

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Оптимізація конструктивних параметрів просторової ферми  
методом стохастичного імітаційного моделювання

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБмн-61  
спеціальності 192 Будівництво та цивільна

інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Крохмальний Б.С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Сорочак А.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Данильченко С.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Ясній В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Шпінталь М.Я.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
(повна назва факультету)

Кафедра будівельної механіки  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Крохмальний Богдан Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація конструктивних параметрів просторової ферми  
методом стохастичного імітаційного моделювання

Керівник роботи к.т.н., доц. Сорочак Андрій Петрович  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 04 » квітня 2022 року № 4/7-207

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 травня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Чотиригранна просторова ферма L=30 м, B=1,5 м, H=1,5 м.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз методів оптимізації металевих конструкцій.

Методика оптимізації конструкції просторової металевої ферми методом стохастичного імітаційного моделювання.

Аналіз результатів оптимізації конструкції просторової ферми методом стохастичного імітаційного моделювання.

Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Постановка проблеми досліджень. Мета і завдання роботи. Методика проведення досліджень.

Методи розв'язку задачі оптимізації металевих конструкцій. Вихідні параметри для оптимізації конструкції просторової ферми. Алгоритм оптимізації конструкції методом стохастичного імітаційного моделювання. Результати розрахунку базового варіанту конструкції.

Результати стохастичного імітаційного моделювання. Визначення оптимального варіанту конструкції.



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>Розділ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ .....</b>	<b>8</b>
1.1. Задача оптимізації металевих конструкцій.....	8
1.2. Цільова функція задачі оптимізації металевих конструкцій .....	11
1.3. Аналіз підходів до розв’язку задачі оптимізації металевих конструкцій.....	12
1.3.1. Метод послідовних наближень.....	13
1.3.2. Генетичний алгоритм.....	14
1.3.3. Модель остигання речовини до абсолютного нуля.....	16
1.3.4. Метод стохастичного імітаційного моделювання .....	17
1.4. Висновки до розділу 1 .....	19
<b>Розділ 2 МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРОСТОРОВОЇ МЕТАЛЕВОЇ ФЕРМИ МЕТОДОМ СТОХАСТИЧНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ .....</b>	<b>20</b>
2.1. Вихідні параметри для оптимізації конструкції просторової ферми.....	20
2.2. Алгоритм оптимізації конструкції методом стохастичного імітаційного моделювання .....	22
2.3. Параметри скінченно-елементної моделі.....	30
2.4. Висновки до розділу 2.....	32
<b>Розділ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРОСТОРОВОЇ ФЕРМИ МЕТОДОМ СТОХАСТИЧНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ .....</b>	<b>34</b>
3.1. Результати розрахунку базового варіанту конструкції. ....	34
3.2. Результати стохастичного імітаційного моделювання варіантів конструкції просторової металеві ферми. ....	37
3.3. Визначення оптимального варіанту конструкції.....	46

3.4. Висновки до розділу 3 .....	49
<b>Розділ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....</b>	<b>52</b>
4.1. Законодавча база України про охорону праці .....	52
4.2. Техніка безпеки при виконанні монтажних робіт для металевих конструкцій.....	53
4.3. Класифікація надзвичайних ситуацій.....	56
4.4. Заходи підвищення стійкості об'єкту в надзвичайних ситуаціях ...	57
4.5. Висновки до розділу 4.....	58
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>59</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ.....</b>	<b>61</b>
<b>ДОДАТОК А. Фрагмент програми для генерації випадкових значень варіативних параметрів моделі .....</b>	<b>64</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми роботи.** Задачі оптимізації будівельних конструкцій за певними параметрами доволі часто зустрічаються в практиці проектування, особливо для металевих конструкцій. Цільовою задачею оптимізації найчастіше виступає мінімізація матеріаломісткості чи вартості конструкції, рідше – її будівельної висоти чи інших розмірів [1, 2].

Вирішення даної задачі оптимізації може виконуватися різними способами [1, 3, 4], зокрема

- 1) шляхом застосування рекомендацій, отриманих з досвіду їх експлуатації;
- 2) методом послідовних наближень;
- 3) способом стохастичного моделювання;
- 4) за допомогою генетичного алгоритму;
- 5) з допомогою моделі остигання речовини до абсолютного нуля.

Задача оптимізації конструкції ферм з метою мінімізації їх маси є актуальною науковою проблемою, вирішення якої дозволяє зменшити собівартість виготовлення, транспортування та монтажу металоконструкцій при забезпеченні ними необхідних експлуатаційних властивостей.

**Об’єкт дослідження** – просторова чотиригранна розкісна ферма покриття довжиною 30 м та шириною 1,5 м.

**Предмет дослідження** – оптимізація конструкції просторової ферми за критерієм мінімальної маси.

**Мета роботи** – розробка методики оптимізації конструктивних параметрів просторової ферми з використанням стохастичного імітаційного моделювання.

Для досягнення вказаної мети було сформульовано наступні **задачі**:

- проаналізувати способи оптимізації конструктивних параметрів ферм;
- розробити методику генерації варіантів конструкції шляхом стохастичного імітаційного моделювання по методу Монте-Карло;
- виконати перевірку згенерованих варіантів за граничними станами;

- визначити оптимальний варіант конструкції з мінімальною масою.

**Методи дослідження:** описовий, імітаційного моделювання, Монте-Карло, метод скінченних елементів.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблено та апробовано методику оптимізації конструкції просторової металеві ферми методом стохастичного імітаційного моделювання.

**Практична значимість результатів дослідження.** В роботі виконано оптимізацію конструктивних параметрів чотиригранної просторової ферми прольотом 30 м за критерієм мінімізації її маси методом стохастичного імітаційного моделювання. Розроблено програмне забезпечення для генерування варіантів конструкції за допомогою методу Монте-Карло. З використанням методу скінченних елементів обчислено характеристики напружено-деформівного стану для всіх згенерованих варіантів конструкції. Запропонована методика оптимізації може бути використана для інших типів металевих конструкцій.

**Апробація результатів роботи.** Отримані результати наукових досліджень доповідались на X Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» та на V Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання».

**Публікації.** Застосування методу стохастичного імітаційного моделювання для оптимізації конструктивних параметрів просторової ферми / Б.С. Крохмальний, В.М. Фірута, А.З. Ольшанський, А.П. Сорочак // Актуальні задачі сучасних технологій: збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 24-25 листопада 2021). – Т. 1. – Т. : ФОП Паляниця В.А., 2021. – С. 46-47.

Крохмальний, Б.С., Хумало П. Методи оптимізації конструктивних параметрів будівельних конструкцій // Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання : збірник тез доповідей V Міжнародної студентської науково-технічної конференції (Тернопіль, 28-29 квітня 2022). –Т. : ТНТУ, 2022. – С. 19-20.

**Ключові слова:** МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, СТОХАСТИЧНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТАЛЕВА ФЕРМА, ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ.



## Розділ 1

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

### 1.1. Задача оптимізації металевих конструкцій

За останні півстоліття у всьому світі спостерігається зростання інтересу до просторових каркасних конструкцій. «Пошук нових конструктивних форм для розміщення великих безперешкодних приміщень був завжди головним завданням архітекторів та інженерів» [5]. З появою нової будівельної техніки і будівельних матеріалів, просторові каркаси часто задовольняють вимоги для легкості, економії та швидкості будівництва [6]. У цьому процесі було досягнуто значного прогресу розвитку просторових рам та ферм. Великий обсяг теоретичних та експериментальних програм досліджень виконувались багатьма університетами та науково-дослідними установами в різних країнах [2].

Галузь застосування металевих ферм в будівництві дуже широка, найбільше розповсюдження вони знайшли «в покриттях виробничих та громадських будівель, а також у великогабаритних спорудах (великопролітні конструкції, башти, опори ліній електропередач, транспортерні галереї, прольоти мостів, в'язеві системи каркасів будівель тощо)» [7].

За останні кілька десятиліть поширення просторових ферм було пов'язано головним чином з їх великим структурним потенціалом і можливістю підкреслити візуальну виразність конструкцій. Демонструються нові та творчі застосування просторових ферм в загальному асортименті типів будівель, таких як спортивні арени, виставкові павільйони, актові зали, транспортні термінали, авіаційні ангари, майстерні та склади [2]. Багато цікавих проектів було розроблено та побудовано по всьому світу з використанням різноманітних конфігурацій (рис. 1.1).

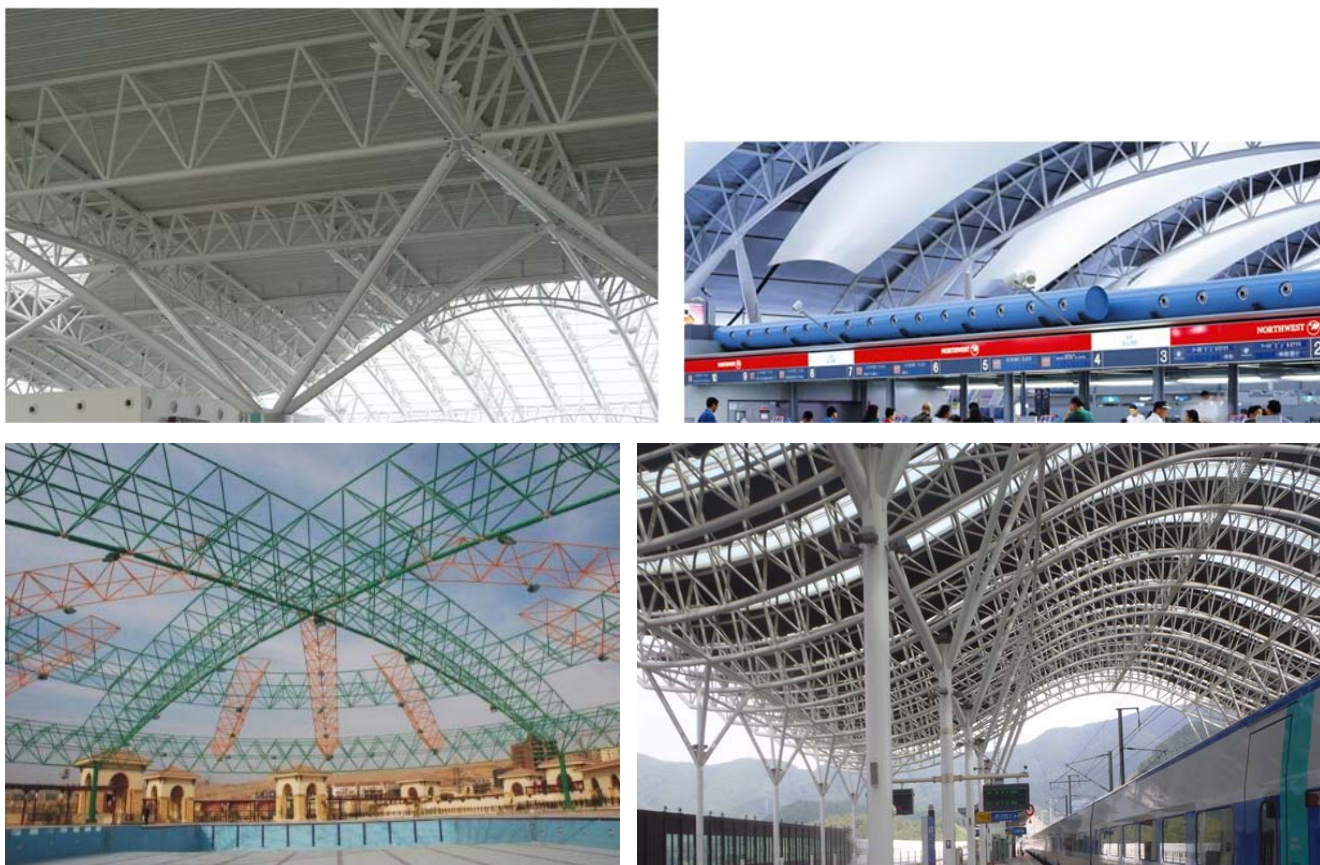


Рисунок 1.1 – Приклади використання просторових металевих ферм

Серед важливих факторів, що впливають на швидкий розвиток просторових ферм, можна назвати наступні.

По-перше, пошук великого внутрішнього простору завжди був у центрі уваги людської діяльності. Отже, спортивні турніри, культурні вистави, масові зібрання, виставки можуть проводитися під одним дахом. Сучасне виробництво і потреби в більшій операційній ефективності також створили попит на великий простір з мінімальним втручанням внутрішніх опор. Просторові рами та просторові ферми забезпечують перевагу того, що внутрішній простір можна використовувати різними способами і, таким чином, є ідеальним для таких вимог [1].

Просторові рами та ферми дуже статично невизначені, і їх аналіз призводить до непростих обчислень вручну. Складність аналізу таких систем сприяла їх обмеженому використанню. Але широке впровадження засобів комп'ютерного розрахунку та моделювання докорінно змінило весь підхід до аналізу просторових

конструкцій. Використовуючи комп'ютерні програми, можна аналізувати дуже складні просторові конструкції з великою точністю та меншими затратами часу [7].

На ефективність роботи просторових ферми впливає ряд конструктивних параметрів, основні з яких було проаналізовано в роботі [8]:

- 1) статична схема ферми;
- 2) тип решітки;
- 3) висота та довжина ферми;
- 4) перерізи елементів.

В математиці та інформатиці оптимізацією називають «вибір за певним критерієм найкращого елемента з множини доступних альтернатив» [9].

В математичному сенсі задача оптимізації зводиться до знаходження екстремального (тобто мінімального або максимального) значення деякої дійсної функції  $f$ , визначеної на певній множині дозволених значень її змінних.

Розглянемо, що представляє собою задача оптимізації конструкції просторової металевої ферми.

Зазвичай всі панелі просторових ферм виконуються уніфікованими, що значно спрощує їх розрахунок та виготовлення. Проте, такий підхід володіє рядом недоліків, зокрема на певних ділянках ферми тримка здатність елементів може використовуватися неповністю, тобто буде використано більше матеріалу, ніж мінімально необхідно для забезпечення надійного функціонування конструкції. В свою чергу, це призводить до збільшення маси ферми. Для підвищення ефективності використання матеріалу вирішують задачу оптимізації конструктивних параметрів ферми. В найпростішій постановці вона полягає лише в підборі більш оптимальних перерізів елементів на різних ділянках ферми [3].

Поряд з цим, можна сформулювати задачу оптимізації параметрів просторової ферми в більш загальному і складному випадку, що включає в себе не лише підбір оптимальних перерізів, а й вибір оптимальних значень геометричних параметрів решітки ферми для кожної ділянки [4]. В якості таких параметрів можна, наприклад, прийняти довжини окремих панелей чи тип решітки ферми.

В цьому випадку задача оптимізації конструктивних параметрів просторових ферм буде полягати в знаходженні такої комбінації геометричних параметрів для всіх панелей, яка даватиме шукане значення критерію оптимізації, що називають цільовою функцією.

## **1.2. Цільова функція задачі оптимізації металевих конструкцій**

Задачі оптимізації будівельних конструкцій за певними параметрами доволі часто зустрічаються в практиці проектування, особливо для металевих конструкцій [10]. Основною метою постановки та розв'язування такого роду задач є досягнення економічної ефективності проектованої конструкції за певним критерієм. Тому цільовою функцією задачі оптимізації найчастіше виступає мінімізація матеріаломісткості чи вартості конструкції, рідше – її будівельної висоти чи інших розмірів.

Таким чином, цільову функцію для задачі оптимізації за критерієм мінімальної маси ферми в математичному записі можна представити як

$$\Sigma M_f \rightarrow \min$$

На практиці основна складність полягає саме у формальному визначенні даної цільової функції. Просторова ферма в кожному випадку є доволі складною конструкцією, що включає в себе взаємозв'язки великої кількості стержневих елементів. Тому записати аналітичний вираз, який однозначно визначає масу конструкції на основі всіх її геометричних та жорсткісних параметрів, в загальному випадку неможливо [4].

Не маючи явно заданої цільової функції, задачі оптимізації металевих просторових ферм розв'язують за допомогою ряду математичних методів теорії оптимізації.

### **1.3. Аналіз підходів до розв'язку задачі оптимізації металевих конструкцій**

Задача оптимізації конструкції ферм на практиці доволі часто вирішується шляхом застосування рекомендацій, отриманих з досвіду їх експлуатації [12]. Даний спосіб ґрунтується на узагальнених емпіричних даних та жодним чином не враховує особливостей конкретної конструкції, що проектується. Він не дає жодної гарантії що обраний розв'язок буде знаходитися в околі екстремуму цільової функції оптимізації, тобто справді буде найкращим.

Для отримання екстремальних значень цільової функції з більшою імовірністю використовують ряд математичних алгоритмів, що були розроблені в теорії оптимізації на протязі останніх десятиліть. Вони потребують значної кількості обрахунків та носять переважно ітерацій характер. Для їх практичного використання необхідне застосування спеціалізованих комп'ютерних програм, які дозволяють одержати результат розв'язку задачі оптимізації за прийнятний час [9]. При цьому, різні алгоритми значною мірою відрізняються між собою за способом наближення до шуканого екстремуму.

В загальному, методи розв'язку задачі оптимізації за характером використовуваних алгоритмів поділяють на [9]:

- 1) детерміновані;
- 2) випадкові (стохастичні);
- 3) комбіновані

До таких алгоритмів розв'язку задачі оптимізації, що можуть бути застосовані до параметричної оптимізації металевих конструкцій, зокрема просторових ферм, можна віднести наступні:

- 1) метод послідовних наближень;
- 2) генетичний алгоритм;
- 3) модель остигання речовини до абсолютного нуля;
- 4) метод стохастичного імітаційного моделювання.

Розглянемо їх більш детально.

### 1.3.1. Метод послідовних наближень

Метод послідовних наближень полягає в поступовому підборі таких параметрів конструкції, які наближають цільову функцію до необхідного критерію оптимізації. В процесі наближення зазвичай надають нових значень лише одному параметру, після чого оцінюють його вплив на результат. Якщо він виявляється негативним, тобто не наближає цільову функцію до шуканого екстремуму, дану зміну значення параметру відмінюють і переходять до зміни значень іншого параметру задачі оптимізації [1].

Очевидно, що для відносно простих задач, які характеризуються невеликою кількістю параметрів, даний підхід дозволяє за відносно невелику кількість ітерацій визначити варіант конструкції, який наближається до оптимального.

Проте, зі збільшенням кількості параметрів складність розв'язку задачі даним методом нелінійно зростає разом з кількістю можливих поєднань даних параметрів. Для реальних просторових конструкції, що складаються з сотень елементів, для кожного з яких можливий підбір кількох різних параметрів, розв'язок такої задачі вимагає величезної кількості ітерацій.

Також слід зауважити, що метод послідовних наближень не гарантує знаходження глобального мінімуму чи максимуму цільової функції, а натомість може наближатися до локального екстремуму. Даний факт не дозволяє однозначно стверджувати, що для складних конструкцій знайдений розв'язок задачі оптимізації буде гарантовано найкращим.

Якість оптимізації методом послідовних наближень значною мірою залежить від кількості варіантів конструкції та ширини охоплення можливих комбінацій конструктивних параметрів при їх створенні. Очевидно, що розв'язок задачі оптимізації в цьому випадку буде значною мірою залежати від досвіду проектувальника, на основі якого він обиратиме як самі конструктивні параметри, значення яких змінюватиметься, так і можливі значення даних параметрів. Такий підхід є доволі суб'єктивним та не гарантує включення до розгляду та порівняння варіантів конструкції з найбільш оптимальними параметрами, тобто знаходження глобального мінімуму обраної функції оптимізації.

Разом з тим даний спосіб є досить трудозатратним, оскільки вимагає значних затрат часу проєктувальника на створення якісних варіантів конструкції для розгляду. Навіть якщо сам розрахунок варіантів виконується автоматизованим способом з використанням розрахункових комплексів, побудова ряду моделей з різними значеннями конструктивних параметрів, аналіз та порівняння результатів їх розрахунку часто виконується вручну. Це робить оптимізацію багатьох типів металоконструкцій недоцільною з економічної точки зору, оскільки ефект від оптимізації при дрібносерійному виготовленні може виявитися меншим, ніж власне затрати на оптимізацію.

### **1.3.2. Генетичний алгоритм**

Генетичний алгоритм, який використовує модель дарвінівської еволюції, більш складний. Кожен із побудованих у процесі оптимізації варіантів конструкції виступає як особина зі своїм набором генів – геномом [1].

Як параметр пристосованості популяції особин виступає цільова функція оптимізації задачі. Геномом можуть бути геометричні параметри конструкції. Додатковою умовою оптимізації є збереження конструкцією несучої здатності [1, 3].

Процес еволюції в даному методі носить ітерацій характер, тобто послідовно розглядаються різні покоління конструкції, кожне з яких створене на основі відбору особин попереднього покоління. У кожному поколінні народжується деяка кількість варіантів конструкції – особин. Кожна особина має свій набір генів, який певною мірою відрізняється від генів попереднього покоління. Якщо особина сильно віддаляється від умови пристосованості, то вона гине, а ген, носієм якого вона є, відсівається разом із нею як неефективний. В результаті виживають найбільш пристосовані особини. Це означає, що з кожним наступним поколінням в популяції залишаються тільки кращі варіанти розв'язку задачі, які конкурують в подальшому між собою. Схема роботи генетичного алгоритму показана на рис. 1.2.

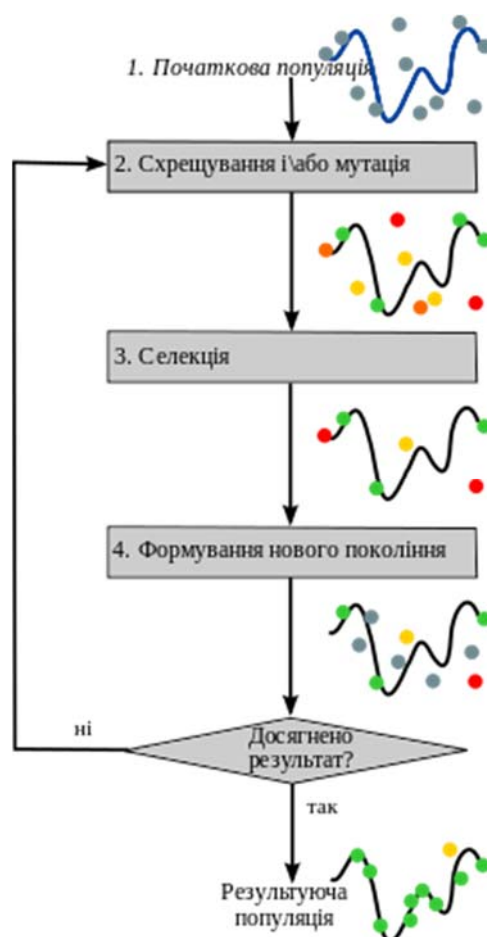


Рисунок 1.2 – Схема роботи генетичного алгоритму.

Важливим є те, що якщо одна особина отримала ген, що сильно відрізняється від абсолютної більшості своїх родичів на краще, то вона починає перетягувати весь процес еволюції на себе. Таким чином, у дуже складних завданнях ніколи не можна бути впевненим, що еволюція пішла у правильному напрямку. Завжди може з'явитися особина, яка буде різко виділятися із загальної маси та перетягне весь процес на себе. Проте процес оптимізації можна вважати завершеним, коли кілька сотень поколінь не виявляється така особина з найкращим геном.

Варто зазначити, що за рахунок своєї природи генетичний алгоритм дозволяє знаходити значення всіх локальних екстремумів в області визначення цільової функції та знаходити найкращий розв'язок задачі оптимізації, тобто глобальний мінімум або максимум.

Процес знаходження оптимального розв'язку може потребувати розрахунку кількох тисяч поколінь, кожне з яких включатиме сотні особин. І хоч цей процес



повністю автоматичний, він може потребувати значних затрат часу та обчислювальних ресурсів.

### **1.3.3. Модель остигання речовини до абсолютного нуля**

Алгоритм, що використовує модель остигання речовини до абсолютного нуля, є дещо простішим. У його основі лежить принцип стабілізації молекул речовини у певному положенні рівноваги за температури абсолютного нуля [9]. Параметри конструкції можна представити як деяку кількість молекул, що взаємодіють між собою. Зміна значення кожного з параметрів розглядається як коливання молекул відносно положення рівноваги.

Сумарна енергія даних коливань всіх молекул представляє собою температуру, яка є аналогом цільової функції. Шляхом послідовних ітерацій, надаючи певних коливань окремим молекулам, тобто змінюючи значення деяких параметрів задачі, визначаються такі комбінації, які знижують температуру якнайближче до абсолютного нуля.

При охолодженні групи молекул вони займають одне з найбільш стабільних положень, яке є одним з шуканих екстремумів задачі оптимізації.

Варто враховувати, що при використанні обох алгоритмів завжди залишається ймовірність виявлення того, що обраний напрямок наближення невірний і при принципово іншій комбінації параметрів існує інше, більш краще рішення.

Для різних завдань може бути найбільш ефективним як один, так і інший алгоритм, а іноді їх послідовне застосування [9]. Наприклад, алгоритм остигання речовини швидко знаходить кілька напрямків найбільш відповідних комбінацій параметрів, а остаточну оптимальну комбінацію краще шукає генетичний алгоритм. Часто застосування такого комбінованого підходу дає можливість отримати шуканий розв'язок задачі оптимізації за набагато менший час.

### 1.3.4. Метод стохастичного імітаційного моделювання

Як зазначалося раніше, для складних систем важко отримати опис їх функціонування чи цільової функції задачі оптимізації в аналітичній формі, проте процес їх функціонування або досягнення цільової функції може бути відносно легко описаний алгоритмом імітації. В свою чергу, під імітацією «розуміють симуляцію (штучне відтворення в контрольованих умовах) з використанням спеціальної комп'ютерної програми всього процесу функціонування системи» [9]. Для одержання достовірних даних про поведінку системи, що моделюється, необхідне виконання значної кількості повторів роботи імітаційної моделі (так званих прогонів). Використання даного підходу називають імітаційним моделюванням.

Таким чином, виконуючи імітаційне моделювання, ми імітуємо процес функціонування системи (в нашому випадку – роботи просторової металеві ферми), використовуючи певний алгоритм, що імплементований у формі комп'ютерної програми.

Стохастичне моделювання – це «імітаційне моделювання процесу, поведінка якого не є детермінованим, і подальший стан такої системи описується як величинами, які можуть бути передбачені, так і випадковими величинами» [9].

Імовірнісні характеристики, наявні в імітаційних моделях, можуть враховуватися з використанням спеціальних чисельних методів, відомих як методи Монте-Карло.

Методи Монте-Карло – це «чисельні методи, засновані на отриманні великого числа реалізацій випадкового процесу, який формується таким чином, щоб його імовірнісні характеристики співпадали з аналогічними величинами розв'язуваної задачі» [12].

При розв'язку задачі оптимізації стохастичними методами параметри системи представляються як випадкові величини. Для їх визначення задаються допустимими межами, що відповідають області, на якій визначена цільова функція задачі оптимізації, законом їх розподілу та алгоритмом генерації. В якості законів розподілу випадкових величин при імітаційному моделюванні за допомогою

методу Монте-Карло найчастіше використовують рівномірний або нормальний розподіл.

Таким чином, кожен результат імітаційного моделювання (прогон моделі) буде представляти собою один з можливих варіантів конструкції. Її параметри, такі як геометричні розміри чи перерізи, будуть згенеровані випадковим чином за допомогою методу Монте-Карло. Сам варіант конструкції буде повністю випадковим і незалежним відносно інших можливих варіантів.

При цьому існує можливість того, що згенерований методом Монте-Карло варіант конструкції не буде задовольняти додатковим умовам задачі оптимізації. В нашому випадку це означає, що він не буде задовольняти перевірки тримкої здатності конструкції за граничними станами.

Очевидно, що для знаходження локального чи глобального екстремуму цільової функції задачі оптимізації необхідне виконання значної кількості прогонів імітаційного моделювання. Окремі прогони незалежні між собою, що не дозволяє визначити ключові параметри, котрі найбільше впливають на цільову функцію оптимізації, на відміну від генетичного алгоритму.

Проте важливою перевагою методу стохастичного імітаційного моделювання є простота його реалізації, що не вимагає аналізу вагових коефіцієнтів кожного параметра після проведення серії обчислень та спрощує програмну реалізацію даного алгоритму.

Використання методу Монте-Карло при імітаційному моделюванні включає в себе наступні основні етапи [12]:

1. Аналіз конструкції та виявлення основних параметрів системи.
2. Вибір функцій розподілу випадкових значень для обраних параметрів системи, що може виконуватися шляхом аналізу конструкції чи її аналогів.
3. Визначення максимальної кількості прогонів імітаційного моделювання.
4. Задання цільової функції у формі, зручній для обчислення за результатами прогонів імітаційного моделювання.
5. Проведення імітаційного моделювання за допомогою комп'ютерних програм та аналіз отриманих результатів

#### **1.4. Висновки до розділу 1**

Для підвищення ефективності використання матеріалу металоконструкцій вирішують задачу оптимізації їх конструктивних параметрів. Задача оптимізації конструктивних параметрів просторових ферм полягає в знаходженні такої комбінації геометричних параметрів для всіх елементів, яка забезпечує мінімальне чи максимальне значення цільової функції. У будівництві найчастіше цільовою функцією задачі оптимізації виступає мінімізація матеріаломісткості чи вартості конструкції.

Задачі оптимізації металевих просторових ферм розв'язують за допомогою ряду математичних методів теорії оптимізації, серед яких виділяють метод послідовних наближень, генетичний алгоритм, модель остигання речовини до абсолютного нуля та метод стохастичного імітаційного моделювання.

## Розділ 2

### МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРОСТОРОВОЇ МЕТАЛЕВОЇ ФЕРМИ МЕТОДОМ СТОХАСТИЧНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

#### 2.1. Вихідні параметри для оптимізації конструкції просторової ферми

Об'єктом дослідження в даній роботі виступає просторова розкісна ферма покриття прольотом  $L=30$  м. В якості вихідної схеми для подальшого розв'язування задачі параметричної оптимізації за критерієм мінімальної маси було прийнято типову схему з 20 панелей однакової довжини [13]. Висота ферми  $H=1,5$  м, ширина  $B=1,5$  м. Дані значення вважалися фіксованими та не змінювалися в процесі оптимізації. Схема базової ферми зображена на рисунку 2.1.

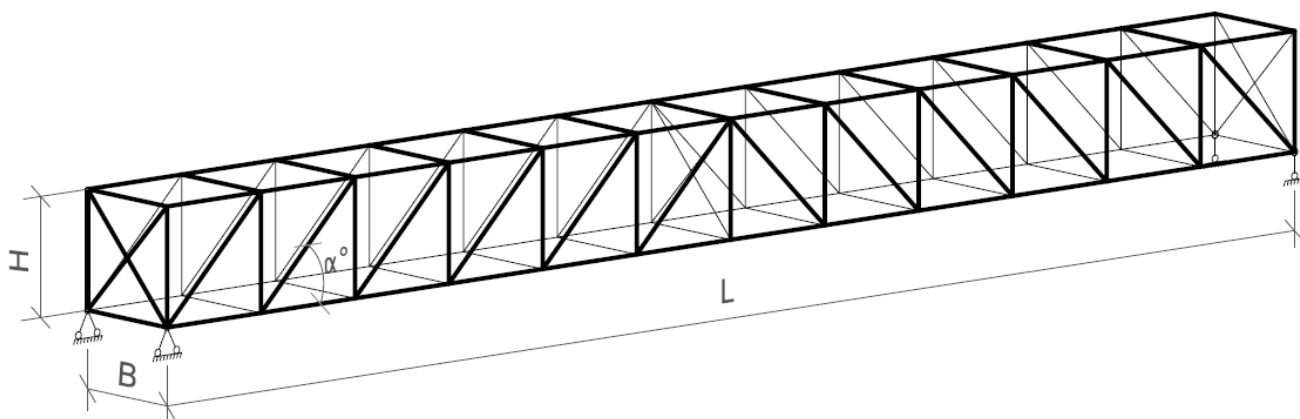


Рисунок 2.1 – Схема базової просторової ферми.

Опирання ферми прийнято шарнірним.

Експлуатаційне навантаження прикладалося у вузлах верхнього поясу у формі зосереджених сил. Величина навантаження визначалася виходячи з ваги прогонів та покриття у формі сендвіч-панелей на основі профільованого сталевого настилу і залишалася незмінною в процесі оптимізації. Додатково враховувалася власна вага елементів конструкції. Схема прикладання навантаження наведена на рис. 2.2.

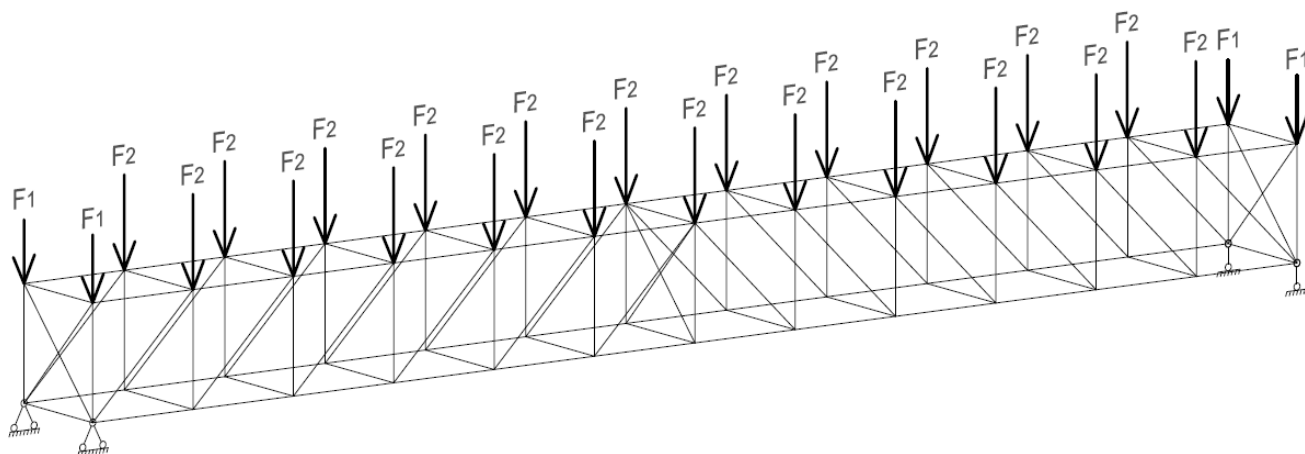


Рисунок 2.2 – Схема експлуатаційного навантаження на ферму

Перерізи елементів базової форми прийнято з квадратної труби та наведено в таблиці 2.1. Матеріал всіх елементів – сталь С255. В процесі оптимізації перерізи елементів підбиралися, виходячи з умов забезпечення перевірки за граничними станами, а матеріал залишався незмінним.

Таблиця 2.1 – Таблиця жорсткостей елементів базової ферми.

Тип жорсткості	Назва	Параметри
1 (Пояс)	Замкнутий гнучий зварний квадратний профіль 160 x 6 по ГОСТ 30245-2012	$q = 0.27743$ кН/м, $EF = 742218$ кН, $EI_y = 2894.3$ кНм <sup>2</sup> , $EI_z = 2894.3$ кНм <sup>2</sup> , $GI_k = 1709.26$ кНм <sup>2</sup> , $Y_1 = 4.87441$ см, $Y_2 = 4.87441$ см, $Z_1 = 4.87441$ см, $Z_2 = 4.87441$ см
2 (Розкоси)	Замкнутий гнучий зварний квадратний профіль 70 x 5 по ГОСТ 30245-2012	$q = 0.0950819$ кН/м $EF = 254538$ кН, $EI_y = 174.336$ кНм <sup>2</sup> , $EI_z = 174.336$ кНм <sup>2</sup> , $GI_k = 107.104$ кНм <sup>2</sup> , $Y_1 = 1.9569$ см, $Y_2 = 1.9569$ см, $Z_1 = 1.9569$ , $Z_2 = 1.9569$ см

## 2.2. Алгоритм оптимізації конструкції методом стохастичного імітаційного моделювання

В даній роботі пропонується генерувати варіанти конструкції просторової металеві ферми автоматично з використанням стохастичного імітаційного моделювання. Воно набуло широкого поширення для розв'язку задач оптимізації в економіці, теорії управління, фізиці тощо [14]. Загальні принципи даного підходу розглянуто в розділі 1.3.4.

Даний підхід використовує метод Монте-Карло для генерування випадкових значень конструктивних параметрів в заданих межах (для прикладу, типу решітки чи довжини різних панелей ферми), на основі яких створюється скінченно-елементна модель та виконується перевірка її тримкої здатності.

В даній роботі в якості таких змінних параметрів приймали довжину кожної панелі ферми та тип розкосів. Решту параметрів геометрії ферми вважали незмінними, їх значення були однаковими для всіх варіантів конструкцій і складала – довжина  $L = 30$  м, ширина  $B = 1,5$  м, висота  $H = 1,5$  м.

З арифметичної точки зору визначати довжину кожної панелі за методом Монте-Карло було незручно, оскільки в цьому випадку довжина останньої панелі визначалася з умови гарантування незмінної повної довжини ферми та могла мати неприйнятні з практичної точки зору значення (наприклад, близькі до нуля). Натомість було запропоновано в якості змінних величин розглядати відхилення координат вузлів кожної проміжної панелі ферми від їх значення для базової схеми, для якої всі панелі мають однакову довжину. Зрозуміло, що координати крайніх вузлів ферми в цьому випадку залишалися незмінними. Це в подальшому дозволило спростити програмну реалізацію даного кроку алгоритму.

На можливі значення відхилення координати вузлів ферми відносно їх значення в базовому варіанті схеми накладалися наступні обмеження:

$$\begin{cases} x_i \geq x_{i0} - \frac{l_n}{4}; \\ x_i \leq x_{i0} + \frac{l_n}{4}; \end{cases}$$

де  $x_i$  – координата вузла  $i$ -ї панелі ферми для поточного варіанту конструкції;

$x_{i0}$  – початкове значення координати вузла  $i$  панелі

$l_n$  – довжина панелі базового варіанту схеми.

Дані обмеження впливають з геометричних міркувань та умови забезпечення фіксованої кількості панелей для всіх варіантів конструкції. Також вони дозволяють уникнути вироджених випадків з довжиною панелі, що наближається до нуля.

Як відомо, тип розкосів ферми може впливати значною мірою на її тримку здатність, що було показано зокрема в роботі [8]. Тому в процесі створення альтернативних варіантів конструкції просторової ферми вважаємо за необхідне в якості іншого варіативного параметра прийняте саме тип решітки ферми. В процесі побудови альтернативних варіантів конструкції випадковим чином вибирали один з трьох можливих типів решітки незалежно для кожної панелі. До таких типів решітки відносилися висхідна, низхідна та хрестова (рис. 2.3).

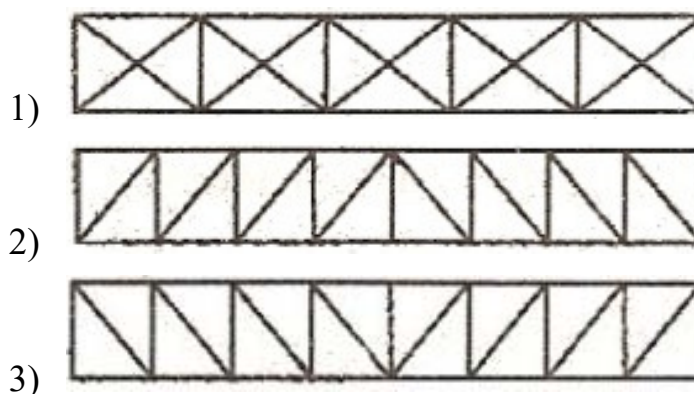


Рисунок 2.3 – Типи решіток ферми, прийняті в процесі моделювання:

1 – хрестова; 2 – висхідна; 3 – низхідна.

Після завершення генерації альтернативних варіантів інструкції за допомогою методу Монте-Карло необхідно провести розрахунок кожного з них. Очевидно, що виконувати такий розрахунок потрібно з використанням сучасних систем автоматизованого проектування, що дозволяють дуже швидко отримувати результати для окремого варіанту конструкції.



Основною складністю на даному етапі є формування валідних скінченно-елементних моделей, що придатні для розрахунку на основі значень варіативних параметрів конструкції, отриманих на етапі стохастичного моделювання. Зрозуміло, що створювати велику кількість подібних розрахункових схем вручну буде дуже трудозатратно. Для пришвидшення даних робіт корисним буде наявність функції параметричного моделювання в обраній програмі для розрахунку методом скінченних елементів. На жаль, на сучасному етапі дані підходи до параметричного моделювання знаходяться на стадії розробки і не впроваджені в більшості комерційних програмних пакетів [15]. Тому в даній роботі ми пропонуємо альтернативний спосіб автоматичного створення розрахункових моделей для всієї множини згенерованих варіантів конструкції.

Для цього пропонуємо використати особливість програмного пакету Ліра-САПР 2015, що полягає у використанні розрахунковим процесором програмного комплексу текстових файлів з описом задачі для виконання розрахунку. Мається на увазі, що скінченно-елементна модель, побудована в графічному середовищі Ліра-САПР, для розрахунку переводиться в текстове представлення.

Даний текстовий файл містить вичерпну інформацію про геометрію, в'язі, жорсткості, навантаження та інші параметри моделі. Це дозволяє нам за шаблоном текстового представлення скінченно-елементної моделі для базового варіанту просторової ферми створювати файли з описом розрахункових моделей всіх альтернативних варіантів конструкції без використання графічного середовища Ліра-САПР. Замість нього буде використана програмна реалізація генератора розрахункових схем в текстовому форматі програмного комплексу. Вона буде використовувати координати вузлів просторової ферми, що були отримані в результаті стохастичного імітаційного моделювання, та підставляти їх в шаблон текстового представлення розрахункової моделі.

Складність даного підходу полягає у необхідності забезпечення валідного формату даних у файлах текстового представлення розрахункових моделей програмного комплексу Ліра-САПР 2015. Дані файли мають строгу структуру і чіткий формат представлення даних, який не дуже зручний для розуміння

людиною, оскільки призначений для передачі даних між різними програмними модулями комплексу. Приклад текстового опису розрахункової моделі базового варіанту ферми представлено на рисунку 2.4.

```

03.txt: Блокнот
Файл  Редагування  Формат  Вигляд  Довідка
( 0/ 1; 03/ 2; 4/
4;
5:1 - 136 ;/
8; 1 /

28; 0 1 0 0 0 1 1 0 0; /
33;M 1 CM 100 T 1 C 1 /
39;
1: ЗАВАНТАЖЕННЯ 1 ;
2: ЗАВАНТАЖЕННЯ 2 ;
/
)
( 1/
10 4 5 36 /10 4 37 16 /10 4 1 3 /10 4 4 2 /
10 3 1 6 /10 3 6 7 /10 3 7 8 /10 3 8 9 /
10 3 9 10 /10 3 10 52 /10 3 52 53 /10 3 53 11 /
10 3 11 12 /10 3 12 5 /10 3 3 54 /10 3 54 38 /
10 3 38 39 /10 3 39 40 /10 3 40 13 /10 3 13 14 /
10 3 14 41 /10 3 41 42 /10 3 42 15 /10 3 15 36 /
10 3 2 17 /10 3 17 18 /10 3 18 19 /10 3 19 20 /
10 3 20 21 /10 3 21 22 /10 3 22 23 /10 3 23 24 /
10 3 24 25 /10 3 25 16 /10 3 4 26 /10 3 26 27 /
10 3 27 43 /10 3 43 28 /10 3 28 44 /10 3 44 29 /
10 3 29 30 /10 3 30 31 /10 3 31 45 /10 3 45 37 /
10 4 1 32 /10 4 32 17 /10 4 2 32 /10 4 32 6 /
10 4 17 6 /10 4 18 7 /10 4 19 8 /10 4 20 9 /
10 4 21 10 /10 4 22 52 /10 4 23 53 /10 4 24 11 /
10 4 25 12 /10 4 16 5 /10 4 2 1 /10 4 6 18 /
10 4 7 19 /10 4 19 9 /10 4 20 33 /10 4 33 10 /
10 4 9 33 /10 4 33 21 /10 4 10 34 /10 4 34 22 /
10 4 21 34 /10 4 34 52 /10 4 52 23 /10 4 12 35 /
10 4 35 16 /10 4 25 35 /10 4 35 5 /10 4 23 11 /
<
Рд 97, ствп 10    100%    Windows (CRLF)    ANSI

```

Рисунок 2.4 – Фрагмент текстового представлення розрахункової моделі

Після автоматичної побудови текстових описів розрахункових схем для всіх варіантів конструкції, одержаних внаслідок імітаційного статистичного моделювання, необхідно виконати їхній розрахунок. Для цього добре підходить пакетний режим роботи програмного комплексу Ліра-САПР 2015, який дозволяє легко вказати набір розрахункових моделей, розрахунок яких буде виконаний послідовно один за одним без участі користувача.

Обов'язковим кроком розрахунку кожної скінченно-елементної моделі є підбір оптимальних перерізів для всіх елементів конструкції, який виконується автоматично на основі заданих правил проектування. Це дозволяє коректно врахувати масу всіх елементів просторові ферми та виконати перевірку її тримкої здатності за граничними станами.

Очевидно, що у випадку, коли для деякого варіанту конструкції хоча б одна з перевірок граничного стану не виконується, даний варіант конструкції визнається неприйнятним і виключається з подальшого розгляду.

Після виконання розрахунку всіх моделей виконується кількісний та якісний аналіз результатів. Якщо одержаний варіант конструкції задовольняє вимоги міцності та жорсткості та при цьому дає менше значення цільової функції (в нашому випадку – маса ферми), то його приймають як локальний розв'язок.

Очевидно, що для одержання якісного результату необхідне проведення значного числа ітерацій в процесі імітаційного моделювання. Для забезпечення збіжності даного процесу встановлюють обмеження на максимальну кількість ітерацій чи на досягнення цільовою функцією певного значення. В даній роботі прийнято значення максимальної кількості прогонів імітаційного моделювання  $N = 1000$ . Дане значення з одного боку дозволяє згенерувати достатню кількість різноманітних випадкових варіантів конструкції, що будуть характеризуватися різними конструктивними параметрами, а з іншого дозволяє отримати результат задачі оптимізації за прийнятний час.

Підсумовуючи сказане, можемо виділити наступні кроки запропонованого алгоритму оптимізації конструкції методом стохастичного імітаційного моделювання:

1. Обираємо фіксовані параметри конструкції, які не будуть змінюватися в процесі оптимізації.
2. Обираємо варіативні конструктивні параметр ферми – довжина панелей, тип решітки, – для кожного з яких задаємося діапазоном припустимих значень.

3. За допомогою програми на мові Python по методу Монте-Карло генеруємо задану кількість варіантів конструкції з випадковими значеннями варіативних параметрів.

4. Методом скінченних елементів в програмному комплексі ЛІРА-САПР 2015 проводимо розрахунок моделей одержаних варіантів конструкції, виконуємо підбір перерізів та обчислюємо загальну масу конструкції.

5. Обираємо варіант конструкції з мінімальною масою, котрий при цьому проходить перевірки за граничними станами.

Блок-схема запропонованого алгоритму приведена на рис. 2.5.

Для реалізації описаного підходу за допомогою мови програмування Python було створено програму, яка виконує генерацію значень для обраних конструктивних параметрів просторової ферми методом Монте-Карло та створює набір файлів з текстовим представленням скінченно-елементних моделей за згенерованими параметрами.

Мову програмування Python було обрано для реалізації необхідного програмного забезпечення завдяки простоті синтаксису, відкритості екосистеми, зручності роботи та наявності великої кількості інформаційних ресурсів, готових прикладів та бібліотек. Це відкрите програмне забезпечення, яке може працювати в середовищі будь-якої операційної системи, не вимагає попередньої компіляції і потребує для роботи незначну кількість системних ресурсів [16].

Розроблена програма структурно складається з трьох основних модулів, кожен з яких має свою ділянку відповідальності відповідно з базовими принципами розробки програмного забезпечення. Загальна структура програми представлена на рис. 2.6

Перший модуль відповідає за зчитування вхідних даних, таких як максимальна кількість прогонів імітаційного моделювання, початкові значення та діапазон варіації параметрів моделі. Ці дані передаються програмі у вигляді текстового файлу конфігурації визначеного формату. Після формальної валідації вхідних даних даний модуль керує роботою процесу імітаційного моделювання та передає необхідні дані іншим модулям програми.

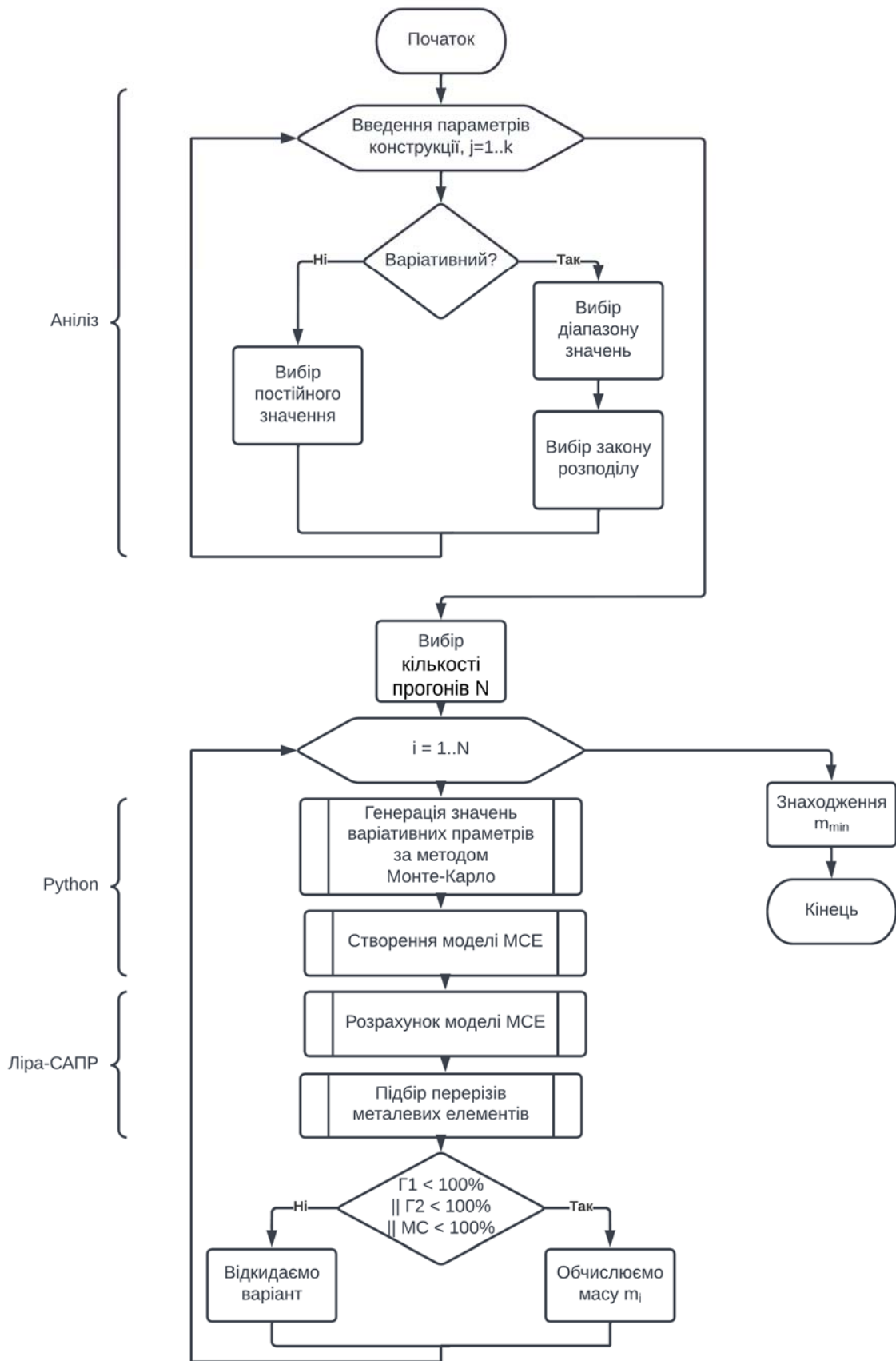


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритму оптимізації на основі стохастичного імітаційного моделювання

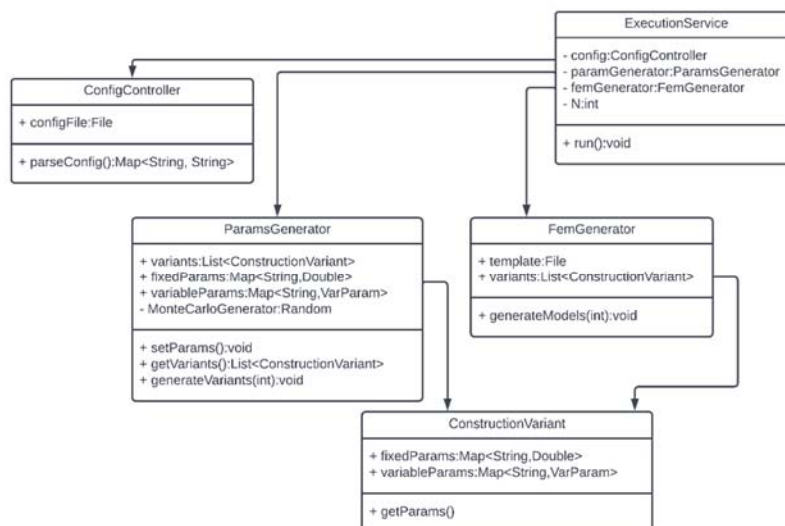


Рисунок 2.6 – Структура розробленої програми для стохастичного імітаційного моделювання

Другий модуль виконує основні операції імітаційного моделювання з використанням методу Монте-Карло. Використовуючи арифметичні та статистичні бібліотеки, доступні на мові програмування Python, даний модуль виконує генерацію конкретних значень всіх варіативних параметрів моделі. Для визначення відхилення координат вузлів панелі металевої ферми використовували неперервну функцію рівномірного розподілу в заданих межах. Це гарантувало однакову ймовірність випадання значень на всьому діапазоні області визначення для кожного параметра. Для вибору типу розкосів кожної панелі металевої ферми використовували стандартну функцію генерації випадкового цілочисельного значення в межах від 1 до 3 включно, де пізніше кожному значенню у відповідність ставився певний тип розкосу (див. рис. 2.3). Фрагмент лістингу програми для генерації варіантів конструкції наведено в додатку А.

Третій модуль розробленої програми призначений для створення файлів з текстовим представленням скінченно-елементної моделі для кожного варіанту конструкції на основі попередньо створеного шаблону для базового варіанту ферми. Програма виконує підстановку значень координат вузлів всіх проміжних панелей ферми, які були обчислені попереднім модулем, в потрібних місцях

текстового шаблону. Слід зауважити, що даний підхід жорстко прив'язаний до конкретної базової схеми конструкції і потребує значного доопрацювання у випадку, коли дана методика стохастичного імітаційного моделювання буде застосована до конструкції будь-якого іншого типу.

### 2.3. Параметри скінченно-елементної моделі

Розрахунок одержаних моделей для всіх варіантів конструкції, згенерованих за допомогою розробленої програми, виконувався за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР 2015 в лінійній постановці. Використовували ознаку схеми №5, що відповідає всім шести можливим ступеням вільності для вузлів [15].

Властивості всіх моделей були однаковими, відмінність полягала тільки в геометрії розкосів та координатах вузлів панелей просторової ферми.

Оскільки конструкція ферми, її властивості та навантаження є симетричними, було прийнято рішення скоротити розмірність задачі за рахунок врахування даних умов прямої симетрії. Тобто, в розрахунок методом скінченних елементів включалась лише половина конструкції просторової металеві ферми, результати для відкинutoї частини будуть симетричними.

Для коректного врахування умов симетрії в площині симетрії накладалися додаткові в'язі. Згідно методичних рекомендацій [15], напрямок додатково накладених в'язей повинен бути перпендикулярний до площини симетрії, коли іде мова про пряму симетрію. Оскільки поздовжня вісь просторові ферми була напрямлена вздовж осі  $X$  глобальної системи координат, то площина симетрії була паралельна до площини  $YOZ$ , а додаткові в'язі накладалися за наступними напрямками –  $X$ ,  $UY$ ,  $UZ$ .

Крім в'язей, викликаних умовами симетрії, на схему задавалися в'язі у вузлах опираючись вздовж напрямків  $X, Y, Z$ , що відповідає шарнірно нерухомому закріпленню.

Жорсткості на пояси та розкоси просторової ферми задавалися у відповідності до табл. 2.1 з бази даних металевого сортаменту програмного комплексу.

Для автоматичного підбору перерізів металевих елементів схеми за граничними станами згідно вимог [11] для них додатково задавали параметри матеріалу та додаткові характеристики розрахунку. При підборі перерізів металевих елементів використовували уніфікацію для елементів верхнього та нижнього поясів. Уніфікація розкосів не проводилася.

В моделі включали статичні навантаження, описані в розділі 2.1. Для врахування їх сумісної дії використовувалися розрахункові сполучення навантажень за [11]. При цьому, для завантаження вказувався тип завантаження «постійне».

Загальний вигляд скінченно-елементної моделі для базового варіанту ферми приведено на рис. 2.7.

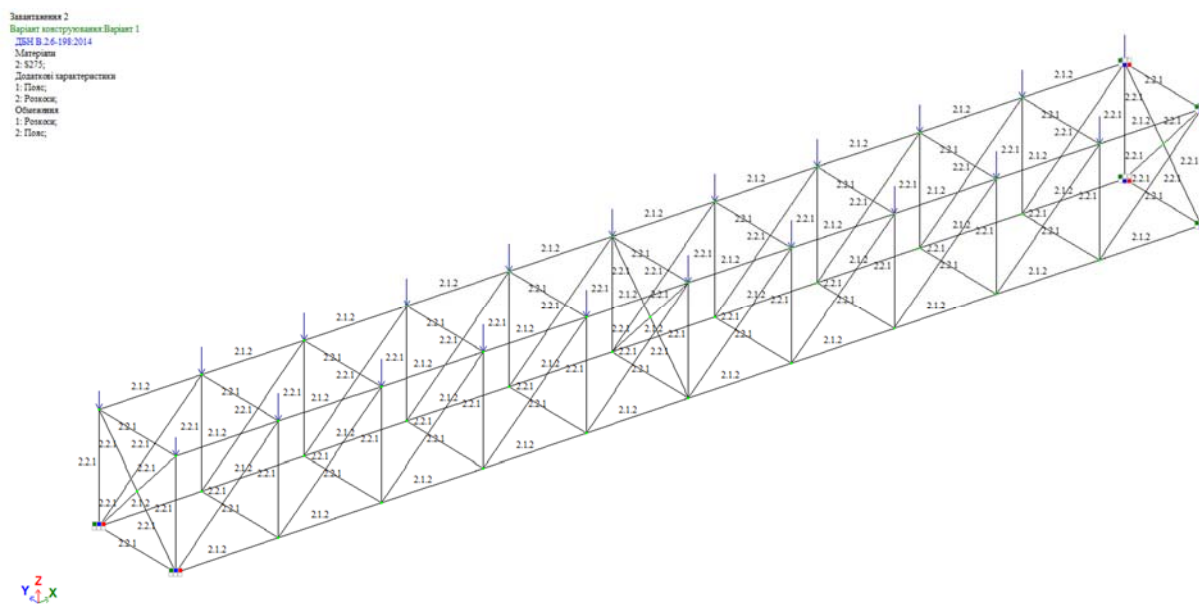


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд скінченно-елементної моделі для базового варіанту ферми

Для розрахунку всіх згенерованих моделей використовували пакетний режим роботи програмного комплексу Ліра-САПР 2015. В даному режимі користувач



може легко вказати набір розрахункових моделей, розміщених в одній чи кількох директоріях, розрахунок яких буде виконаний послідовно один за одним.

Внаслідок проведення розрахунку отримували набір мінімально необхідних перерізів всіх елементів схеми, що забезпечують її міцність, жорсткість та стійкість. Також можливі випадки, коли для певних елементів конструкції неможливо підібрати переріз з вказаного сортаменту таким чином, щоб задовольнити перевірки за граничним станом. Це цілком нормальний результат для схем конструкції, параметри яких генерувалися випадковим чином. Такі варіанти схеми виключалися з подальшого аналізу.

На основі отриманих перерізів виконувалася оцінка загальної маси ферми, мінімізація якої була обрана в якості цільової функції задачі оптимізації. Для автоматизації визначення маси кожного варіанту конструкції використовували функцію обчислення сумарних навантажень програмного комплексу Ліра-САПР. Її застосовували для власної ваги конструкції з підібраними перерізами за напрямком осі  $Z$ .

#### **2.4. Висновки до розділу 2**

Обрано базовий варіант конструкції просторової металевої ферми покриття довжиною  $L = 30$  м. Проаналізовано його характеристики та навантаження.

Створено скінченно-елементну модель базового варіанту просторові ферми, яка використовується в якості шаблону для отримання моделей всіх варіантів конструкції.

Серед геометричних параметрів просторової ферми виділено постійні, значення яких не будуть змінюватися в процесі стохастичного імітаційного моделювання, та варіативні, значення яких підлягають випадковій зміні. В якості постійних параметрів прийнято висоту, ширину і повну довжину ферми, а також тип перерізу. В якості варіативних параметрів обрано тип розкосів для кожної панелі ферми та довжину панелей. Обґрунтовано області визначення для кожного з варіативних параметрів моделі.

Обрано цільову функцію задачі оптимізації, якою виступає мінімізація загальної маси конструкції просторової металевої ферми.

Розроблено алгоритм оптимізації конструкції шляхом стохастичного імітаційного моделювання з використанням методу Монте-Карло. Основна ідея алгоритму полягає в автоматичній генерації великої кількості варіантів конструкції з випадковими значеннями варіативних параметрів, їх подальшому розрахунку та співставленні за значенням цільової функції оптимізації.

Розроблено програмне забезпечення, що реалізовує основні етапи запропонованого алгоритму та дозволяє автоматично створити розрахункові моделі методу скінченних елементів для всіх згенерованих варіантів конструкції.

### Розділ 3

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРОСТОРОВОЇ ФЕРМИ МЕТОДОМ СТОХАСТИЧНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

### 3.1. Результати розрахунку базового варіанту конструкції.

Для початку проаналізуємо результати розрахунку за допомогою методу скінченних елементів схеми базового варіанту конструкції металеві просторової ферми, яка представлена на рисунку 3.1.

Характеристики моделі, параметри жорсткості, навантаження та особливості її побудови описані в розділі 2.3.

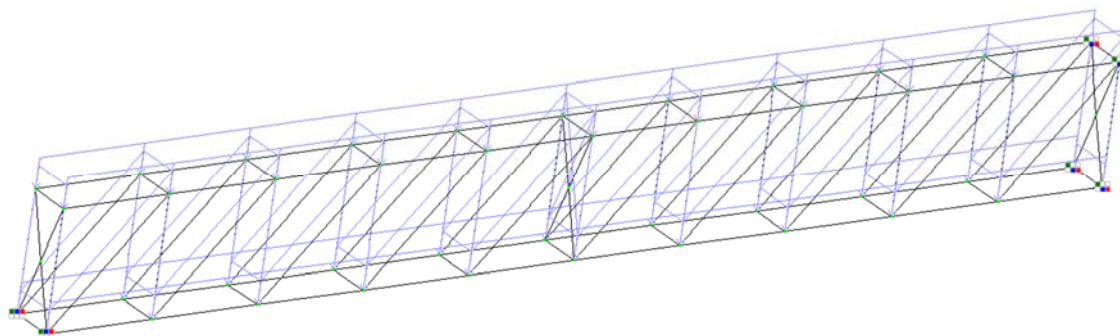


Рисунок 3.1 – Розрахункова модель базового варіанту просторової металеві ферми

Внаслідок розрахунку в лінійній постановці з використанням розрахункових сполучень навантажень встановлено, що максимальні переміщення вузлів базового варіанту металеві ферми в вертикальному напрямку вздовж осі  $Z$  (рис. 3.2, а) становлять 105 мм, а в горизонтальному напрямку вздовж осі  $X$  (рис. 3.2, б) – 11,7 мм.

Максимальне значення нормальної сили у елементах ферми (рис. 3.2, в) складає:

- для верхнього поясу –  $-943$  кН в центральних панелях;



граничними станами згідно [11]. Результати розрахунку представлено на рис. 3.3. Як бачимо, тримка здатність ферми за умовами міцності, жорсткості та місцевої стійкості для обраних перерізів (див. табл. 2.1) забезпечується.

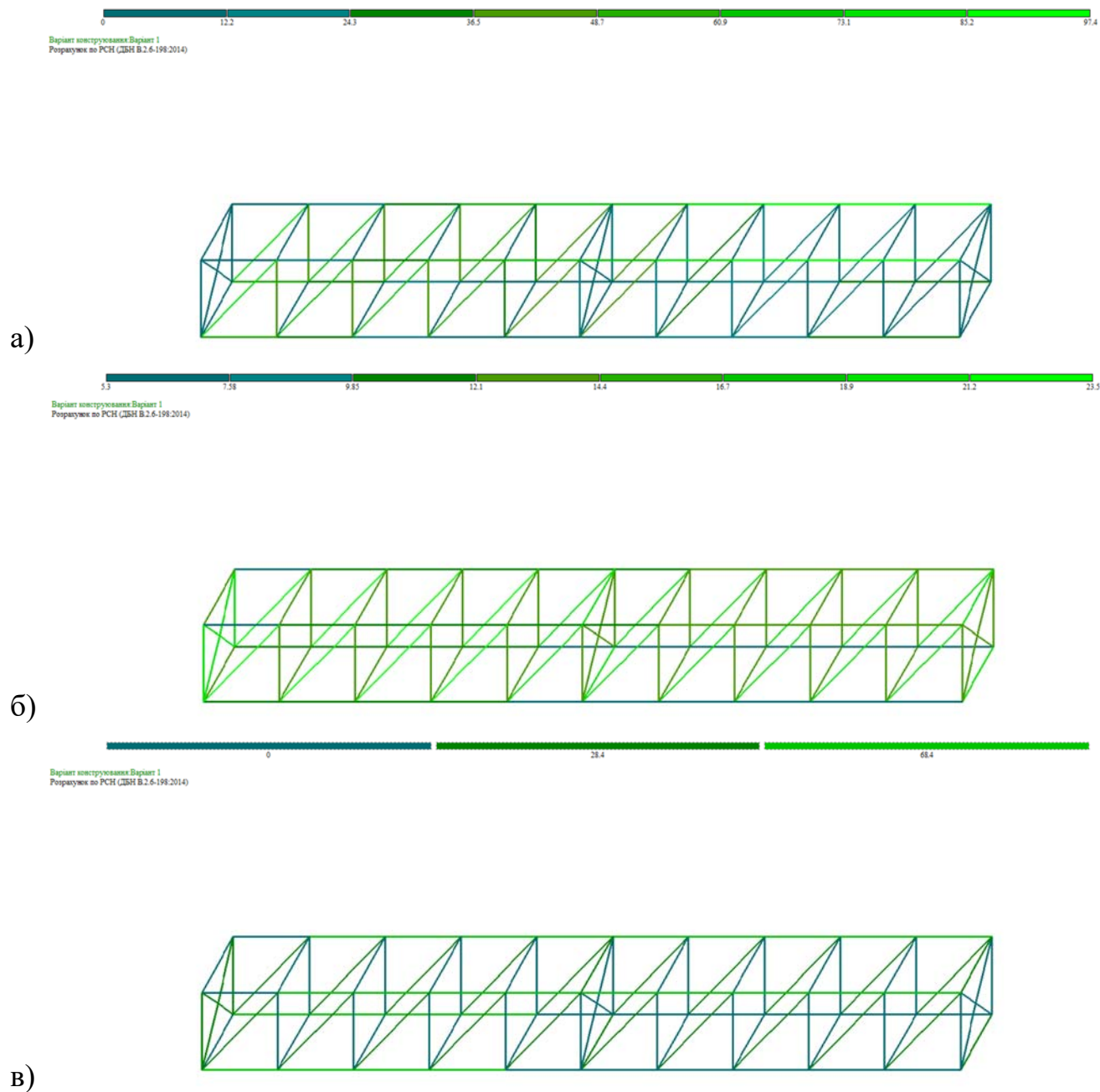


Рисунок 3.3 – Результати перевірки перерізів базового варіанту просторової металевої ферми:

а) – за першим граничними станом; б) – за другим граничним станом; в) – за місцевою стійкістю.

Зазначимо, що власна вага базового варіанту конструкції ферми складає 5745 кг без врахування зварних швів. Її приймаємо за початкове значення для цільової функції задачі оптимізації.

### 3.2. Результати стохастичного імітаційного моделювання варіантів конструкції просторової металевої ферми.

Проаналізуємо результати стохастичного імітаційного моделювання варіантів конструкції просторової металевої ферми за методикою, описаною в розділі 2.

Всього за допомогою методу Монте-Карло було згенеровано 1000 різних варіантів конструкції, які відрізнялися від базового значеннями варіативних параметрів – довжини панелей ферми та типу розкосів.

Для оцінки якості генерації випадкових величин було проведено статистичний аналіз значення варіативних параметрів для всіх згенерованих варіантів конструкцій. Середнє значення довжини панелі для даної вибірки склало  $Ml_n = 1,502$  м, що практично рівне відповідному значенню для базового варіанту конструкції. Стандартне відхилення розподілу  $\sigma = 0,291$  м. Гістограми розподілу приведені на рис. 3.4.

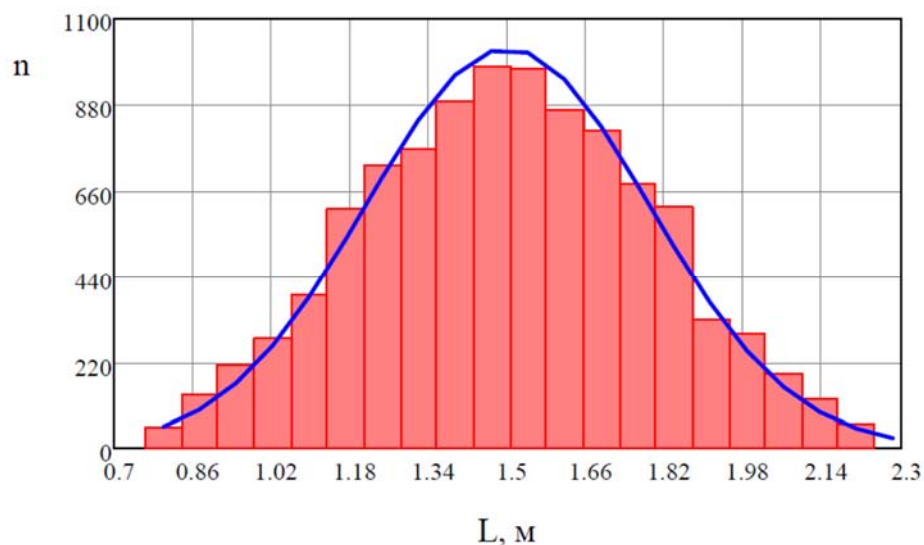


Рисунок 3.4 – Гістограма розподілу випадкових значень довжини панелей.

З аналізу результатів бачимо, що розподіл довжин панелей ферми, згенерованих за методом Монте-Карло, відповідає нормальному закону. Дану гіпотезу було перевірено за критерієм  $\chi^2$  Пірсона з рівнем значущості  $\alpha = 0,01$  та встановлено, що вона підтверджується [12].

Слід звернути увагу на той факт, що генеруючи випадкові зміщення координат вузлів панелей ферми за рівномірним закон розподілу, ми отримали нормальний закон розподілу для довжини панелей. З точки зору математичної статистики це можна пояснити тим, що розподіл випадкової величини, на значення якої впливають кілька випадкових факторів (у нашому випадку їх два – координати лівого та правого вузлів панелі) буде близьким до нормального.

Подібні результати отримані також для розподілу типів розкосів панелей ферми, що отримані внаслідок стохастичного моделювання (рис. 3.5). З їх аналізу стає очевидно, що розподіл даних величин близький до рівномірного. Це підтверджує високу якість генерації випадкових значень розробленою програмою в процесі стохастичного імітаційного моделювання.

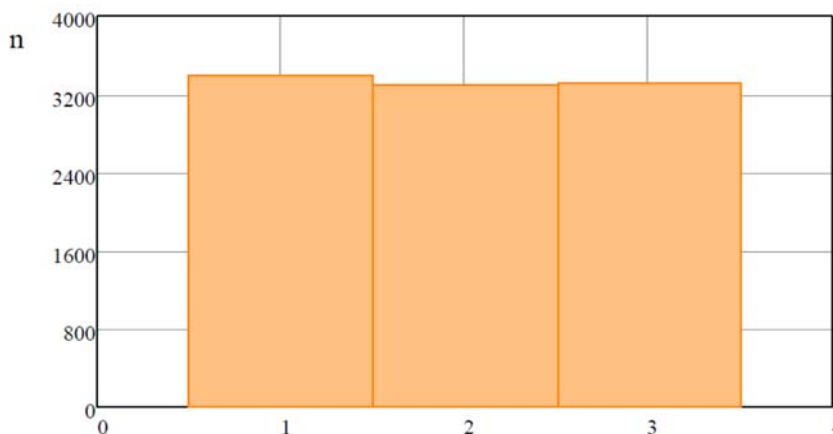


Рисунок 3.5 – Гістограма розподілу випадкових значень типу розкосів панелей ферми: 1 – висхідний; 2 – низхідний; 3 – хрестовий.

Для кожного зі згенерованих варіантів конструкції було побудовано відповідну скінченно-елементну модель, проведено її розрахунок та одержано

набір результатів, що дозволяють проаналізувати напружено-деформований стан та вичерпання несучої здатності конструкції.

Приводити детальні результати розрахунку по кожному варіанту конструкції вважаємо недоцільним, тому обмежимося аналізом даних, узагальнених по всій сукупності результатів.

В першу чергу проаналізуємо результати визначення параметрів напружено-деформованого стану всіх варіантів конструкції, отриманих в результаті прогонів стохастичного імітаційного моделювання.

Графік, що зображує значення максимального прогину ферми  $f$  для кожного варіанту конструкції та його математичне сподівання  $Mf$  для загальної сукупності показані на рис. 3.6.

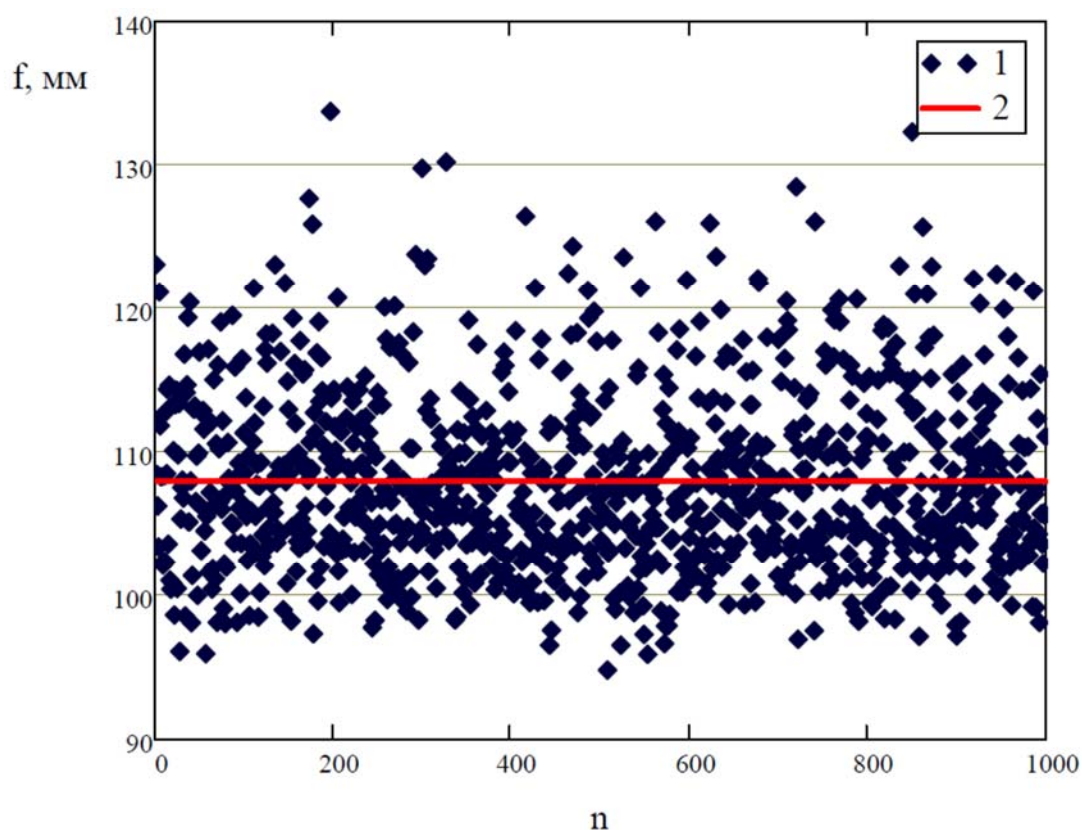


Рисунок 3.6 – Значення максимального прогину ферми для сукупності варіантів конструкції (1) та його математичне сподівання (2).



Середнє значення максимального прогину ферми становить  $Mf = 108,2$  мм, що дещо більше за значення для базового варіанту ферми. Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 6,11$  мм, максимальне значення становить  $f_{\max} = 133,69$  мм, мінімальне  $f_{\min} = 94,73$  мм.

Разом з тим, як бачимо з графіка, величина прогину для різних варіантів конструкції характеризується суттєвим розкидом. Можемо бачити, що більшість результатів розміщені в околі значення для базового варіанту конструкції.

Подібним чином можемо побудувати графік для значення максимальної стискуючої нормальної сили в елементах верхнього поясу ферми  $N_B$  (рис. 3.7).

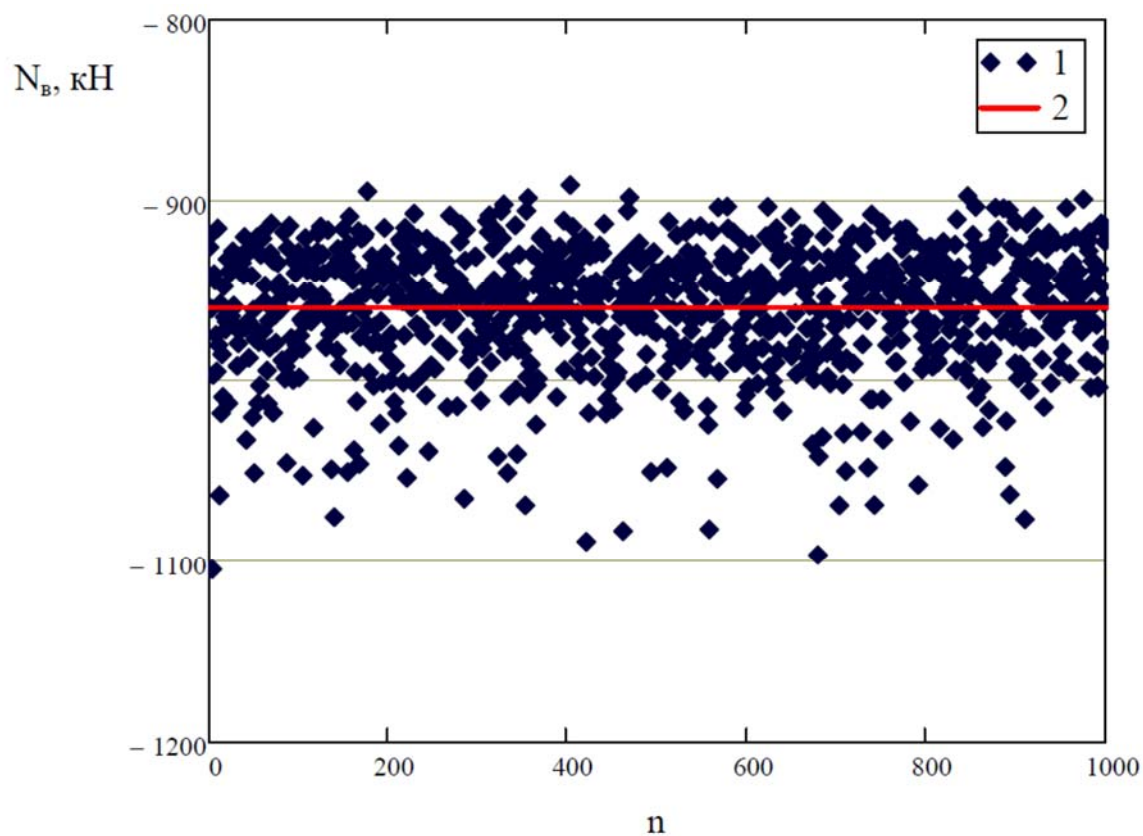


Рисунок 3.7 – Значення максимальної стискуючої нормальної сили в елементах верхнього поясу для сукупності варіантів конструкції (1) та його математичне сподівання (2).

Середнє значення максимальної стискуючої нормальної сили в елементах верхнього поясу ферми становить  $MN_B = -958,08$  кН. Зауважимо, що базовий варіант конструкції характеризується меншим значенням сили  $N_B$ . Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 33,197$  кН, максимальне значення становить  $N_{B_{\max}} = -1105$  кН, мінімальне  $N_{B_{\min}} = -891,417$  кН.

З графіка можна бачити, що розподіл величини нормальної сили стиску в елементах верхнього поясу ферми для сукупності всіх згенерованих варіантів конструкції характеризується певною асиметричністю та відхиляється від нормального, оскільки спостерігаються вильоти значень для окремих точок в сторону великих значень сили.

Аналогічний ефект також спостерігається для нормальної стискаючої сили в елементах нижнього поясу ферми  $N_H$  (рис. 3.8).

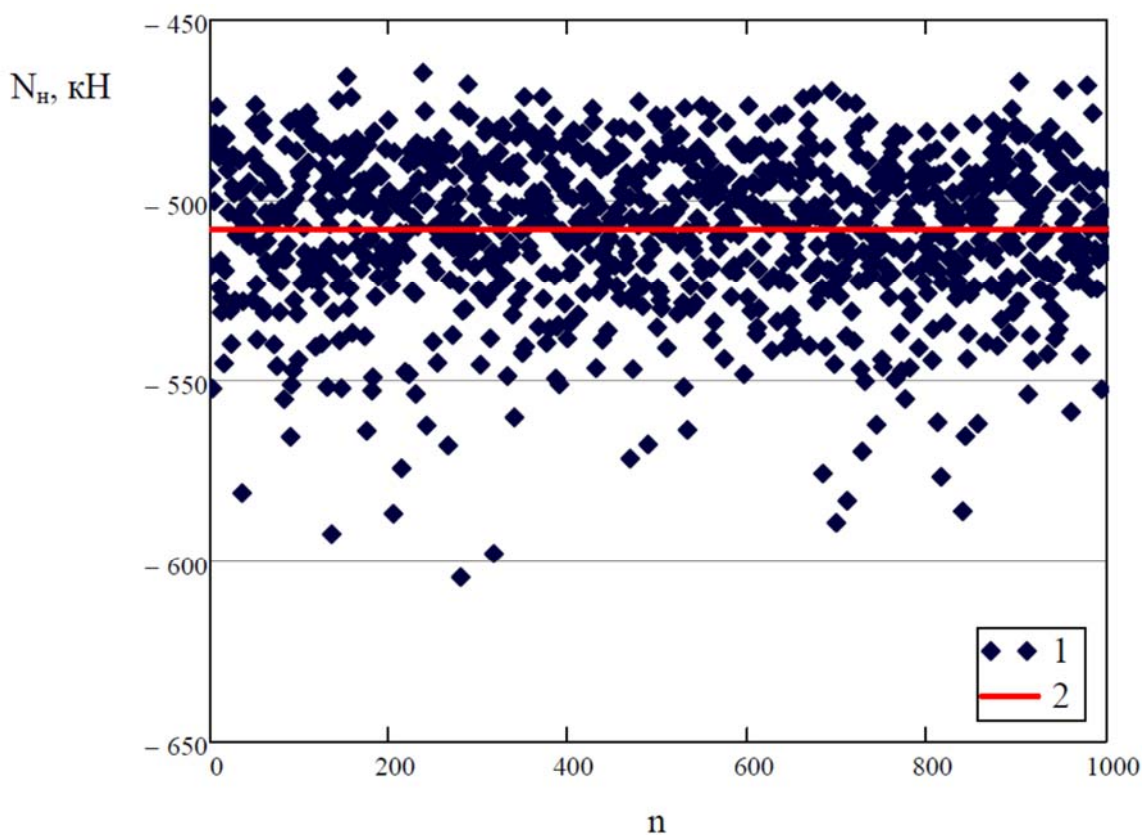


Рисунок 3.8 – Значення максимальної стискуючої нормальної сили в елементах нижнього поясу для сукупності варіантів конструкції (1) та його математичне сподівання (2).

Середнє значення максимальної стискуючої нормальної сили в елементах нижнього поясу ферми становить  $MN_H = -506,3$  кН. В даному випадку базовий варіант конструкції також характеризується меншим значенням сили  $N_H$ . Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 19,879$  кН, максимальне значення становить  $N_{H_{\max}} = -604,64$  кН, мінімальне  $N_{H_{\min}} = -464,75$  кН.

Подібна картина розкиду спостерігається і для величини максимальної стискуючої нормальної сили в елементах розкосів  $N_p$  (рис. 3.9).

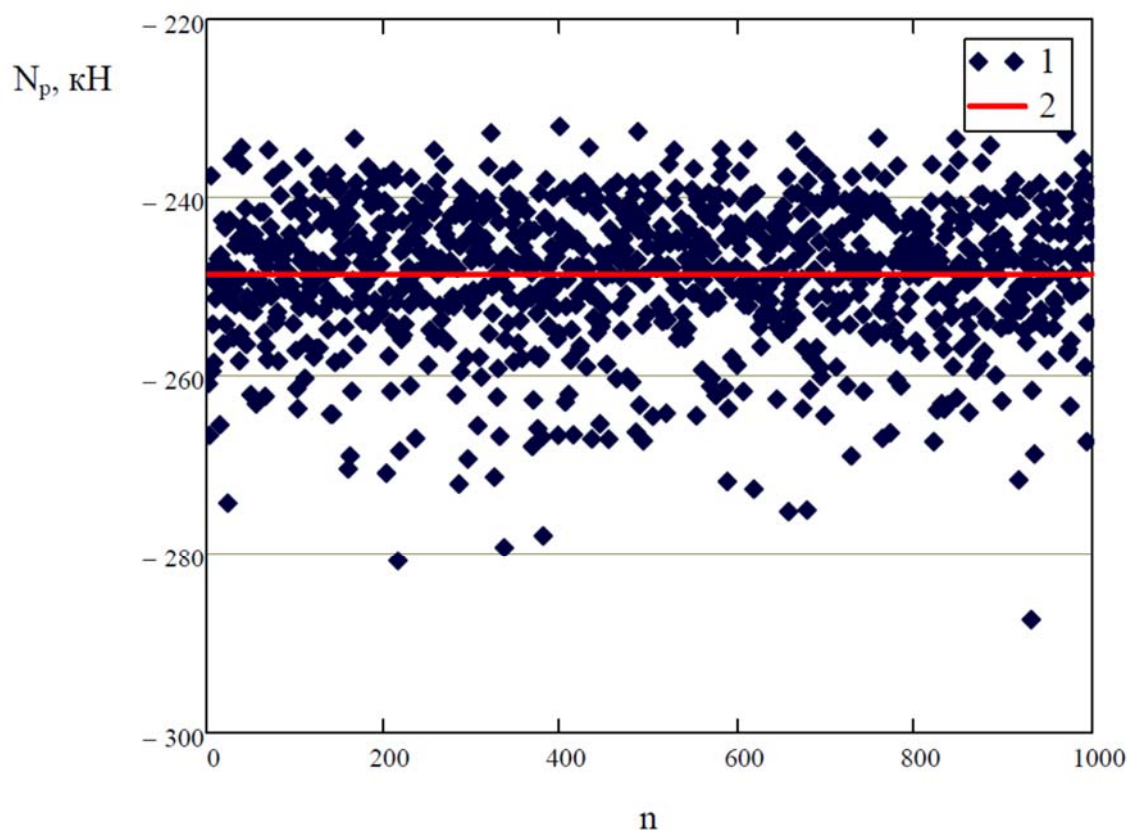


Рисунок 3.9 – Значення максимальної стискуючої нормальної сили в елементах розкосів для сукупності варіантів конструкції (1) та його математичне сподівання (2).

Середнє значення максимальної стискуючої нормальної сили в елементах розкосів ферми становить  $MN_p = -248,75$  кН. Дане значення дуже близьке до

відповідного значення для базового варіанту конструкції. Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 8,17$  кН, максимальне значення становить  $N_{\rho_{\max}} = -287,43$  кН, мінімальне  $N_{\rho_{\min}} = -231,16$  кН.

Для оцінки тримкої здатності варіантів конструкції металевої ферми розраховували значення відсотків вичерпання за граничними станами. Дані значення некоректно напряму порівнювати з відповідними значеннями для базового варіанту ферми, оскільки в процесі розрахунку кожного варіанту конструкції виконувався підбір перерізів, а значить дані отримані для різних жорсткостей елементів конструкції.

Результати перевірки підібраних перерізів за першим граничним станом показано на рисунку 3.10.

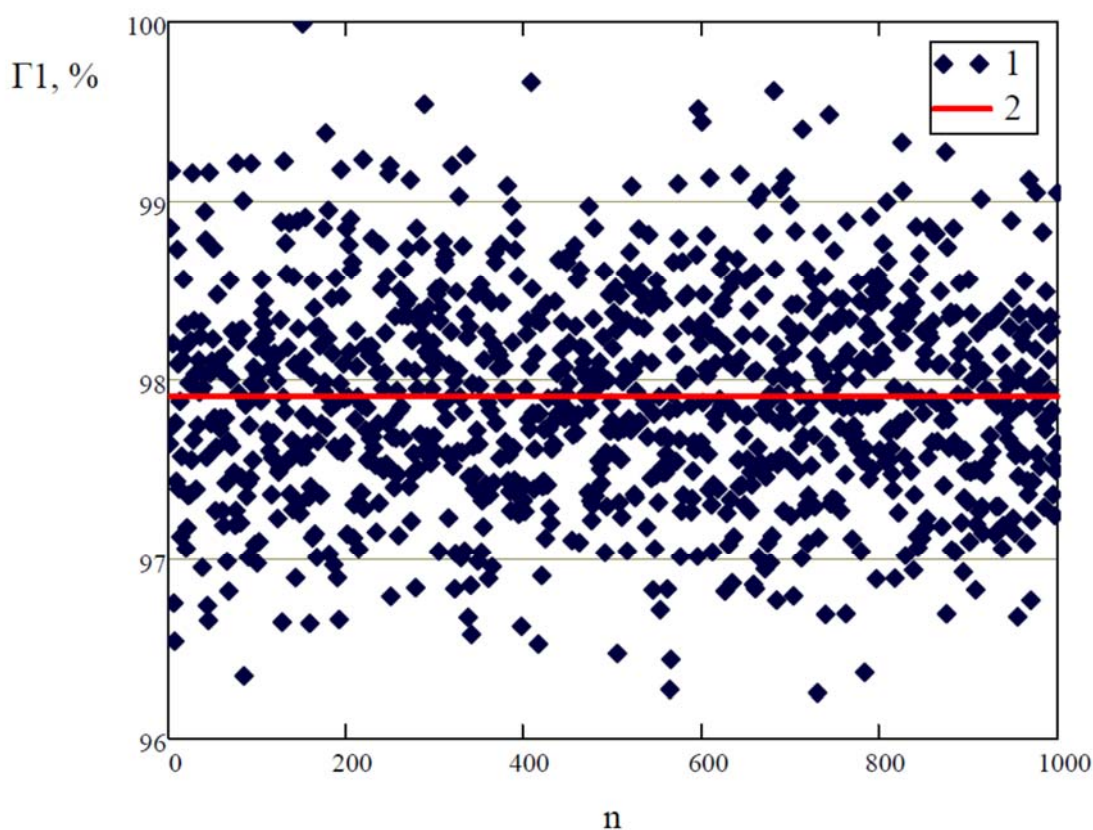


Рисунок 3.10 – Значення відсотку вичерпання несучої здатності за першим граничним станом для сукупності варіантів конструкції (1) та його математичне сподівання (2).

Як бачимо, для всіх варіантів конструкції вдалося підібрати такі значення перерізів, що задовольняють перевірку за цим граничним станом, оскільки всі одержані значення менше 100%. Це можна пояснити широкою номенклатурою перерізів для обраного типу сортаменту, що дозволяє в кожному випадку підібрати переріз, який буде використовуватися найбільш ефективно.

Відзначимо також високу ефективність використання матеріалу підібраних перерізів, про що свідчить високе значення відсотку вичерпання несучої здатності, що наближається до 100%.

Середнє значення відсотку вичерпання несучої здатності за першим граничним станом для елементів ферми становить  $M\Gamma_1 = 97,9\%$ . Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 0,618\%$ , максимальне значення становить  $\Gamma_{1_{\max}} = 99,985\%$ , мінімальне  $\Gamma_{1_{\min}} = 96,25\%$ .

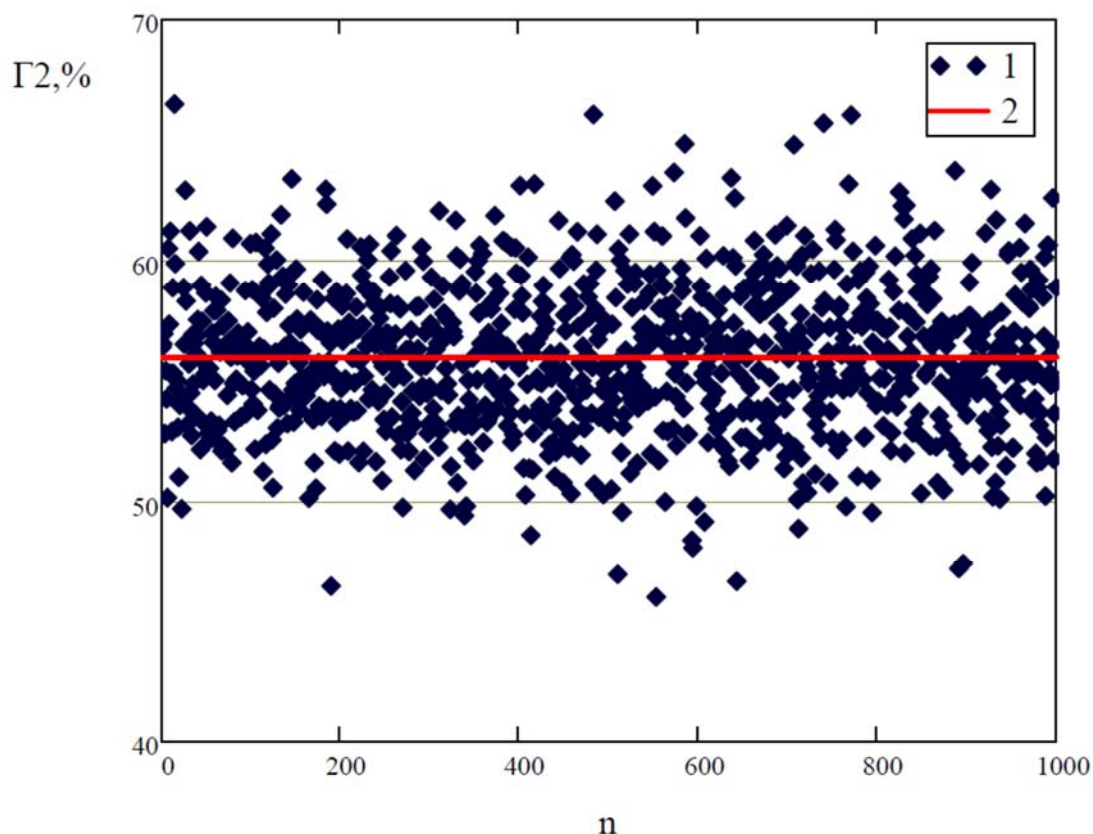


Рисунок 3.11 – Значення відсотку вичерпання несучої здатності за другим граничним станом для сукупності варіантів конструкції (1) та його математичне сподівання (2).

Для відсотків вичерпання тримкої здатності за другим граничним станом ситуація дещо відрізняється. Як можемо бачити з графіка на рисунку 3.11, величина даного відсотку не перевищує 70%, що вказує на достатньо високу жорсткість для всіх згенерованих варіантів конструкції просторової металевої ферми.

Середнє значення відсотку вичерпання несучої здатності за другим граничним станом для елементів ферми становить  $M\Gamma_2 = 55,9\%$ . Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 3,08\%$ , максимальне значення становить  $\Gamma_{2_{\max}} = 66,47\%$ , мінімальне  $\Gamma_{2_{\min}} = 45,97\%$ .

Значення для відсотків вичерпання несучої здатності за місцевою стійкістю характеризуються більшими значеннями та дещо більшою величиною їх розкиду (рис. 3.12).

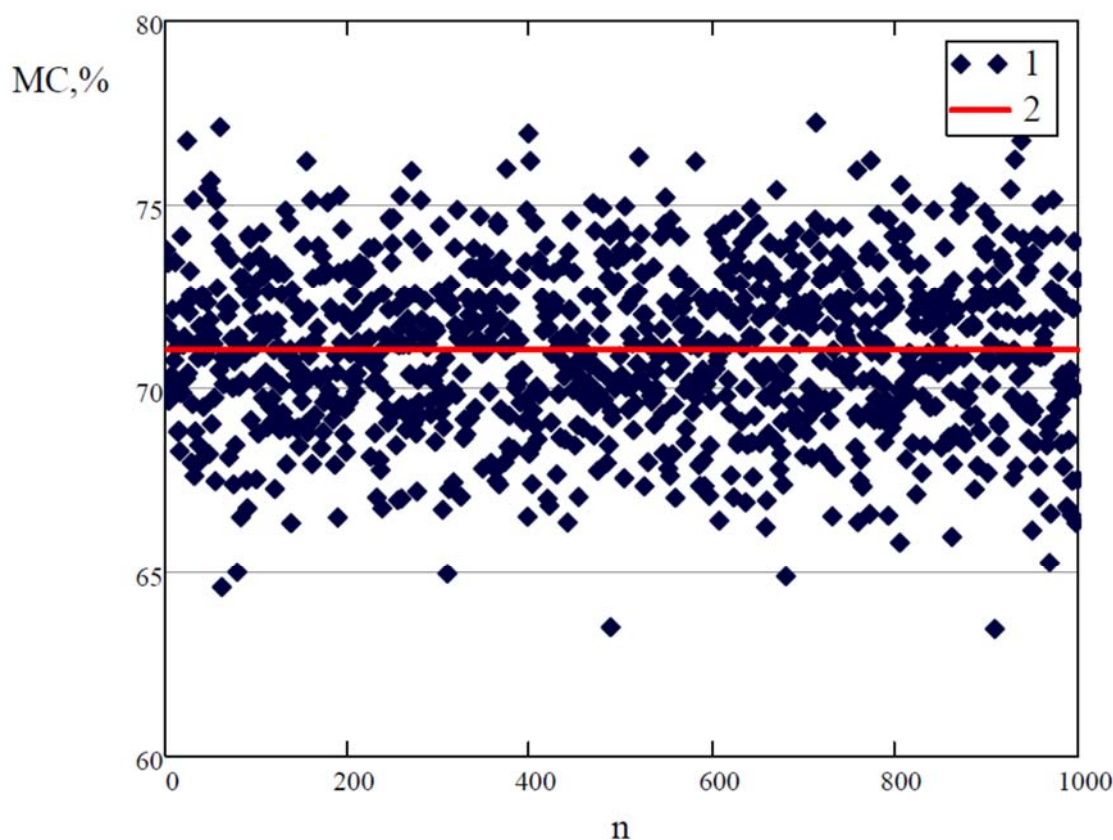


Рисунок 3.12 – Значення відсотку вичерпання несучої здатності за місцевою стійкістю для сукупності варіантів конструкції (1) та його математичне сподівання (2).

Середнє значення відсотку вичерпання несучої здатності за місцевою стійкістю для елементів ферми становить  $MMS = 70,93\%$ . Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 2,26\%$ , максимальне значення становить  $MC_{\max} = 77,23\%$ , мінімальне  $MC_{\min} = 64,44\%$ .

Аналізуючи картини напружено-деформованого стану для різних згенерованих варіантів конструкції та порівнюючи їх з базовим варіантом можемо бачити, що в загальному спостерігається тенденція до типової картини розподілу зусиль в стержнях ферми, яка загалом є подібною для всіх отриманих схем. З характерних особливостей можемо вказати на наявність виключно стискаючих нормальних зусиль у верхньому поясі ферми, а також розтягуючих нормальних зусиль в центральній частині нижнього поясу. Зусилля в розкосах ферми залежить від обраної схеми розкосів, проте для всіх варіантів схеми актуальною залишається тенденція до збільшення величини нормальних сил в розкосах при наближенні до опорних ділянок ферми.

### **3.3. Визначення оптимального варіанту конструкції.**

Для вирішення задачі оптимізації конструкції просторової металевої ферми необхідно вибрати такий варіант, який забезпечує мінімальне значення для цільової функції. В розділі 2 в якості цільової функції задачі оптимізації в даній роботі було обрано значення маси конструкції просторової ферми.

Для визначення оптимального варіанту серед набору згенерованих виконували автоматичний розрахунок повної ваги конструкції за допомогою інструментів програмного комплексу Ліра-САПР.

Узагальнені результати маси конструкції для сукупності варіантів конструкції та їх математичне сподівання наведено на рисунку 3.13. Штриховою лінією показано значення повної маси для базового варіанту конструкції, визначене в розділі 3.1.

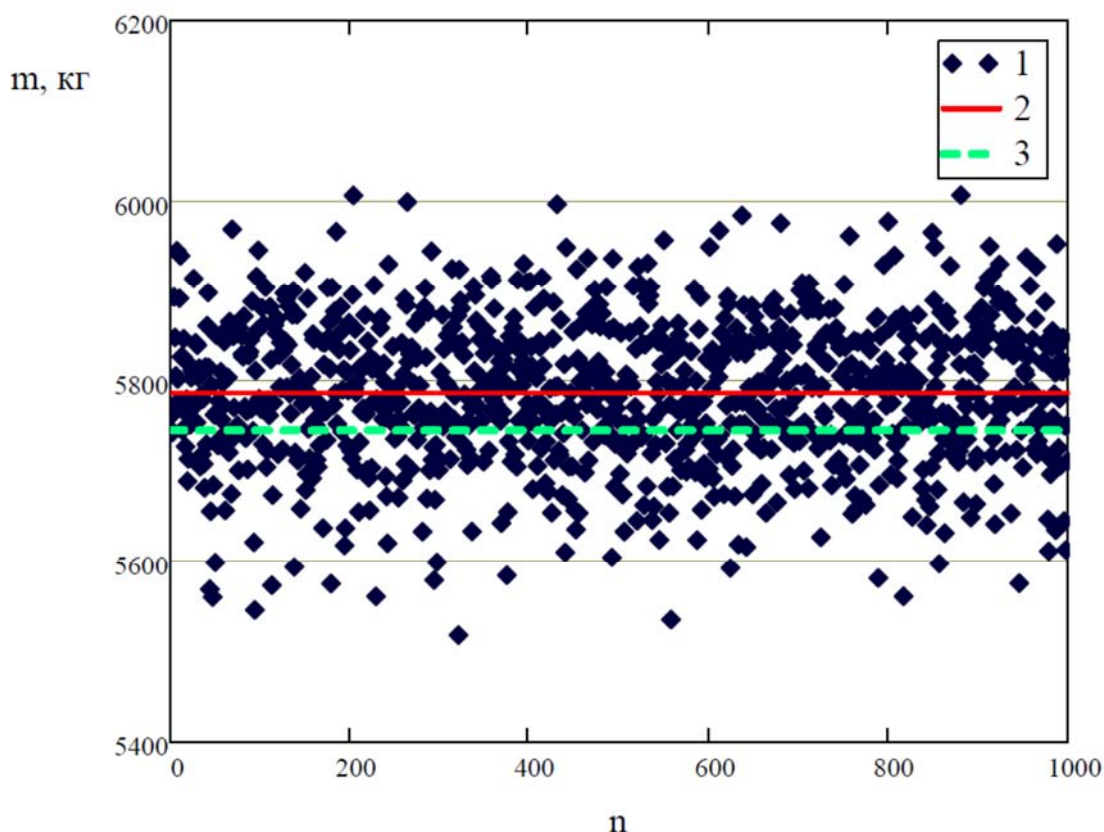


Рисунок 3.13 – Значення повної маси ферми для сукупності варіантів конструкції (1), його математичне сподівання (2) та значення маси для базового варіанту конструкції (3).

Середнє значення повної маси ферми становить  $Mm = 5787$  кг. Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 79,11$  кг, максимальне значення становить  $m_{\max} = 6020$  кг, мінімальне  $m_{\min} = 5518$  кг. Маса базового варіанту конструкції просторової ферми становить  $m_0 = 5745$  кг. Таким чином, математичне сподівання маси ферми для згенерованої сукупності варіантів більше значення  $m_0$  на 227,8 кг або на 3,97%. Даний результат вказує на непогану оптимізацію базового варіанту конструкції за критерієм мінімізації маси.

За рахунок цього, більшість серед згенерованих варіантів схеми характеризується значеннями цільової функції, вищими за початкове. Групування результатів залежно від того більшу чи меншу масу отримуємо для кожного конкретного варіанту конструкції дають наступний розподіл: 71,6% згенерованих



варіантів схеми мають повну масу більшу за масу базового варіанту конструкції, а, відповідно, 28,4% – меншу. При цьому бачимо, що більшість результатів відхиляється від значення для базового варіанту не сильно.

З наведеного графіка очевидно, що в нашому випадку оптимальним варіантом конструкції буде варіант № 328, для якого значення цільової функції задачі оптимізації буде мінімальним.

Загальний вигляд розрахункової схеми оптимального варіанту конструкції та підібрані розміри панелей ферми показані на рисунку 3.14.

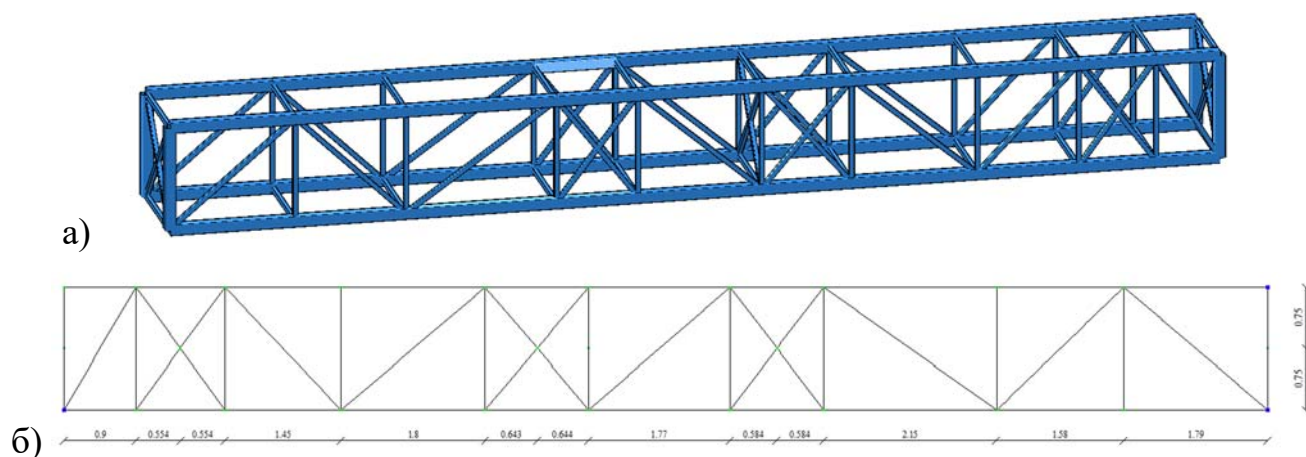


Рисунок 3.14 – Розрахункова схема оптимального варіанту конструкції просторової ферми:

а) – загальний вигляд; б) – розміри панелей ферми.

Максимальні переміщення вузлів оптимального варіанту металевої ферми в вертикальному напрямку вздовж осі  $Z$  (рис. 3.15, а) становлять 107 мм, а в горизонтальному напрямку вздовж осі  $X$  – 12,2 мм. Дані значення дуже близькі до відповідних значень для базового варіанту конструкції.

Максимальне значення нормальної сили у елементах ферми (рис. 3.15, б) складає:

- для верхнього поясу –  $-929$  кН в центральних панелях;

- для нижнього поясу –  $-511\text{ кН}$  в крайніх панелях та  $287\text{ кН}$  в центральних;
- для розкосів –  $-215\text{ кН}$  в крайніх панелях.

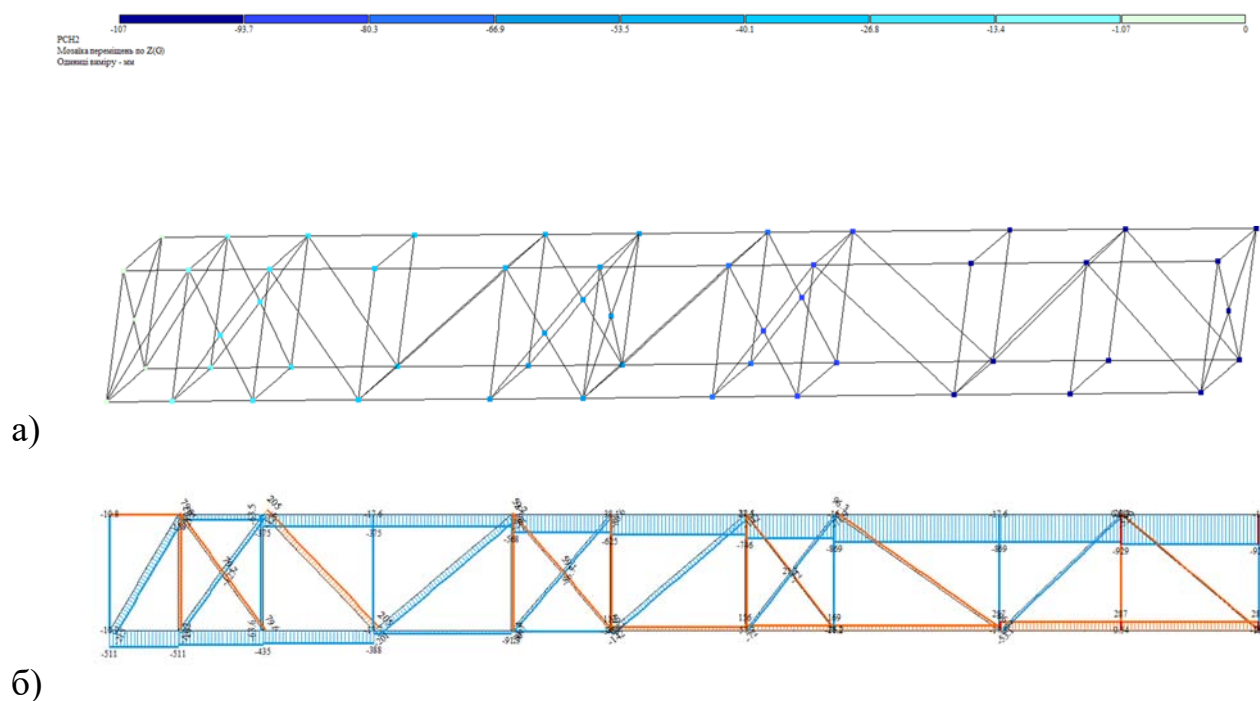


Рисунок 3.15 – Результати розрахунку НДС оптимального варіанту просторової ферми:

а) – переміщення вузлів вздовж осі  $Z$ ; б) – епюра нормальних сил в стержнях  $N$

Результати перевірки тримкої здатності конструкції оптимального варіанту просторової металеві ферми представлено на рис. 3.16. Як бачимо, тримка здатність ферми за умовами міцності, жорсткості та місцевої стійкості забезпечується.

### 3.4. Висновки до розділу 3

В результаті застосування описаного підходу до оптимізації конструкції просторової ферми з довжиною прольоту  $L = 30\text{ м}$  було досягнуто зниження загальної ваги конструкції на  $3,97\%$  при виконанні  $1000$  циклів імітаційного моделювання. Даний результат не є дуже значним, проте тут варто звернути увагу

на високий рівень використання матеріалу перерізів для базового варіанту ферми та ймовірність того, що за 1000 циклів імітаційного моделювання глобальний екстремум цільової функції задачі оптимізації не був знайдений.

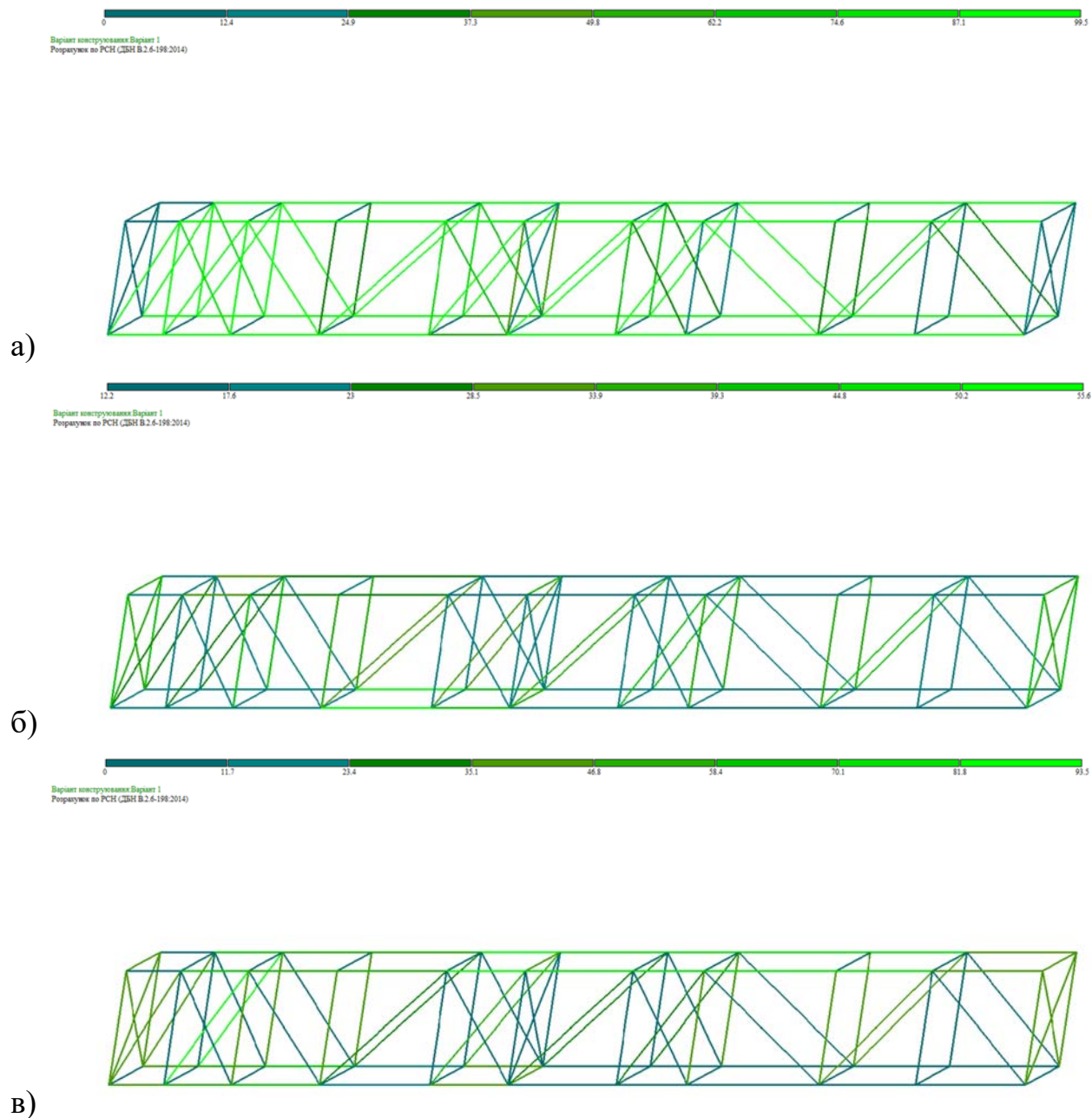


Рисунок 3.16 – Результати підбору перерізів оптимального варіанту просторової металевої ферми:

- а) – за першим граничним станом; б) – за другим граничним станом; в) – за місцевою стійкістю.

Серед недоліків даного методу слід вказати значну кількість обчислень, оскільки потрібно визначати значення цільової функції на кожному прогоні імітаційного моделювання, що вимагає побудови та розрахунку окремої скінченно-елементної моделі, та ймовірність того, що глобальний мінімум не буде знайдено за задану максимальну кількість ітерацій.

Слід також зазначити, що в роботі не враховувалися вимоги до модульності основних розмірів ферми, уніфікації її елементів та технологічності їх виготовлення. Дані особливості можуть суттєво підвищити собівартість виготовлення ферми в умовах конкретного виробництва та вплинути на результати оптимізації за критерієм мінімальної собівартості.

## Розділ 4

# ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1. Законодавча база України про охорону праці

Законодавчими актами, що визначають основні положення з охорони праці, є загальні закони України, а також спеціальні законодавчі акти, які приймаються або затверджуються Кабінетом Міністрів України, Державним комітетом України по нагляду за охороною праці, Міністерством енергетики України та іншими відомствами [17].

Загальними законами України, що визначають основні положення з охорони праці, є Конституція України, Кодекс законів про працю України та Закон України «Про охорону праці». До законодавчої бази також належать Закони України: «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань, які спричинили втрату працездатності», «Про охорону здоров'я», «Про пожежну безпеку», «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення», «Про загальнообов'язкове соціальне страхування у зв'язку з тимчасовою втратою працездатності та витратами, зумовленими народженням та похованням».

У Законі України «Про охорону праці» передбачені основні методи запобігання шкоди людині й суспільству, відшкодування завданого збитку, закладені правові норми управління охороною праці, котрі забезпечують організаційно-господарську діяльність шляхом визначення повноважень, прав і відповідальності господарських органів, а також наглядову діяльність надану органам місцевого самоврядування і виконавчим органам влади.

Спеціальними законодавчими актами є міжгалузеві та галузеві акти про охорону праці. Це державні стандарти Системи стандартів безпеки праці, Будівельні норми та правила, Санітарні норми, Правила побудови електроустановок, та інші. Згідно ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека у будівництві» [18] норми поширюються «на загальнобудівельні і спеціальні будівельні роботи під час нового будівництва, розширення,

реконструкції, технічного переоснащення, капітального ремонту, реставрації будівель та споруд».

#### **4.2. Техніка безпеки при виконанні монтажних робіт для металевих конструкцій**

При виконанні робіт із монтажу сталевих конструкцій, монтажники згідно своєї кваліфікації зобов'язані виконувати вимоги безпеки з охорони праці для працівників будівництва, промисловості будівельних матеріалів і житлово-комунального господарства, а також вимоги інструкцій заводів-виготовлювачів по експлуатації технологічного оснащення, інструменту й засобів захисту, які застосовуються у процесі роботи [10].

Перед початком роботи монтажники зобов'язані:

- пред'явити керівнику посвідчення про перевірку знань безпечних методів робіт і пройти інструктаж на робочому місці з урахуванням специфіки виконуваних робіт;

- надягти каску, спецодяг, спецвзуття встановленого зразка;

- одержати завдання на виконання роботи в бригадира або керівника.

Після одержання завдання монтажники зобов'язані:

- підготувати необхідні засоби індивідуального захисту;

- перевірити робоче місце й підходи до нього згідно вимог безпеки;

- підібрати технологічне оснащення й інструмент, необхідні при виконанні роботи, перевірити їх на відповідність вимогам безпеки;

- оглянути елементи будівельних конструкцій, призначені для монтажу, і переконатися у відсутності в них дефектів.

Монтажники не повинні приступати до виконання роботи при:

- несправностях технологічного оснащення, засобів захисту працюючих, зазначених в інструкціях заводів-виготовлювачів, при яких не допускається їхнє застосування;

- несвоєчасному проведенні чергових іспитів технологічного оснащення, інструментів і пристосувань;

- недостатній освітленості робочих місць і підходів до них.

Під час роботи до монтажників ставляться наступні вимоги:

1). Для проходів на робоче місце монтажники повинні використовувати обладнані системи доступу (сходи, трапи, містки). Перебування монтажників на елементах будівельних конструкцій, утримуваних краном, не допускається.

2). Навісні монтажні площадки, сходи й інші пристосування, необхідні для роботи монтажників на висоті, варто встановлювати й закріплювати на монтувальних конструкціях до їхнього підйому.

3). При відсутності огороження робочих місць на висоті монтажники зобов'язані застосовувати запобіжні пояси в комплекті зі страховочним пристроєм. При цьому монтажники повинні виконувати вимоги «Типової інструкції з охорони праці для працівників, що виконують верхолазні роботи».

4). Очищення підлягаючих монтажу елементів будівельних конструкцій від бруду й пилу варто здійснювати до їхнього підйому. При стропуванні будівельних конструкцій монтажники зобов'язані виконувати вимоги «Типової інструкції з охорони праці для стропувальників».

5). Перед установкою конструкції у проектне положення монтажники зобов'язані:

- оглянути місце установки конструкції і перевірити наявність розбивочних і геометричних осей на опорній поверхні;

- приготувати необхідне оснащення для її проектного чи тимчасового закріплення;

- перевірити відсутність людей внизу безпосередньо під місцем монтажу конструкції. Забороняється перебування людей під монтажними елементами до установки їх у проектне положення й остаточного закріплення.

6). Після установки конструкції у проектне положення необхідно зробити її закріплення (постійне чи тимчасове) відповідно до вимог проекту. Тимчасове дозволяється знімати тільки після остаточного закріплення відповідно до вимог проекту.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

1). У випадках виявлення несправності вантажопідйомного крана, рейкового шляху, вантажопідйомних пристроїв або технологічного оснащення монтажники зобов'язані дати машиністу крана команду "Стій" і повідомити про це керівника робіт.

2). При виявленні хиткого положення монтажних конструкцій, технологічного оснащення або засобів захисту, монтажники повинні повідомити про це керівника робіт або бригадира.

3). При зміні погодних умов (збільшенні швидкості вітру до 15 м/с і більше, при снігопаді, грозі або тумані), що погіршують видимість, роботи необхідно призупинити і повідомити керівника.

Вимоги безпеки по закінченні роботи:

- скласти у відведене для збереження місце технологічне оснащення і засоби захисту працюючих;

- очистити від відходів будівельних матеріалів і монтажних конструкцій робоче місце і привести його в порядок;

- повідомити керівнику, бригадиру про всі несправності, що виникли в процесі роботи.

До початку робіт на території монтажної ділянки необхідно встановити показники робочих проходів і проїздів, визначити небезпечні зони. Монтажне обладнання, а також захватні пристрої повинні бути перевірені і досліджені особами технічного персоналу будівництва. Місця знаходження робітників, які розташовані на висоті, огорожуються. Монтажники повинні бути з захисними пояси, за допомогою яких вони міцно прикріплюють себе до раніше змонтованих конструкцій.

При виконанні електрозварювальних робіт необхідно виконувати правила з електробезпеки і виконати вимоги з захисту людей від шкідливої дії променів електричної дуги.

Установленні в проектне положення збірні металеві конструкції мають бути закріплені так, щоб були забезпечені їх стійкість і геометрична незмінність. Розстроповку збірних конструкцій, встановлених в проектне положення,



виконують після постійного або тимчасового надійного їх закріплення. Заборонено знаходження людей під збірними елементами конструкцій до встановлення їх в проектне положення і закріплення.

### **4.3. Класифікація надзвичайних ситуацій**

За сутністю та причинами виникнення надзвичайні ситуації поділяють на природні, соціальні та техногенні. Природні надзвичайні ситуації пов'язані з природними процесами космічного, літосферного, гідросферного, атмосферного, біосферного характеру або кількох процесів одночасно і відбуваються незалежно від участі людини, тому зменшення впливу будь-якого фактору при проектуванні споруд різного призначення має важливе значення. Соціальні надзвичайні ситуації відбуваються в суспільстві: воєнний стан, злочинність, революції, міжнаціональні конфлікти, поширення людиноненависницьких ідеологій та ін. Техногенні надзвичайні ситуації пов'язані з матеріальною сферою, що створена людиною [19].

Найбільш поширеними техногенними катастрофами та аваріями є вибухи, пожежі, затоплення, хімічне та радіаційне забруднення, біологічне зараження та інше. А також на території України можливе виникнення небезпечних природних явищ і процесів геологічного походження. До них відносяться: великі повені, катастрофічні затоплення, землетруси та зсувні процеси, лісові та польові пожежі, великі снігопади та ожеледі, урагани, смерчі та шквальні вітри тощо [19].

Аварії металоконструкцій є найбільш руйнівними незалежно від сфери застосування. Тому вже на стадії їх проектування слід забезпечити безпеку перебування в спорудах людей і збереження майна за рахунок зниження ймовірності прогресуючого (лавиноподібного, ланцюгового та ін.) обвалення при локальних руйнуваннях окремих конструктивних елементів. Ці локальні руйнування не повинні призводити до руйнування сусідніх несучих елементів. Стійкість споруд проти прогресуючого обвалення повинна забезпечуватися конструктивними та профілактичними заходами і перевірятися розрахунком.

#### 4.4. Заходи підвищення стійкості об'єкту в надзвичайних ситуаціях

Заходи з підвищення стійкості планують з урахуванням місцевих умов, важливості об'єкта, його географічного положення, економічної доцільності проведення заходів.

На стійкість роботи і на запобігання виникнення надзвичайних ситуацій впливають такі фактори [19]:

- захищеність службовців і робітників від вражаючих факторів НС;
- здатність інженерно-технічного комплексу об'єкта (будівель, споруд, обладнання та комунально-енергетичних систем) протистояти руйнуючій дії уражуючих факторів аварій, катастроф, природних явищ та сучасної зброї;
- готовність об'єкта до проведення аварійно-рятувальних та відбудовних робіт;
- надійність постачання об'єкта водою, електроенергією, паливом, комплектуючими та сировиною;
- оперативність управління виробництвом та здійсненням заходів ЦО в надзвичайних ситуаціях.

Для запобігання значних наслідків при виникненні вище розглянутих НС передбачено наступні заходи:

- використання системи передавання тривожних сповіщень;
- влаштування системи блискавкозахисту, дана система складається з блискавкоприймача, струмовідводів і заземлювачів. В якості струмовідводів і заземлювачів служить металевий каркас у спорудах з використанням металоконструкцій;
- використання автоматичної системи пожежогасіння;
- для стійкості та жорсткості встановлюють додаткові зв'язки між окремими елементами споруди, закріплюють відтяжками високі малостійкі споруди;
- також будівельні конструкції обробляють антикорозійними, гідрофобними засобами.

Виникнення надзвичайних ситуацій повністю виключити неможливо, але мінімізація їх наслідків необхідна. Для попередження надзвичайних ситуацій будівель і споруд та їх експлуатованих металевих конструкцій важливе завдання

стоїть перед службами експлуатації та нагляду за несучими конструкціями, посилення конструкцій і супутнє йому регулювання напружень в елементах, виявлення неврахованих запасів міцності і стійкості, вдосконалення методик розрахунку будівельних конструкцій.

#### **4.5. Висновки до розділу 4**

З розділу охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях можна зробити наступні висновки:

- трудова діяльність людини регулюється основним нормативними документами, Законом України «Про охорону праці»;
- запобігання впливу шкідливого середовища на здоров'я людини проводиться шляхом забезпечення засобами індивідуального захисту та дотримання правил техніки безпеки;
- для запобігання непередбаченого впливу на будівельні конструкції пропонуються такі основні методи: загальне зміцнення всієї споруди, своєчасна заміна або місцеве посилення окремих елементів і конструкцій.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена розв'язанню проблеми оптимізації конструкції просторової металевої ферми за допомогою стохастичного імітаційного моделювання.

За результатами роботи можемо сформулювати наступні висновки:

1. Сформульовано задачу оптимізації конструктивних параметрів просторових ферм, що полягає в знаходженні такої комбінації геометричних параметрів для всіх елементів, яка забезпечує мінімальне значення цільової функції, в якості якої прийнято загальну масу конструкції.
2. Обрано базовий варіант конструкції просторової металевої ферми покриття довжиною  $L = 30$  м. Проаналізовано його характеристики та навантаження.
3. Створено скінченно-елементну модель базового варіанту просторової ферми, яка використовується в якості шаблону для отримання моделей всіх варіантів конструкції.
4. Серед геометричних параметрів просторової ферми виділено постійні, значення яких не будуть змінюватися в процесі стохастичного імітаційного моделювання, та варіативні, значення яких підлягають випадковій зміні. В якості постійних параметрів прийнято висоту та ширину ферми і її повну довжину. В якості варіативних параметрів обрано тип розкосів для кожної панелі ферми та довжину панелей. Обґрунтовано області визначення для кожного з варіативних параметрів моделі.
5. Розроблено алгоритм оптимізації конструкції шляхом стохастичного імітаційного моделювання з використанням методу Монте-Карло. Основна ідея алгоритму полягає в автоматичній генерації великої кількості варіантів конструкції з випадковими значеннями варіативних параметрів, їх подальшому розрахунку та співставленні за значенням цільової функції оптимізації.

6. Розроблено програмне забезпечення, що реалізовує основні етапи запропонованого алгоритму та дозволяє автоматично створити розрахункові моделі методу скінченних елементів для всіх згенерованих варіантів конструкції.
7. В результаті застосування описаного підходу до оптимізації конструкції просторової ферми з довжиною прольоту 30 м визначено оптимальний варіант конструкції, що дозволяє досягнути зниження загальної ваги конструкції на 3,97% при виконанні 1000 циклів імітаційного моделювання.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблено та апробовано методику оптимізації конструкції просторової металеві ферми методом стохастичного імітаційного моделювання.

**Практична значимість результатів дослідження.** В роботі виконано оптимізацію конструктивних параметрів чотиригранної просторової ферми прольотом 30 м за критерієм мінімізації її маси методом стохастичного імітаційного моделювання. Розроблено програмне забезпечення для генерування варіантів конструкції за допомогою методу Монте-Карло. З використанням методу скінченних елементів обчислено характеристики напружено-деформівного стану для всіх згенерованих варіантів конструкції. Запропонована методика оптимізації може бути використана для інших типів металевих конструкцій.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. Bayar Jafar Alsulayfani, Tarek Edrees Saaed. Optimization of space frame design // International Conference on Innovative and Smart Structural Systems for Sustainable Habitat (INSHAB-2008). – Coimbatore, 03–05 January 2008. – Pp. 43-48.
2. Lan T.T. Space Frame Structures: Structural Engineering Handbook / Ed. Chen Wai-Fah. – Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. – 59 p.
3. Гурський В.М. Оптимізація довговимірних конструкцій за статичною міцністю та частотними характеристиками / В.М. Гурський, І.В. Кузьо, А.І. Медвідь // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Вип. 51. – 2017. – С. 33-40.
4. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация металлических конструкций путем эволюционного моделирования. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 239 с.
5. Барашиков, А.Я. Будівельні конструкції [Текст]: підручник / А.Я. Барашиков, В. М. Колякова. – К.: Слово, 2011. – 256 с.
6. Клименко, Ф.Є. Металеві конструкції [Текст] / Ф.Є. Клименко, В.М. Барабаш, Л.І. Стороженко; за ред. Ф.Є. Клименка. — Львів: Світ, 2002. — 312 с.
7. Легостаев А. Д. Метод скінченних елементів: Конспект лекцій. – К.: КНУБА, 2004. – 112 с.
8. Свідер В.С., Сорочак А.П. Дослідження впливу конструктивних параметрів на несучу здатність просторових ферм [Текст] // Актуальні задачі сучасних технологій: збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 27-28 листопада 2019). – Т. 1. – С. 31-32.
9. Задачі, методи та алгоритми оптимізації : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / І. В. Бейко, П. М. Зінько, О. Г. Наконечний; Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. – 2-ге вид., переробл. – К. : Київ. ун-т, 2012. – 799 с.
10. Нілов, О.О. Металеві конструкції: Загальний курс [Текст] / О.О. Нілов, В.О. Пермяков, О.В. Шимановський та ін.; під заг. ред. О.О. Нілова та О.В. Шимановського. – К.: «Сталь», 2010. — 869 с.

11. Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014 [Текст]. — [Чинний від 2015-01-01]. — К.: Мінрегіон України, 2014. — 198 с. — (Національний стандарт України).
12. Математичні методи дослідження операцій : підручник / Є.А. Лавров, Л.П. Перхун, В.В. Шендрик та ін. — Суми : Сумський державний університет, 2017. — 212 с.
13. Пермяков, В.О. Металеві конструкції. Ферми [Текст]: Навчальний посібник. — К.: КНУБА, 2006. — 170 с.
14. Зеленський К. Комп'ютерне моделювання систем / Кирило Зеленський. — К: Університет «Україна», 2014. — 315 с.
15. Програмне забезпечення інженерних розрахунків : конспект лекцій для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання / Укладач: Сорочак А.П. — Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. — 128 с.
16. Основи програмування. Python. Частина 1 [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 122 "Комп'ютерні науки", спеціалізації "Інформаційні технології в біології та медицині" / А. В. Яковенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 195 с. — Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25111/1/Python.pdf>
17. Основні положення законодавства про охорону праці // Навчальні матеріали онлайн [Ел. ресурс] – Режим доступу: [https://pidruchniki.com/13761025/bzhd/osnovni\\_polozhennya\\_zakonodavstva\\_pro\\_ohoronu\\_pratsi](https://pidruchniki.com/13761025/bzhd/osnovni_polozhennya_zakonodavstva_pro_ohoronu_pratsi)
18. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення : ДБН А.3.2-2-2009 [Текст]. — [Чинний від 2012-04-01]. — К.: Мінрегіонбуд України, 2012. — 116 с. — (Національний стандарт України).
19. Цивільна оборона: навч. посіб. Кулаков М.А., Ляпун В.О., та ін. — Харків: НТУ ХП, 2005. — 363 с.

## **ДОДАТКИ**



## ДОДАТОК А. Лістинг програми для генерації випадкових значень варіативних параметрів моделі

<MonteCarloGenerator.py>

```
import random

class MonteCarloGenerator:
    def generate_choise(n):
        return random.randint(1, n)

    def generate_range(min, max):
        return random.uniform(min, max)
```

<ParamsGenerator.py>

```
import MonteCarloGenerator
import ConstructionVariant

class ParamsGenerator:

    MC_gen = MonteCarloGenerator()
    x0 = []
    variants = []

    def __init__(self, fixed_params):
        self.N_variants = fixed_params.get("N_variants")
        self.N_chord_types = fixed_params.get("N_chord_types")
        self.l_panel_0 = fixed_params.get("l_panel_0")
        self.N_panels = fixed_params.get("N_panels")
        for i in range(self.N_panels + 1):
            self.x0[i] = i * self.l_panel_0

    def generate_variant(self):
        x = [self.x0[0]]
        chords = []
        for i in range(self.N_panels - 1):
            new_coord = self.x0[i+1] + self.MC_gen.generate_range(-
self.l_panel_0/4.0, self.l_panel_0/4.0)
            x.append(new_coord)
        x.append(self.x0[-1])

        for i in range(self.N_panels):
            chords[i] = self.MC_gen.generate_choise(self.N_chord_types)

        return ConstructionVariant({"node_coord": x, "chords": chords})
```

```
def generate_all_variants(self):  
    for i in range(self.N_variants):  
        self.variants.append(self.generate_variant())  
  
def get_variants(self):  
    return self.variants
```