полімербетонним каркасом під дією періодичного навантаження

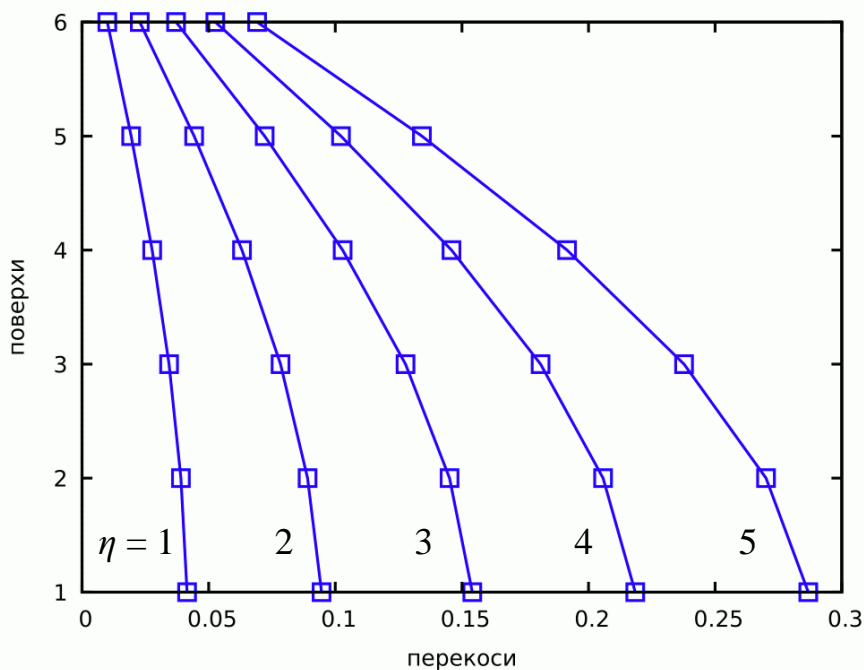


Рисунок 5.12 - Перекося поверхів будинку з полімербетонним каркасом під дією періодичного навантаження

На рис. 5.13, 5.14 представлено залежності максимальних переміщень (на 6-му поверсі) та максимальних перекося (на 1-му поверсі) у будинку без демпферів від коефіцієнту  $\eta$ . Дані залежності дуже близькі до лінійних. Таким

чином, якісний характер одержаних розв'язків добре узгоджується з результатами чисельного моделювання динамічних характеристик полімербетонних будівель у ПК ЛІРА-САПР (рис. 3.12).

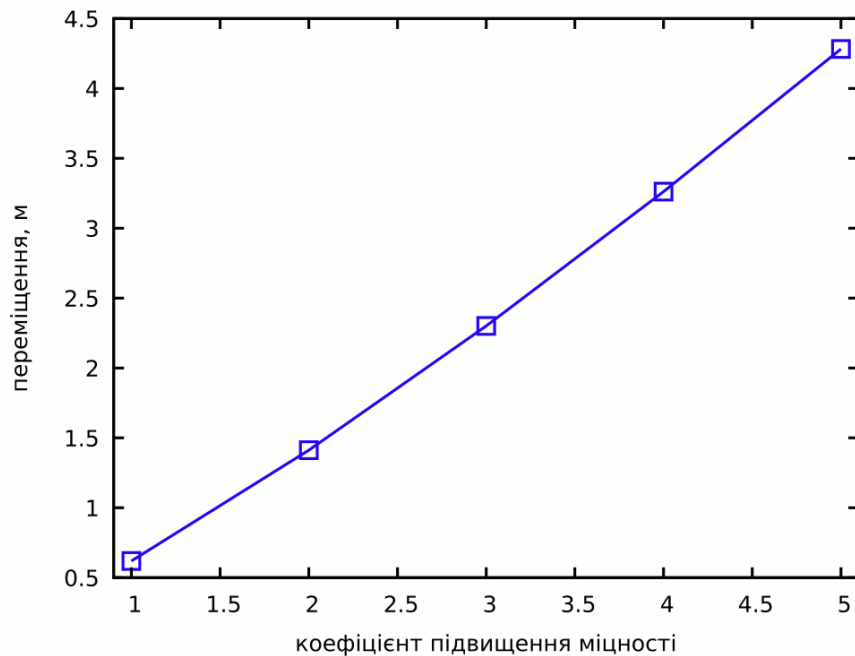


Рисунок 5.13 - Переміщення 6-го поверху будинку з полімербетонним каркасом під дією періодичного навантаження без депмферів

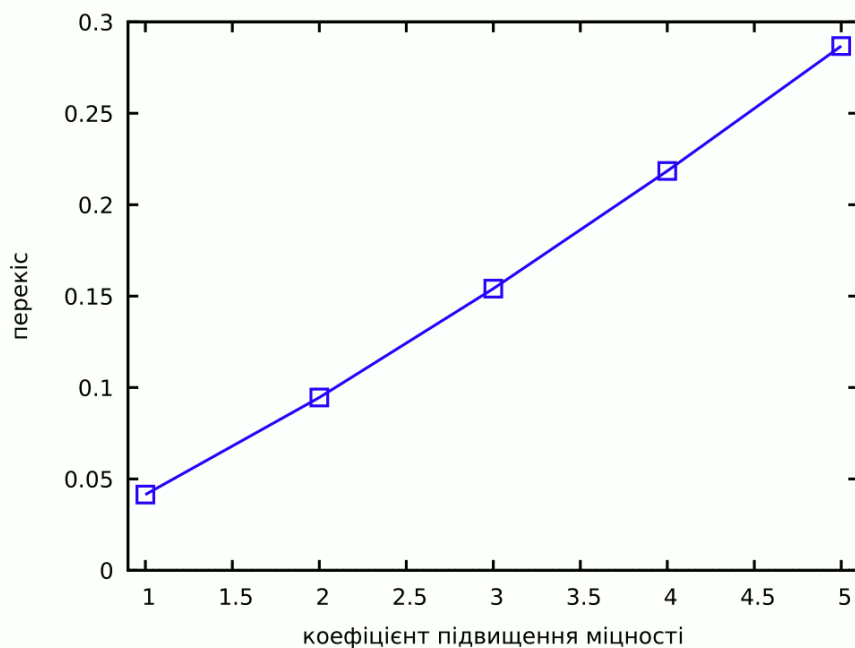


Рисунок 5.14 - Перекіс 1-го поверху будинку з полімербетонним каркасом під дією періодичного навантаження без депмферів



Аналіз чисельних результатів, наведених на рис. 5.11–5.14, свідчить, що застосування легковагових каркасних конструкцій, виготовлених із полімербетонів, призводить до суттєвого зменшення жорсткості споруд. Підвищення міцності матеріалу у 5 разів і відповідне зменшення поперечних перерізів конструктивних елементів призводить до збільшення переміщень та перекосів поверхів під дією періодичного навантаження майже у 7 разів (див. рис. 5.1 і 5.11; 5.2 і 5.12). Жорсткість конструкції можна підвищити вставленням демпферів сухого тертя.

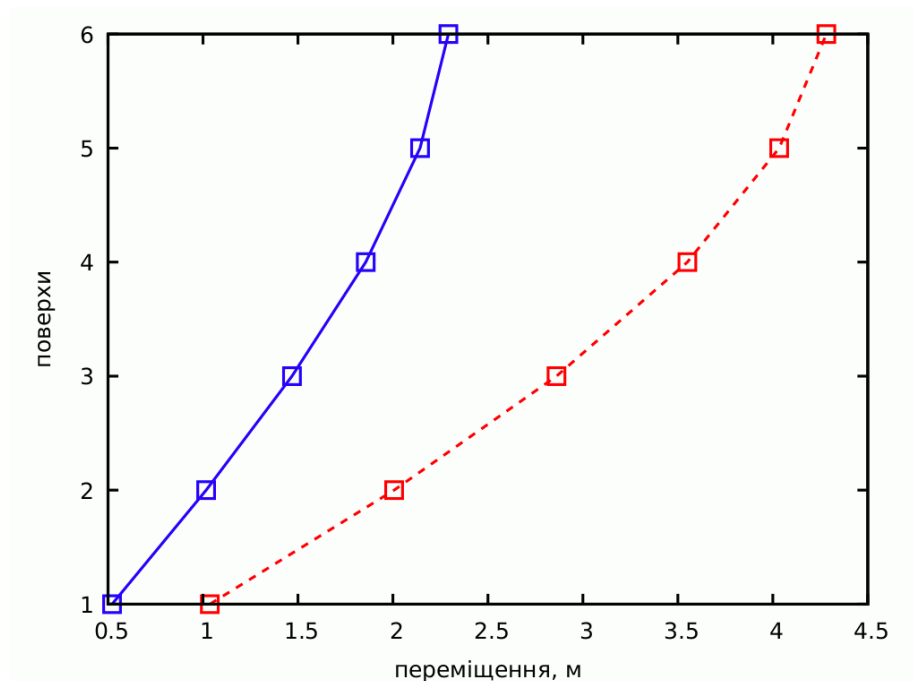


Рисунок 5.15 - Переміщення поверхів полімербетонних будинків з демпферами (синій) та без демпферів (червоний) під дією періодичного навантаження:  $\eta = 5$

Розглянемо визначений вище раціональний варіант встановлення трьох демпферів на 1-му поверсі будинку. Прийmemo  $\eta = 5$ . У цьому випадку вага будівлі дорівнює 200 кН, а зусилля тертя кожного демпферу  $N = 33$  кН. На рис. 5.15, 5.16 одержані результати для переміщень та перекосів поверхів будинку із демпферами (сині криві) порівнюються з аналогічними даними для

будинку без демпфірування (червоні криві). Застосування демпферів сухого тертя дозволяє знизити переміщення поверхів полімербетонної будівлі у 1.9 рази. При цьому відносні перекося поверхів зменшуються від 1.6 рази (для 6-го поверху) до 2 раз (для 1-го поверху). Зазначимо, що у випадку періодичного навантаження переміщення та перекося поверхів легкового полімербетонного будинку з демпферами сухого тертя все одно у кілька разів перевищують переміщення та перекося будинку без демпферів, але виготовленого із традиційного цементного бетону.

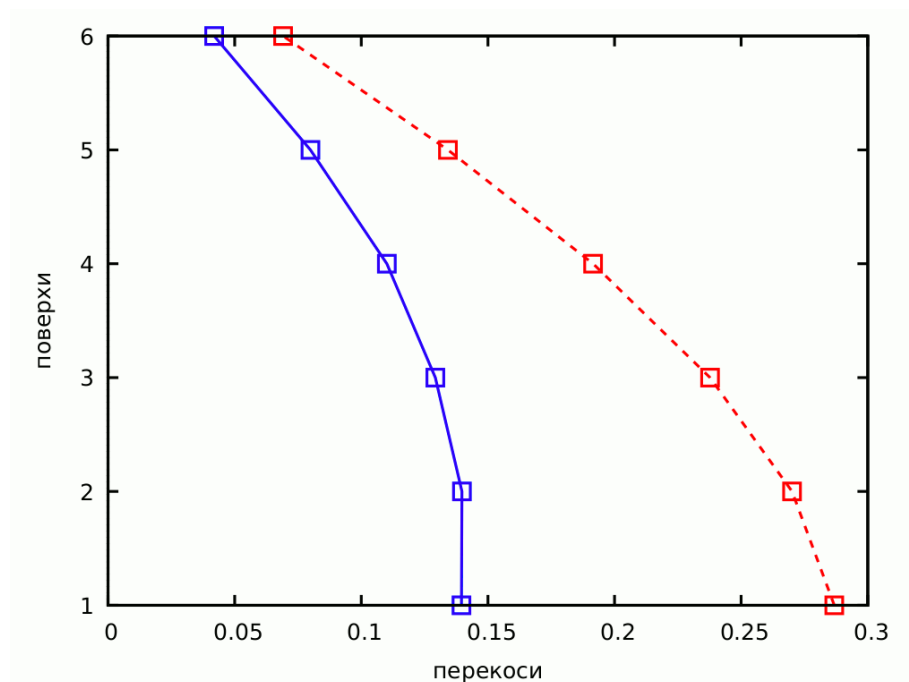


Рисунок 5.16 - Перекося поверхів полімербетонних будинків з демпферами (синій) та без демпферів (червоний) під дією періодичного навантаження:  $\eta = 5$

### 5.6. Динамічна реакція полімербетонного будинку на дію сейсмічного навантаження

Розрахунки полімербетонного будинку на сейсмічне навантаження виконано методом Рунге-Кутти (п. 4.4) відповідно до методики, викладеної у пп. 5.2, 5.3, з використанням розробленої математичної моделі акселерограми

для ґрунту жорсткого типу. При розрахунках прийнято  $\eta = 5$  і  $N = 33$  кН. Одержані чисельні результати для перекосів та прискорень поверхів наведено на рис. 5.17–5.20. Червоні лінії відповідають конструкції без демпферів, а сині – раціональному розташуванню демпферів на поверхах 1, 2, 3.

Перекуси поверхів полімербетонного будинку, спричинені дією сейсмічного навантаження, у 3...4 рази перевищують аналогічні дані для будинку із цементного бетону (див. рис. 5.5 і 5.17). Даний ефект спричинено суттєвим зниженням жорсткості легковагової полімербетонної конструкції. При цьому необхідно зауважити, що зменшення розмірів та маси конструкційних елементів також сприяє зменшенню сил інерції та відповідних динамічних зусиль, що виникають внаслідок сейсмічних впливів. При цьому застосування демпферів сухого тертя дозволяє зменшити перекуси поверхів полімербетонної споруди у 3...5 разів, що робить їх приблизно однаковими (чи навіть нижчими) за перекуси будинку із цементного бетону без демпферів.

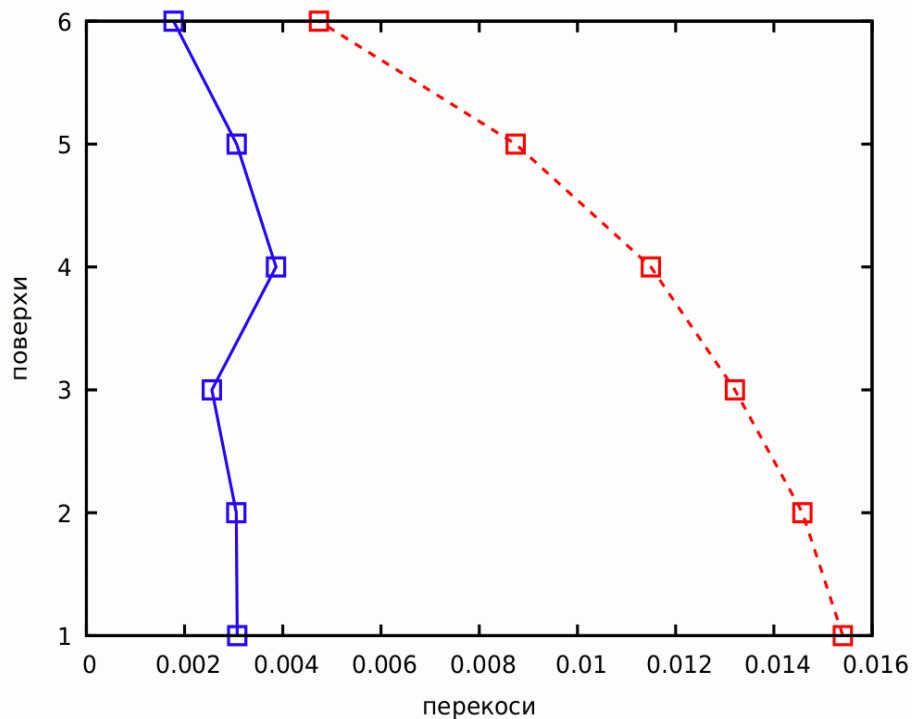


Рисунок 5.17 - Перекуси поверхів будинку з полімербетонним каркасом під дією сейсмічного навантаження при  $\eta = 5$

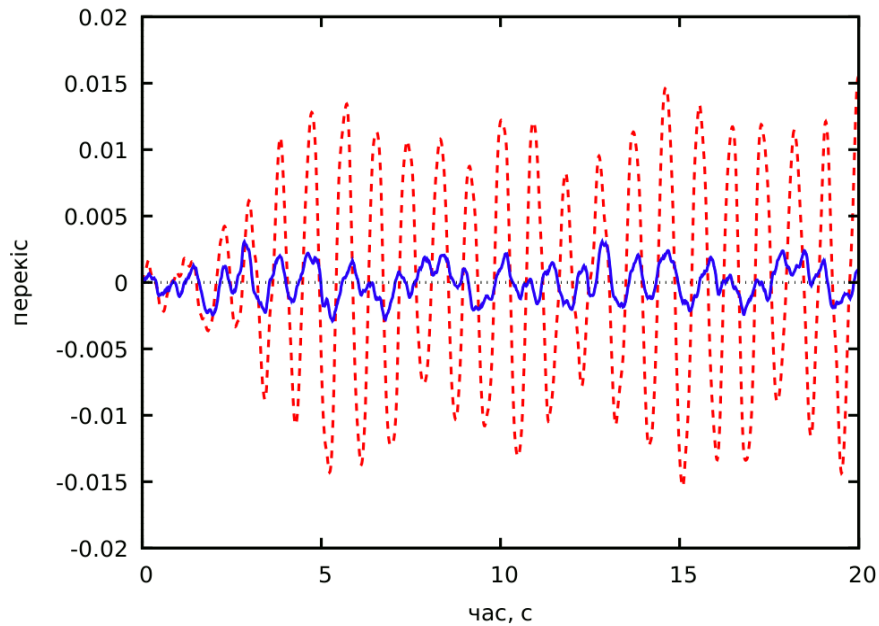


Рисунок 5.18 - Перекіс 1-го поверху будинку з полімербетонним каркасом під дією сейсмічного навантаження при  $\eta = 5$

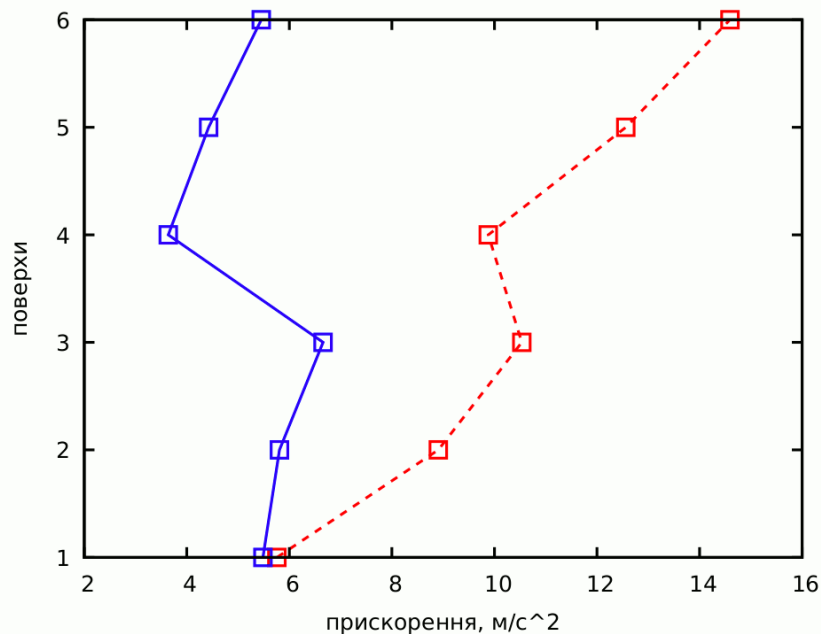


Рисунок 5.19 - Прискорення поверхів будинку з полімербетонним каркасом під дією сейсмічного навантаження при  $\eta = 5$

Прискорення поверхів полімербетонного будинку виявилися нижчими за прискорення будинку із цементного бетону: від 1.3 рази для 1-го поверху до 1.7 рази для 6-го поверху (див. рис. 5.7 і 5.19). Цей факт можна пояснити меншою жорсткістю полімербетонної споруди, що уповільнює її відклик на динамічні

навантаження та відповідно зменшує стрибки швидкостей конструктивних елементів. Застосування демпферів сухого тертя зменшує максимальні прискорення верхніх поверхів полімербетонного будинку до 2.6 рази, у той час як прискорення першого поверху залишається приблизно таким самим.

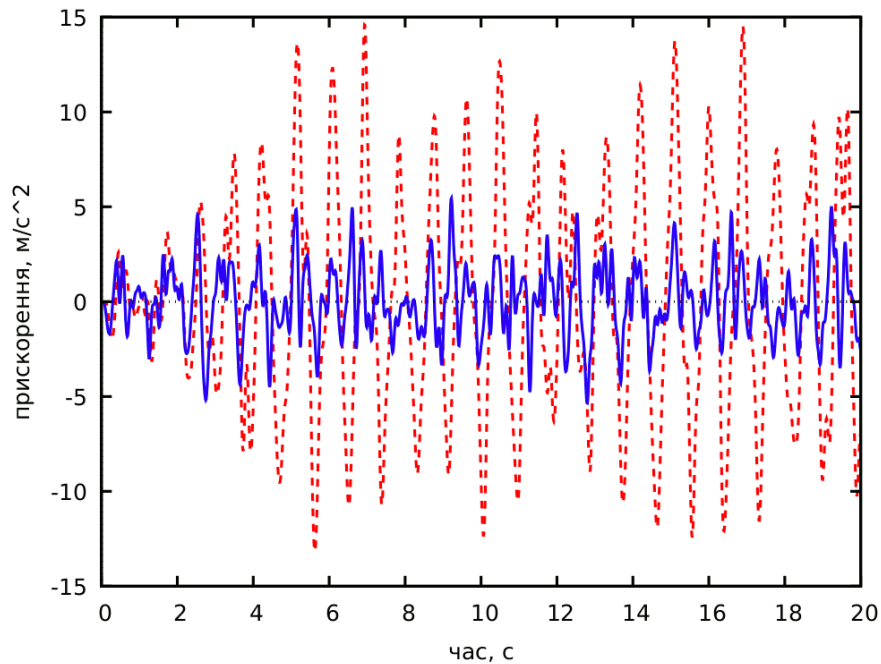


Рисунок 5.20 - Прискорення 6-го поверху будинку з полімербетонним каркасом під дією сейсмічного навантаження при  $\eta = 5$

Аналізуючи зміни одержаних розв'язків у часі (рис. 5.6 і 5.18; рис. 5.8 і 5.20), відзначимо, що коливання полімербетонного будинку під дією сейсмічного навантаження характеризуються помітно тривалішими періодами, ніж коливання будинку із цементного бетону. Даний ефект спричинено меншими частотами власних коливань полімербетонної споруди (рис. 5.10).

## 5.7. Висновки по розділу 5

1. Досліджено задачі раціонального розташування демпферів у багатоповерхових каркасних будівлях на основі запропонованої у розділі 4

динамічної моделі із зосередженими масами. Розглянуто 2D модель шестиповерхового залізобетонного будинку, у центральному прольоті якого може бути встановлено три демпфера. Прийнято два типи цільових функцій, які потрібно мінімізувати: максимальні переміщення поверхів та максимальні відносні перекося поверхів. Усі динамічні розрахунки у розділі 5 виконано шляхом чисельного інтегрування вихідної системи нелінійних диференціальних рівнянь руху за допомогою методу Рунге-Кутти.

2. Досліджено випадок періодичного резонансного навантаження з частотою, що дорівнює частоті першої форми власних коливань. Розв'язок задачі оптимізації знайдено за допомогою методу рою частинок, а розмір популяції дорівнює 16. Для обох цільових функцій одержано однаковий розв'язок, що передбачає встановлення всіх трьох демпферів на поверсі 1. Оптимальний розв'язок знайдено на 5-ій ітерації, а на 9-ій ітерації всі частинки зупинилися у точці глобального мінімуму цільової функції. Застосування демпферів сухого тертя дозволяє знизити максимальні переміщення і перекося поверхів приблизно у 2 рази.

3. Запропоновано математичну модель сейсмічного навантаження. Переважаючий частотний діапазон землетрусів поділено на інтервали шириною і кількістю відповідно до нормативних вимог [13]. Прискорення ґрунту описано стохастичним гауссовським процесом у вигляді суперпозиції гармонічних хвиль із дискретно заданими частотами і випадковими фазами із нормальним розподілом. Спектральну густину енергії землетрусу визначено за допомогою емпіричної моделі Канаї-Таїмі. М'які ґрунти характеризуються високою концентрацією сейсмічної енергії на частотах 1...1.5 Гц, тоді як для жорстких і скельних ґрунтів енергія розподіляється більш рівномірно у ширшому діапазоні частот і досягає максимуму приблизно при 2...6 Гц. На основі запропонованої моделі побудовано акселерограми для різних типів ґрунтів.

4. Досліджено нестационарні коливання будинку під дією сейсмічного навантаження. Для розв'язання задач оптимізації використано популяцію із 16

частинок. Оптимальні розв'язки визначено на 3 ітерації, а для повної зупинки руху частинок знадобилося 9 ітерацій. Мінімум переміщень досягнуто при встановленні демпферів на поверхах 1, 3, 4, тоді як для мінімізації перекосів необхідно встановити демпфери на поверхах 1, 2, 3. В останньому випадку прискорення споруди також будуть найменшими. У випадку сейсмічного навантаження, раціональне розташування демпферів дозволяє знизити відносні перекоси поверхів у 3.8 рази, тоді як максимальні прискорення зменшуються приблизно у 3 рази.

5. Визначено динамічні характеристики полімербетонного 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.

6. Досліджено реакцію полімербетонного будинку на дію періодичного та сейсмічного навантажень. У випадку періодичного навантаження, підвищення міцності матеріалу каркасу у 5 разів разом із відповідним зменшенням поперечних перерізів конструктивних елементів призводить до збільшення переміщень та перекосів поверхів майже у 7 разів. Встановлення демпферів сухого тертя підвищує жорсткість конструкції та зменшує максимальні переміщення у 1.9 рази і максимальні перекоси у 1.6 рази.

7. У випадку сейсмічного навантаження, перекоси поверхів полімербетонного будинку у 3...4 рази перевищують аналогічні дані для будинку із залізобетону. 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. 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.

### **5.8. Список використаних джерел у розділі 5**

У розділі 5 використано джерела [70, 79–81]. Їх найменування наведені у загальному списку використаних джерел.



## ВИСНОВКИ

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

**1.** Згідно принципів сталого розвитку та циркулярної економіки, актуальним завданням є розробка і впровадження легковагових економічних будівель, які характеризуються низькою матеріаломісткістю та низьким споживанням ресурсів на всіх етапах свого життєвого циклу. Стійкість таких споруд до сейсмічних впливів забезпечується за допомогою спеціальних систем захисту: сейсмоізолюючих опор, інерційних гасників коливань, а також демпферів різних типів.

Демпфери сухого тертя забезпечують ефективний захист будівель від сейсмічних впливів. Перевагами таких пристроїв є простота і надійність конструкції, низька вартість, відсутність потреби у обслуговуванні, багаторазовість використання, а також високі дисипативні властивості. Простота та швидкість монтажу робить демпфери сухого тертя особливо зручними для сейсмічної реконструкції будівель, що експлуатуються.

При розробці систем сейсмічного захисту на основі демпферів сухого тертя, складною задачею є визначення раціональних місць розташування демпферів всередині будівлі. Її розв'язання потребує комплексного аналізу динамічних властивостей споруди і, як правило, не може бути знайдено в рамках стандартних методів проектування.

**2.** У дисертаційній роботі розвинуто метод рою частинок для визначення місць раціонального розташування демпферів сухого тертя у каркасних

будівлях для підвищення їх сейсмостійкості, зменшення переміщень і прискорень, що виникають внаслідок динамічних навантажень. 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. Розроблено програмний код для реалізації методу рою частинок у середовищі комп'ютерної алгебри Maxima.

Досліджено вплив параметрів методу рою частинок на його практичну збіжність при пошуку екстремумів неопуклих функцій. Розглянуто тестові функції: «долину» функцію Розенброка та мультимодальну функцію Растрігіна. Визначено значення вагових коефіцієнтів методу рою частинок, при яких пошук глобальних екстремумів потребує менше обчислювальних витрат.

Виконано порівняльний аналіз методу рою частинок та генетичного алгоритму 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 застосування методу рою частинок забезпечує більш прозорі критерії зупинку процесу пошуку.

**3.** Виконано чисельне моделювання багатопверхового залізобетонного каркасного будинку у ПК ЛІРА-САПР. Знайдено частоти та форми власних коливань; визначено амплітуду переміщень при сейсмічному навантаженні. За допомогою системи «Динаміка-плюс» 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.

При дослідженні динамічних характеристик будівель необхідно враховувати фізико-механічні властивості матеріалів, з яких виготовлені конструктивні елементи споруди. Останніми роками розробляються нові типи

матеріалів із поліпшеними характеристиками. Одними з таких матеріалів є полімербетони. Міцність полімербетонів у декілька разів вища за міцність звичайних цементних бетонів, що дозволяє зменшити поперечні перерізи конструктивних елементів, зменшити вагу та матеріаломісткість споруди.

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

**4.** Розроблено наближену аналітичну динамічну модель багатоповерхового залізобетонного каркасного будинку із демпферами сухого тертя. Розрахункову схему прийнято у вигляді вертикального консольного стрижня із зосередженими масами, які розташовані на рівні перекриттів та можуть переміщуватись у горизонтальному напрямку. Складено вихідну систему нелінійних диференційних рівнянь руху.

Для підтвердження достовірності моделі, виконано порівняння аналітичних результатів для власних частот із чисельним розрахунком у ПК ЛПРА-САПР. Одержані аналітичні та чисельні розв'язки добре погоджуються між собою. Аналіз перших шести форм власних коливань, визначених у ПК ЛПРА-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.

Для чисельного інтегрування вихідної системи диференційних рівнянь застосовано метод Рунге-Кутти. 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.

**5.** 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 багатопверхового каркасного будинку під дією періодичних і сейсмічних навантажень. Одержано чисельні розв'язки нелінійних 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. Показано, що застосування демпферів сухого тертя дозволяє зменшити максимальні відносні перекоси поверхів від 50% до 75% і прискорення поверхів до 70%.

**6.** 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.

Результати дисертаційної роботи впроваджено компанією ТОВ «Кіровський» при розробці та реалізації проектів житлових будівель із підвищеною сейсмічною стійкістю. 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».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айзенберг Я.М. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. Москва: Наука, 1978. 249 с.
2. Аноп, М. Ф., Катуева Е. В., Михаличук В. И. Алгоритмы роя пчел и частиц в задаче обеспечения надежности по постепенным отказам. *Электронный журнал*. Москва: Наука и Образование, 2015, № 1. С. 144-154. [https://www.researchgate.net/publication/276389389\\_Swarm\\_Intelligence\\_Algorithms\\_in\\_the\\_Problem\\_of\\_Gradual\\_Failure\\_Reliability\\_Assurance/fulltext/563ba5f408aec6f17dd4e5fe/Swarm-Intelligence-Algorithms-in-the-Problem-of-Gradual-Failure-Reliability-Assurance.pdf](https://www.researchgate.net/publication/276389389_Swarm_Intelligence_Algorithms_in_the_Problem_of_Gradual_Failure_Reliability_Assurance/fulltext/563ba5f408aec6f17dd4e5fe/Swarm-Intelligence-Algorithms-in-the-Problem-of-Gradual-Failure-Reliability-Assurance.pdf)
3. Афанасьев Н.Ф., Целуйко М. К. Добавки в бетоны и растворы. Київ.: Будівельник, 1989. 110 с.
4. 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.
5. 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.
6. Волкова В.Є., Шаповал І.В. Моделювання динамічної поведінки баштової споруди з приєднаним гасником у рівномірному вітровому потоці. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Дніпро, 2019. Вип. 186. С.31-37.
7. 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.
8. Геккер Ф.Р., Светлицкий В.А. Исследование установившихся колебаний систем с сухим трением. *Изв. ВУЗов. Машиностроение*, 1965. № 2. С. 50-56.
  9. Глазкова С. В. Будівництво в сейсмічних районах. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Дев'ята всеукраїнська науково-технічна конференція*. Полтава: ПолтНТУ, 2012. Вип. 4(34). Т2. С. 325
  10. Гордеев Б.А., Горсков В.П., Ковригин Д.А. и др. Математические модели виброзащитных систем высотных зданий: лекции. Н.Новгород: ННГАСУ, 2012. 38 с.
  11. Грессель П.М. Влияние демпфирующих связей на сейсмостойкость каркасных зданий. *Промышленное строительство*. Москва: Стройиздат, 1967. № 12. С. 21-23.
  12. Гладков, Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Москва : Физматлит, 2010. 317 с.
  13. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах України. [Чинний від 16.05.2014]. Київ: Мінрегіон України, 2014. 110 с.
  14. 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.
  15. 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.
  16. 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.

17. 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.
18. 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.
19. Дудуналова Н.И. Исследование защитных свойств полимербетонных покрытий на основе модифицированных смол. *Строительство и архитектура. Известия вузов*. Новосибирск, 1978. С. 45-48.
20. Зайцев А.А., Курейчик В. В., Полупанов А.А. Обзор эволюционных методов оптимизации на основе роевого интеллекта. Эволюционное моделирование, генетические и бионические алгоритмы. *Технические науки*. Ростов-на-Дону: Известия ЮФУ, 2010. № 12(113). С. 7-12.
21. Зеленцов Д.Г., Короткая Л.И. Технологии вычислительного интеллекта в задачах моделирования динамических систем: монография. Днепр: Баланс-Клуб, 2018. 178 с.
22. Зуев Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. Москва: Химия, 1972. 150 с.
23. Зубов П.И., Киселёв М.Р., Сухарева Л.Н. Влияние усилий формирования полиэфирных покрытий на их надмолекулярную структуру и свойства. *Коллоидный журнал*. Москва, 1968. №6. С. 18-27.
24. Иртуганова С.К., Намотов Ю.М., Днумач В.С. Полимербетоны на основе фурфуролацетонотной смолы различных модификаций. *Бетон и железобетон*. Москва, 1994, № 8, С. 19 - 20.
25. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. Москва: Издательство МГТУ им. Баумана, 2017. 446 с.

26. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. *Информационные технологии*. Москва, 2012. №7. С. 32-38.
27. Килимник Л.Ш., Лаврентьева Л.Е. Исследование сейсмостойкости узловых сопряжений многоэтажных стальных каркасных зданий. учебник: Сейсмостойкость зданий и инженерных сооружений. Москва: Стройиздат, 1972. 148 с.
28. Килимник Л.Ш. Проектирование каркасных зданий для сейсмических районов с упруго-фрикционными соединениями на высокопрочных болтах. *Научно-технический реферативный сборник*. Москва: ЦИНИС, 1977. серия 14. Вып.5. С. 12-17.
29. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука, 1973. 832 с.
30. Корисов А.А. Зависимость прочности полимербетона на основе ФАМ от состава и структуры. В ин.: *Исследование строительных конструкций с применением полимерных материалов*. Липецк: Из-во Воронежского политехнического института, 1990. С. 106-108.
31. Крендалл С. Роль демпфирования в теории колебаний. *Периодический сборник переводов иностранных статей*. Механика. 1971, №5 (129) С.3-22.
32. Курзанова А.М., Черепинского Ю.Д. Особенности колебаний зданий с сейсмоизолирующими фундаментами. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. Москва, 2008. №1. С. 42-44.
33. Лебедев, Б. К., Лебедев В. Б. Размещение на основе метода пчелиной колонии. *Технические науки*. Ростов-на-Дону: Известия ЮФУ, 2010. С. 13-15.
34. Мартемьянов А.И. Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмических районах. Москва: Стройиздат, 1985. 255 с.
35. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. Москва: Госстройиздат, 1962. 284 с.



36. Меляховецкий А.С. Об одной гипотезе внутреннего трения при колебаниях упругих систем. Москва: Инж. Сборник, 1958. Том XXVI. 216 с.
37. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. Москва: Наука, 1978. 352 с.
38. Ноговицин, А. Е. Сейсмозащита каркасных железобетонных зданий. *Молодой ученый*. Казань, 2019. № 48 (286) С. 79-80.
39. Норенков И.П. Эвристики и их комбинации в генетических методах дискретной оптимизации. *Информационные технологии*. Москва: МГТУ, 1999. № 1. С. 2–7.
40. Олейник А. А., Олейник А. А., Субботин С. А. Агентные технологии для отбора информативных признаков. *Кибернетика и системный анализ*. Киев, 2012. № 2. С. 114-123.
41. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет». 2007. 87 с.
42. Пановко Я.Г., Страхов Г.И. Приближенное исследование вынужденных колебаний упругих систем с конструкционным демпфированием. *Вопросы динамики и прочности*. Рига: АН ЛатвССР, 1962. С. 5-12.
43. Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. Москва: Стройиздат, 1989. С. 120-224.
44. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий. Москва: Высшая школа, 1983. 304 с.
45. Патуроев В.В. Полимербетоны. Москва: Стройиздат, 1987. 286 с.
46. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетоны. Москва: Стройиздат. - 1973. 188 с.
47. Румянцев Е.В., Белугина Е.А. Моделирование конструкций железнодорожного терминала станции Адлер с учетом системы сейсмоизоляции. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No.1. P. 22-30.
48. Русина А.Г. Оптимизация в электроэнергетических системах. Москва: Издательство Юрайт, 2017. 158 с.

49. Рутман Ю.Л. Обобщение метода главных координат на случай упругих систем с локальными нелинейностями. Сб. трудов V международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения». С. – Петербург: СПбГПУ, 2003. С.457-464
50. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. Москва: ДМК-Пресс, 2020. 940 с.
51. Самигулина Г. А., Авденова А. М., Масимканова Ж. А. Применение подходов искусственного интеллекта для решения задачи выделения информативных признаков. Материалы 11-й Международной Азиатской школы-семинара „Проблемы оптимизации сложных систем”. 2015. С. 567-572.
52. Сейсмічність і сейсмічна небезпека України: постанова Національної Академії наук України від 08.10.2008 № 244: [http://zakon.nau.ua/doc/?doc\\_id=294579](http://zakon.nau.ua/doc/?doc_id=294579).
53. Солдатов А.Ю., Лебедев В.Л., Семенов В.А. Учет демпфирования при расчетах сооружений на кинематические воздействия. *VII Савиновские чтения*. С.-Петербург: ПГУПС, 2014. С. 21-22.
54. Субботин С. А., Олейник А. А., Яценко В. К. Отбор информативных признаков на основе модифицированного метода муравьиных колоний. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2006. № 1. С. 65-68.
55. Уздин А.М., Т.А. Сандович, Аль-Насер-Мохомад С.А. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. 176 с.
56. Ходашинский И.А., Бардамова М.Б., Ковалев В.С. Построение нечеткого классификатора алгоритмом генетического поиска. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2017. Т. 20, № 2. С. 84–87.
57. Фрейфельд С.Е. Собственные напряжения в железобетоне. Москва: Стройиздат, 1941. 23 с.

58. Фроловский В.Д., Забелин С.Л. Разработка и исследование метаэвристических алгоритмов двумерных матриц и муравьиных колоний для задач геометрического покрытия. Материалы XIV Всероссийской конференции «Математическое программирование и приложения». Екатеринбург: Институт математики и механики УрО РАН, 2011. С. 174–175.
59. Частикова В.А., Воля Я.И. Анализ эффективности работы алгоритма светлячков в задачах глобальной оптимизации. *Научные труды КубГТУ*, 2015. № 15, С.105-111
60. Чичинадзе В.К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. Москва: Наука, 1983. 256 с.
61. Чигринская Л.С. Сейсмостойкость зданий и сооружений: Учеб. пособие для вузов. Ангарск: Изд-во АГТА, 2009. 107 с.
62. Щебина А. К., Ганник Н. И., Морозова Н. В. Пластификаторы и бетоны на основе гуминовых кислот торфа. *Торфяная промышленность* : монография. Москва : Недра, 1998. 184 с.
63. Bellman R. The theory of dynamic programming. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1954. Vol. 60. P. 503–515.
64. 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.
65. 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.
66. 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.

67. 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.
68. Eberhart R., Shi Yu., Kennedy J. *Swarm Intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001. 512 p.
69. Holland J. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. 183 p.
70. Kanai K. An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. 1961. V.39. P. 85–95.
71. Mordecai A. *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*. Mineola, NY: Dover Publishing, 2003. 512 p.
72. Nabid N., Hajirasouliha I., Petkovski M. Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers. *Engineering Structures*. 2019. V.198. P. 109549-1 – 109549-12.
73. Ontiveros-Pérez S.P., Miguel L.F.F., Riera J.D. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. *Engineering Structures*. 2019. V.190. P. 276–284.
74. Ontiveros-Pérez S.P., Miguel Leticia F.F., Miguel Leandro F.F. A new assessment in the simultaneous optimization of friction dampers in plane and spatial civil structures. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Article ID 6040986. 18 p.
75. Poli R. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization. *Journal of Artificial Evolution and Applications*. 2008. Article ID 685175. 10 p.
76. Ruszczyński A. *Nonlinear Optimization*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2006. 464 p.
77. Samani H.R., Mirtaheri M., Zandi A.P., Bahai H. The Effects of Dynamic Loading on Hysteretic Behavior of Frictional Dampers. *Shock and Vibration*. 2014. V.2014. P.181534-1 – 181534-9.

- 78.Seya H., Talbott M.E., Hwang H.H.M. Probabilistic seismic analysis of a steel frame structure. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 1993. V.8. P. 127–136.
- 79.Shinozuka M., Jan C.-M. Digital simulation of random processes and its applications. *Journal of Sound and Vibration*. 1972. V.25. P. 111–128.
- 80.Soong T.T., Dargush G.F. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. Chichester, New York: Wiley, 1997. 368 p.
- 81.Tajimi H. A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake. *Proceedings of the 2nd World Conference in Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan. 1960. P. 781–797.
- 82.Trelea I.C. The Particle Swarm Optimization Algorithm: convergence analysis and parameter selection. *Information Processing Letters*. 2003. Vol. 85. P. 317–325
- 83.Xu S., Rahmat-Samii Y. Boundary conditions in particle swarm optimization revisited. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007. V.55. P. 760–765.
- 84.Yang X.S. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2014. 300 p.

## ДОДАТКИ

### Додаток А. Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів 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 полимербетонів. *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 полимербетонів 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.

### **Відомості про апробацію результатів дисертації:**

- Науково-практична конференція зі сталого розвитку та зеленого будівництва, Світловодськ, 2019 (усна доповідь).
- XVII Міжнародна науково-практична конференція “Інноваційні технології життєвого циклу об’єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення”, Одеса, 2019 (усна доповідь).
- Друга міжнародна науково-технічна конференції пам’яті академіка НАН України В. І. Моссаковського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій», Дніпро, 2019 (усна доповідь).
- VII Міжнародна конференція “Актуальні проблеми інженерної механіки”, Одеса, 2020 (он-лайн участь).
- VI Міжнародна науково-технічна конференція «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем», Дніпро, 2020 (публікація тез).
- XVIII International Conference “Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture”, Dnipro, 2020 (усна доповідь).
- Міжкафедральний науковий семінар при Державному вищому навчальному закладі “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, керівник проф. І. А. Соколов, Дніпро, 2020 (усна доповідь).



## Додаток Б. Програмна реалізація методу рою частинок

Програмна реалізація методу рою частинок виконана у системі комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima. Розрахунки виконувались у системі Maxima версії 5.44.0 з графічним інтерфейсом wxMaxima версії 20.06.6.

```
kill(all)$ load(draw)$ numer:true$ ratprint:false$

/* Цільова функція Розенброка */

f(x1,x2):=(1-x1)^2+100*(x2-x1^2)^2$

/* Ініціалізація змінних */

nmax:16$ /* кількість частинок */
dmax:2$ /* розмірність простору пошуку */
xmin:-2.0$ xmax:2.0$ /* границі області пошуку*/
x:zeromatrix(nmax,dmax)$ /* матриця координат частинок */
v:zeromatrix(nmax,dmax)$ /* матриця швидкостей частинок */
p:zeromatrix(nmax,dmax)$ /* матриця найкращих координат
                           частинок */
g:zeromatrix(1,dmax)$ /* найкращі координати рою */
w:0.5$ c1:1.0$ c2:1$ /* вагові коефіцієнти */
tmax:16$ /* кількість ітерацій */

/* Ініціалізація початкових значень */

/* ініціалізація генератору випадкових чисел */
set_random_state(make_random_state(true))$
/* початкові координати частинок */
for n:1 thru nmax do
  for d:1 thru dmax do
    x[n,d]:xmin+random(float(xmax-xmin))$
/* ініціалізація генератору випадкових чисел */
set_random_state(make_random_state(true))$
```

```

/* початкові швидкості частинок */
for n:1 thru nmax do
  for d:1 thru dmax do
    v[n,d]:(-(xmax-xmin)+random(float(2*(xmax-xmin))))/2$
p:''x$ /* початкові найкращі координати частинок */
/* початкові найкращі результати частинок */
fp:makelist(apply(f,p[n]),n,1,nmax)$
/* початкові найкращі координати і результат рою */
g:p[1]$ fg:fp[1]$
for n:2 thru nmax do
  if fp[n]<fg then (g: p[n], fg: fp[n])$
xt:''x]$ /* історія координат частинок */
fgt:''fg]$ /* історія найкращих результатів рою */

/* Ітерації методу рою частинок */

thru tmax do (
  /* найкращі координати рою у форматі матриці (nmax*dmax) */
  gm:apply(matrix,makelist(g,n,1,nmax)),
  /* нова швидкість частинок */
  v:w*v+c1*random(1.0)*(p-x)+c2*random(1.0)*(gm-x),
  x:x+v, /* нові координати частинок */
  xt:endcons(x,xt), /* збереження історії координат частинок */
  /* нові результати частинок */
  fx:makelist(apply(f,x[n]),n,1,nmax),
  /* перевірка границь області пошуку для кожної частинки */
  for n:1 thru nmax do (
    test:true,
    for d:1 thru dmax do
      test: is((x[n,d]>=xmin) and (x[n,d]<=xmax) and test),
      /* якщо границі області пошуку не порушені, уточнення
      найкращих координат і результатів частинок */
    if test then (
      if fx[n]<fp[n] then (
        p[n]:'x[n],
        fp[n]:'fx[n]

```

```

    ),
    /* уточнення найкращих координат і результатів рою */
    if fp[n]<fg then (
        g:''p[n],
        fg:''fp[n]
    )
)
),
/* збереження історії найкращих результатів рою */
fgt: endcons(fg,fgt)
)$

/* Графічна візуалізація положень частинок на кожній ітерації */

df:100$
plot_f:makelist(implicit(f(x1,x2)=i*df,x1,x1min,x1max,
                        x2,x2min,x2max),i,1,36)$
plot_ex:points([1,1],[1,1])$
for t:1 thru tmax do (
    plot_p:points(transpose(xt[t])),
    wxdraw2d(ip_grid=[30,30],proportional_axes='xy,
             xrange=[xmin,xmax],
             yrange=[xmin,xmax],
             color=red,plot_f,
             color=blue,point_size=1,point_type=7,plot_p,
             color=black,point_size=2,point_type=1,plot_ex)
)$

/* Графічний аналіз швидкості збіжності методу рою частинок */

fgnc:makelist([nmax*i,fgt[i]],i,1,length(fgt))$
wxplot2d([discrete,fgnc],
        [xlabel,"кількість викликів цільової функції"],
        [ylabel,"цільова функція"]);

```

## Додаток В. Програмна реалізація генетичного алгоритму

Програмна реалізація генетичного алгоритму виконана у системі комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima. Розрахунки виконувались у системі Maxima версії 5.44.0 з графічним інтерфейсом wxMaxima версії 20.06.6.

```
kill(all)$ load(draw)$ numer:true$ ratprint:false$

/* Цільова функція Розенброка */

f(x1,x2):=(1-x1)^2+100*(x2-x1^2)^2$

/* Ініціалізація змінних */

nmax:16$ /* кількість клітин */
dmax:2$ /* розмірність простору пошуку */
xmin:-2.0$ xmax:2.0$ /* границі області пошуку*/
/* список клітин-батьків */
x:makelist([makelist(0,dmax),0],nmax)$
/* список клітин-нащадків */
y:makelist([makelist(0,dmax),0],nmax)$
tmax:16$ /* кількість ітерацій */
foo(a,b):=a[2]<b[2]$ /* правило виживання */
gamma:0.3$ /* коефіцієнт мутації */

/* Ініціалізація початкової популяції */

/* ініціалізація генератору випадкових чисел */
set_random_state(make_random_state (true))$
/* початкові генотипи та пристосованість клітин */
for n:1 thru nmax do (
  for d:1 thru dmax do
    x[n][1][d]:xmin+random(float(xmax-xmin)),
    x[n][2]: apply(f,x[n][1])
)$
```

```

/* ініціалізація історії найкращих результатів */
fg:sort(x,'foo')[1][2]$
fgt:[fg]$
xt:zeromatrix(nmax,dmax)$ /* ініціалізація історії генотипів */
for n:1 thru nmax do
  for d:1 thru dmax do
    xt[n,d]: x[n][1][d]$
data_xt:[xt]$

/* Ітерації генетичного алгоритму */

thru tmax do (

  /* Схрещення */

  /* ініціалізація генератору випадкових чисел */
  set_random_state(make_random_state(true)),
  ynmax:round(nmax/2), /* кількість пар батьків*/
  for n:1 thru ynmax do (
    /* селекція клітин-батьків */
    nA:random(nmax)+1,
    nB:random(nmax)+1,
    /* народження нащадків */
    for d:1 thru dmax do (
      set_random_state(make_random_state (true)),
      u:random(1.0),
      y[n][1][d]:u*x[nA][1][d]+(1-u)*x[nB][1][d],
      y[n+ynmax][1][d]:u*x[nB][1][d]+(1-u)*x[nA][1][d]
    )
  ),

  /* Мутація */

  /* ініціалізація генератору випадкових чисел */
  set_random_state(make_random_state (true)),
  /* мутація клітин-нащадків */

```

```

for n:1 thru nmax do (
  for d:1 thru dmax do
    y[n][1][d]:y[n][1][d]-gamma*(2*random(1.0)-1),
    y[n][2]:apply(f,y[n][1])
  ),
/* Створення нового покоління */

/* Відбір клітин, що виживають */
z:append(x,y),
x:firstn(sort(z,'foo'),nmax),
/* оновлення історії найкращих результатів */
if x[1][2]<fg then fg:x[1][2],
fgt:endcons(fg,fgt),
/* оновлення історії генотипів */
xt:zeromatrix(nmax,dmax),
for n:1 thru nmax do
  for d:1 thru dmax do
    xt[n,d]:x[n][1][d],
  data_xt: endcons(xt,data_xt)
)$

/* Графічна візуалізація генотипів клітин на кожній ітерації */

df:100$
plot_f:makelist(implicit(f(x1,x2)=i*df,x1,x1min,x1max,
                        x2,x2min,x2max),i,1,36)$
plot_ex:points([1,1],[1,1])$
for t:1 thru tmax do (
  plot_p:points(transpose(xt[t])),
  wxdraw2d(ip_grid=[30,30],proportional_axes='xy,
            xrange=[xmin,xmax],
            yrange=[xmin,xmax],
            color=red,plot_f,
            color=blue,point_size=1,point_type=7,plot_p,
            color=black,point_size=2,point_type=1,plot_ex)
)

```

```
)$
```

```
/* Графічний аналіз швидкості збіжності генетичного алгоритму */
```

```
fgnc:makelist([nmax*i,fgt[i]],i,1,length(fgt))$  
wxplot2d([discrete,fgnc],  
          [xlabel,"кількість викликів цільової функції"],  
          [ylabel,"цільова функція"]);
```

## Додаток Г. Програмна реалізація методу динамічного розрахунку каркасних будівель

На основі запропонованої моделі із зосередженими масами (п. 4.2), динамічні розрахунки каркасних будівель із демпферами сухого тертя виконано методом Рунге-Кутти четвертого порядку у системі комп'ютерної алгебри з відкритим кодом Maxima із використанням стандартної підпрограми **rk**. Нижче наведено програмний код для розрахунку шестиповерхового будинку на дію періодичного навантаження (п. 5.1). Розрахунки виконувались у системі Maxima версії 5.44.0 з графічним інтерфейсом wxMaxima версії 20.06.6.

```
kill(all)$ numer:true$ ratprint:false$
```

```
/* Вихідні дані */
```

```
m:1.2*10^4$      /* маса поверху, кг*/
k:7.13*10^7$     /* коефіцієнт жорсткості, Н/м */
c:8.84*10^4$     /* коефіцієнт в'язкості, Н*с/м */
N:10^5$          /* горизонтальне зусилля тертя демпфера, Н */
h:3.6$           /* висота поверху, м */
w:18.6$          /* частота навантаження, рад/с */
T:2*%pi/w$       /* період навантаження, с */
a:0.4*9.81$      /* амплітуда прискорення навантаження, м/с^2 */
A:a/w^2$         /* амплітуда переміщень навантаження, м */
u0:A*sin(w*t)$   /* переміщення основи */
v0:diff(u0,t)$   /* швидкість основи */
```

```
/* Функція для динамічного розрахунку шестиповерхового будинку */
```

```
framedyn(Nd1,Nd2,Nd3,Nd4,Nd5,Nd6):=(
```

```
  /* моделювання реакцій демпферів сухого тертя */
```

```
  N1:Nd1*signum(v1-v0),
```

```
  N2:Nd2*signum(v2-v1),
```



```

N3:Nd3*signum(v3-v2),
N4:Nd4*signum(v4-v3),
N5:Nd5*signum(v5-v4),
N6:Nd6*signum(v6-v5),
/* система динамічних рівнянь */
dv6:-((u6-u5)*k+(v6-v5)*c+N6)/m,
dv5:-((2*u5-u4-u6)*k+(2*v5-v4-v6)*c+N5-N6)/m,
dv4:-((2*u4-u3-u5)*k+(2*v4-v3-v5)*c+N4-N5)/m,
dv3:-((2*u3-u2-u4)*k+(2*v3-v2-v4)*c+N3-N4)/m,
dv2:-((2*u2-u1-u3)*k+(2*v2-v1-v3)*c+N2-N3)/m,
dv1:-((2*u1-u0-u2)*k+(2*v1-v0-v2)*c+N1-N2)/m,
/* параметри чисельного розв'язку */
tmax:80*T, /* інтервал інтегрування */
dt:0.001, /* крок інтегрування, с */
imax:round(tmax/dt), /* кількість ітерацій */
/* чисельне інтегрування методом Рунге-Кутти */
sol:rk([v1,dv1,v2,dv2,v3,dv3,v4,dv4,v5,dv5,v6,dv6],
        [u1,v1, u2,v2, u3,v3, u4,v4, u5,v5, u6, v6],
        [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
        [t,0,tmax,dt]),
/* переміщення поверхів */
data_u0:makelist([i*dt,ev(u0,t=i*dt)],i,0,imax),
data_u1:makelist([s[1],s[2]],s,sol),
data_u2:makelist([s[1],s[4]],s,sol),
data_u3:makelist([s[1],s[6]],s,sol),
data_u4:makelist([s[1],s[8]],s,sol),
data_u5:makelist([s[1],s[10]],s,sol),
data_u6:makelist([s[1],s[12]],s,sol),
/* максимальні переміщення поверхів */
max_u1:apply(max,makelist(abs(s[2]),s,sol)),
max_u2:apply(max,makelist(abs(s[4]),s,sol)),
max_u3:apply(max,makelist(abs(s[6]),s,sol)),
max_u4:apply(max,makelist(abs(s[8]),s,sol)),
max_u5:apply(max,makelist(abs(s[10]),s,sol)),
max_u6:apply(max,makelist(abs(s[12]),s,sol)),
data_max_u:[[max_u1,1],[max_u2,2],[max_u3,3],[max_u4,4],

```

```

        [max_u5,5],[max_u6,6]],
/* відносні перекоси поверхів */
data_d1:makelist([s[1],[s[2]-ev(u0,t=s[1])]/h],s,sol),
data_d2:makelist([s[1],[s[4]-s[2])/h],s,sol),
data_d3:makelist([s[1],[s[6]-s[4])/h],s,sol),
data_d4:makelist([s[1],[s[8]-s[6])/h],s,sol),
data_d5:makelist([s[1],[s[10]-s[8])/h],s,sol),
data_d6:makelist([s[1],[s[12]-s[10])/h],s,sol),
/* максимальні відносні перекоси поверхів */
max_d1:apply(max,makelist(abs((s[2]-ev(u0,t=s[1]))/h),s,sol)),
max_d2:apply(max,makelist(abs((s[4]-s[2])/h),s,sol)),
max_d3:apply(max,makelist(abs((s[6]-s[4])/h),s,sol)),
max_d4:apply(max,makelist(abs((s[8]-s[6])/h),s,sol)),
max_d5:apply(max,makelist(abs((s[10]-s[8])/h),s,sol)),
max_d6:apply(max,makelist(abs((s[12]-s[10])/h),s,sol)),
data_max_d:[[max_d1,1],[max_d2,2],[max_d3,3],[max_d4,4],
            [max_d5,5],[max_d6,6]]
)§

/* Розрахунок будинку із трьома демпферами сухого тертя,
розташованими на поверсі 1 * /

framedyn(3*N,0,0,0,0,0)§

/* Графіки максимальних переміщень та перекосів поверхів */

wxplot2d([[discrete,data_max_u],[discrete,data_max_u]],
         [style,lines,points],
         [xlabel,"переміщення, м"],
         [ylabel,"поверхи"],
         [legend,false]);
wxplot2d([[discrete,data_max_d],[discrete,data_max_d]],
         [style,lines,points],
         [xlabel,"перекоси"],
         [ylabel,"поверхи"],
         [legend,false]);

```

**Додаток Д. Документи про впровадження результатів дисертації**



**ТОВ «КІРОВСЬКИЙ»**

49010, м.Дніпро, вул.Лабораторна, 45

Код ЄДРПОУ 30012099

UA 58 328209 0000026002010032951

в АБ «Південний» м. Одеса

МФО 328209

Ректору Державного вищого навчального  
закладу «Придніпровська державна  
академія будівництва та архітектури»  
д.т.н., проф. Савицькому М.В.

**ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ**

Наукові результати дисертаційної роботи Гайдар А. М. на тему  
“Рациональне проектування залізобетонних і полімербетонних будівель із  
демпферами сухого тертя за допомогою методів ройового інтелекту”, а саме:

- динамічні моделі багатоповерхових будинків;
- розв’язки для частот та форм власних коливань;
- методи чисельного розв’язання задач нестационарних коливань

використовуються компанією ТОВ «Кіровський» при розробці та реалізації  
проектів житлових будівель із підвищеною стійкістю до дії динамічних  
навантажень.

07 грудня 2020 р.

Директор ТОВ «Кіровський»

к.т.н., доц.

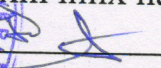
  


Нагорний Д.В.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”



Ректор ДВНЗ “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”  
доктор технічних наук, професор

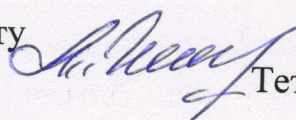
  
Микола САВИЦЬКИЙ  
2020 року

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що підписалися нижче, декан будівельного факультету Нікіфорова Т. Д., начальник навчального відділу Грабовський І. С., науковий керівник дисертаційної роботи Данішевський В. В. та виконавець роботи старший викладач Гайдар А. М., склали цей акт у тому, що результати дисертації Гайдар А. М. на тему “Раціональне проектування залізобетонних і полімербетонних будівель із демпферами сухого тертя за допомогою методів ройового інтелекту” впроваджено до навчального процесу у ДВНЗ “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”.

Результати розділу 2 (розв’язання задач нелінійної та неопуклої оптимізації за допомогою методу рою частинок) використовуються при читанні лекцій з дисципліни “Обчислювальна механіка та моделювання будівельних конструкцій і споруд” студентам магістратури будівельного факультету. Результати розділів 3 і 5 (визначення раціонального розташування демпферів сухого тертя у будівлях та спорудах) використовуються при читанні лекцій з дисципліни “Формування розрахункових схем, архітектурно-композиційних і конструктивних рішень” студентам магістратури будівельного факультету та при виконанні магістерських дипломних робіт.

Декан будівельного факультету  
д.т.н., проф



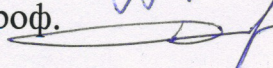
Тетяна НІКІФОРОВА

Начальник навчального відділу  
к.е.н., доц.



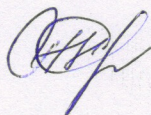
Ігор ГРАБОВСЬКИЙ

Науковий керівник д.т.н., проф.



Владислав ДАНИШЕВСЬКИЙ

Здобувач ст. викл.



Анастасія ГАЙДАР