

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра будівельних конструкцій

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Будівельних конструкцій

/...../

підпис

«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

На тему: **«Оптимізація конструктивного вирішення сталевий крокв'яної
ферми за критерієм матеріалоємності»**

Виконав (ла)

(підпис)

Лозко В.Г.

(Прізвище, ініціали)

Група

(Науковий)

керівник

(підпис)

Срібняк Н.М.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівельних конструкцій

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Лозко Володимир Григорович

Тема роботи: Оптимізація конструктивного вирішення сталеві крокв'яної ферми за критерієм матеріалоемності

Затверджено наказом по університету № _____ від "___" _____ 2025р.

Строк здачі студентом закінченої роботи: "___" _____ 2025 р.

Вихідні дані до роботи:

*Дослідити як впливає зміна типу профілю стержнів крокв'яної ферми
на матеріалоемність моделей*

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

Виконати огляд джерел щодо питань виконання розрахунків різних моделей плоских крокв'яних конструкцій, сформулювати мету за завдання досліджень; виконати числовий експеримент з розрахунку моделей ферм; проаналізувати результати числового експерименту та сформулювати висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

Мультимедійна презентація в форматі Microsoft PowerPoint

Керівник :

(підпис)

С.І. Роговий

(Прізвище, ініціали)

Консультант

(підпис)

С.І. Роговий

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

В.Г. Лозко

(Прізвище, ініціали)

Анотація

Лозко Володимир Григорович. Оптимізація конструктивного вирішення сталеві крив'яної ферми за критерієм матеріалоемності – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляду досліджень за обраною темою, розділів основної частини, висновків за результатами досліджень та формулювань висновків із досліджень (українською та англійською мовами).

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

Результати досліджень дозволяють:

- оцінити напружено-деформований стан моделей сталевих плоских крив'яних ферм, що мають різні типи профілю її елементів;
- підібрати нові профілі моделей ферм за результатами розрахунків в модулі «Метал» ПК «Ліра-САПР»;
- оцінити ступінь ефективності використання нових профілів (у %);
- підрахувати вагу моделей після першого ітераційного розрахунку;
- підрахувати вартість моделей;
- сформулювати висновки

Аналіз публікацій та досліджень встановив, що оптимізація – це процес пошуку найкращого поєднання параметрів системи. У проектуванні сталевих ферм вона розвивається у двох напрямках:

1. Мінімізація маси та вартості шляхом підбору оптимальних розмірів, форми й топології конструкції за допомогою метаевристичних алгоритмів (GA, DE, Firefly тощо).
2. Підвищення точності моделювання вузлів і з'єднань, оскільки вони суттєво впливають на масу й міцність ферми.

Також поширена багатокритеріальна оптимізація, де одночасно враховують масу, прогин, вартість, надійність і екологічний вплив. Використовуються параметричне проектування та автоматизовані алгоритми, що дозволяють швидко перебирати тисячі варіантів. Сучасні дослідження зосереджені на прискоренні розрахунків, використанні машинного навчання та урахуванні стохастичних факторів.

В **основній частині** зазначено, що за допомогою методу скінченних елементів та програмного комплексу Ліра-САПР 2024 створено скінченоелементні моделі чотирьох плоских ферм із різних типів профілів-кутників, трубчатого профілю, замкненого прямокутного коробчастого профілю та ЛСТК-профілів.

Підібрано раціональні перерізи для всіх моделей за розрахунками згідно 1ГС та 2ГС.

Обчислено вагу кожної моделі та підраховано вартість моделей згідно актуальних цін на профілі.

У **висновках** встановлено, що за критеріями економічності та ефективності використання металу найкращі результати показала ферма з трубчатого профілю (Ф-ТБ) – вона має найменшу вагу та найнижчу вартість. Ферми з кутників (Ф-КТ) та квадратного профілю (Ф-КБ) займають проміжне положення, причому кутникова конструкція більш металоємна. Ферми з ЛСТК (Ф-ЛСТК), незважаючи

на знижену вагу, є економічно не вигідними через високу ціну тонкого сталевих профілю.

Ключові слова: матеріалоемність, конструктивне вирішення, труба, кутник, коробчатий переріз, ЛСТК, ферма

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

Лозко В.Г., Роговий С.І., Срібняк Н.М. РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ПРИКЛАДІ КРОКВ'ЯНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ // Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (листопад 2025 р) – Суми, 2025. с.

Лозко В.Г., Роговий С.І., Срібняк Н.М. РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ФЕРМ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА // Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (листопад 2025 р) – Суми, 2025. с.

В **додатках** наведено: тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 60 сторінках, у тому числі 20 таблиць, 30 рисунків. Текст роботи містить 9 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 33 джерел, 2 додатків на 29 сторінках. Графічна частина складається з 27 слайдів мультимедійної презентації.

Abstract

Lozko Volodymyr Hryhorovych. Optimization of the Structural Solution of a Steel Rafter Truss According to the Material Efficiency Criterion – Master's Qualification Thesis (Manuscript).

Master's qualification work in specialty 192 *Construction and Civil Engineering*. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The work **consists** of the table of contents, general description and qualification characteristics, a review of research on the selected topic, main sections, conclusions based on the research results, and summaries in both Ukrainian and English.

The purpose, objectives, subject and object of research, as well as scientific research methods, are formulated.

The research results allow to:

- evaluate the stress–strain state of models of steel planar rafter trusses with various profile types of their members;
- select new truss profiles based on calculations in the *Metal* module of the “LIRA-SAPR” software;
- assess the efficiency of the new profiles (in %);
- calculate the weight of the models after the first iteration;
- estimate the cost of the models;
- formulate conclusions.

The analysis of publications and studies has shown that **optimization** is the process of finding the best combination of system parameters. In steel truss design, it develops in two main directions:

1. Minimization of mass and cost by selecting optimal sizes, shapes, and topology of the structure using metaheuristic algorithms (GA, DE, Firefly, etc.).
2. Improvement of the accuracy of modeling joints and connections, since they significantly affect the mass and strength of the truss.

Multi-objective optimization is also common, simultaneously considering mass, deflection, cost, reliability, and environmental impact. Parametric design and automated algorithms are used to explore thousands of variants efficiently. Current studies focus on computation acceleration, machine learning, and stochastic parameter consideration.

In the **main part**, finite element models of four planar trusses made of different profile types were created using the Finite Element Method and LIRA-SAPR 2024 software: angle, tubular, closed rectangular box, and LSTC profiles.

Rational cross-sections were selected for all models according to *ULS* and *SLS* design checks.

The weight and cost of each model were calculated using current market prices for profiles.

The conclusions show that, according to the criteria of economy and metal efficiency, the **truss with a tubular profile (F-TB)** demonstrated the best performance — having the lowest weight and cost. **Angle (F-KT)** and **box (F-KB)** trusses occupy an intermediate position, with the angle truss being more material-intensive. **LSTC trusses (F-LSTC)**, despite their reduced weight, are economically disadvantageous due to the high cost of thin steel profiles.

Keywords: material efficiency, structural solution, tube, angle section, box section, LSTC, truss.

List of Student Publications and/or Conference Presentations:

Lozko V.H., Rohovyi S.I., Sribniak N.M. *Rational Solutions of Roof Structures on the Example of Steel Rafter Trusses*. // Proceedings of the Scientific and Practical Conference of Lecturers, Postgraduates and Students of Sumy National Agrarian University (November 2025). – Sumy, 2025.

Lozko V.H., Rohovyi S.I., Sribniak N.M. *Rational Design of Steel Trusses in the Context of Sustainable Construction*. // Proceedings of the Scientific and Practical Conference of Lecturers, Postgraduates and Students of Sumy National Agrarian University (November 2025). – Sumy, 2025.

Appendices include: conference abstracts and a slide album of the multimedia presentation.

Structure of the work. The thesis consists of the main text of 60 pages, including 20 tables and 30 figures. The text contains 9 chapters with a general description and conclusions, a list of 33 references, and 2 appendices totaling 29 pages. The graphical part includes 27 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

Завдання

Анотація

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

РОБОТИ..... 11

1.1 Актуальність теми..... 11

1.2 Мета, задачі, предмет та об'єкт дослідження 16

РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ..... 18

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ..... 22

РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ ЧИСЛОВОГО

ДОСЛІДЖЕННЯ..... 24

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛІ КРОКВ'ЯНИХ ФЕРМ, ЩО ПРИЙНЯТО ДО

РОЗРАХУНКУ 26

5.1 Модель Ф-КТ..... 30

5.1.1 Призначення попередніх жорсткостей для елементів моделі Ф-КТ..... 31

5.2. Призначення попередніх жорсткостей для елементів моделі Ф-ТБ та моделі Ф-КБ..... 34

5.3. Призначення попередніх жорсткостей для елементів моделі Ф-ЛСТК... 37

5.4 Збір навантаження на ферму..... 39

РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО ТА

КОНСТРУКТИВНОГО РОЗРАХУНКІВ..... 43

6.1 Результати статичного розрахунку..... 43

6.1.1 Аналіз деформованого стану СЕ моделей..... 43

6.2 Результати конструктивного розрахунку..... 46

6.2.1 Аналіз використання несучої здатності перерізів конструктивних груп стержнів..... 46

6.2.2 Підбір нових перерізів стержнів моделей ферм в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР 2..... 52

РОЗДІЛ 7. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ВАГИ МОДЕЛЕЙ ФЕРМ..... 58

7.1 Вага допоміжних деталей моделей ферм..... 59

7.2 Орієнтовні значення К..... 60

7.3 Повна загальна вага моделей ферм з урахуванням допоміжних елементів	62
РОЗДІЛ 8. ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ КОНСТРУКЦІЇ.....	66
РОЗДІЛ 9. ВИСНОВКИ.....	69
Література.....	71
Додатки.....	76
Додаток 1. Тези доповіді на конференції	
Додаток 2. Графічний матеріал (презентація)	

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1 Актуальність теми

Обґрунтування вибору профілів для стержньових елементів сталеві пласкої крокв'яної ферми

Сталеві ферми можуть виконуватися з різних типів профілів, і кожне конструктивне рішення має свої особливості, що зумовлюють їх популярність у будівельній практиці. Одним із найпоширеніших варіантів є ферми з гарячекатаних кутників (рис.1.1)



Рис.1.1 Плоскі ферми із гарячекатаних кутників

Такі елементи є простими у виготовленні та монтажі, добре зварюються й з'єднуються на болтах, до того ж вони відносно доступні за вартістю. Завдяки цим властивостям кутникові ферми часто застосовуються у виробничих і громадських будівлях із середніми прольотами. Проте їх недоліком є невисока ефективність перерізу, схильність до скручування окремих елементів і менш виразний архітектурний вигляд через відкриті полиці профілю.

Іншим рішенням є використання трубчастих перерізів — круглих, квадратних або прямокутних труб (рис.1.2).

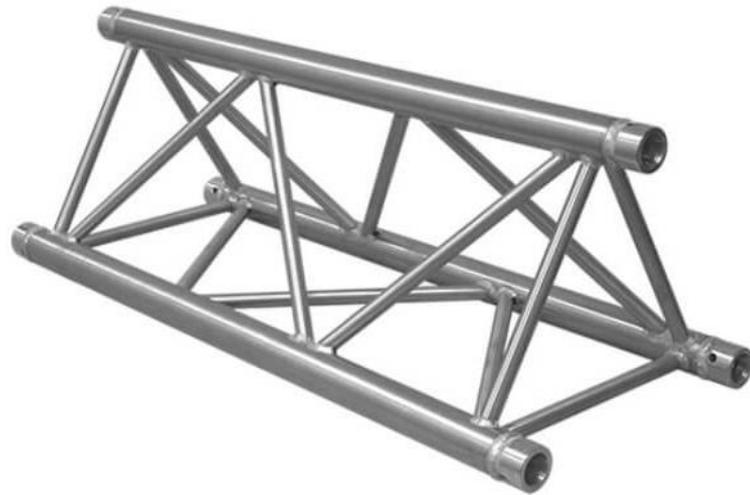
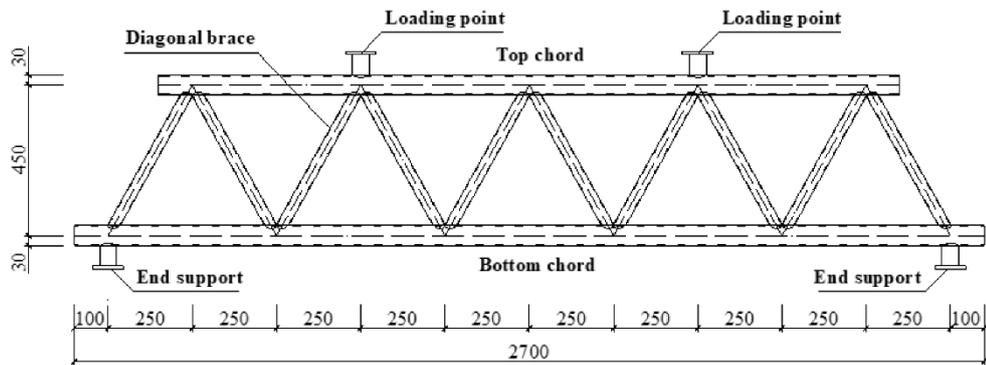


Рис.1.2 Ферма із круглої труби

Їхня головна перевага полягає у високій міцності й жорсткості при мінімальній витраті металу, що досягається завдяки замкненій формі перерізу. Такі ферми мають раціональну геометрію, стійкі проти кручення й втрати форми, а також відзначаються естетичним виглядом, що робить їх популярними в архітектурних проєктах з відкритими несучими конструкціями. Разом із тим трубчасті ферми потребують складніших технологічних рішень при зварюванні та розкрійі, що може ускладнювати виготовлення і підвищувати вартість. Вони найбільш доцільні у великих прольотах — ангарах, аренах, мостах, де важлива і надійність, і архітектурна виразність.

Ферми з коробчатого перерізу застосовують рідше, однак вони мають особливе значення у відповідальних спорудах.

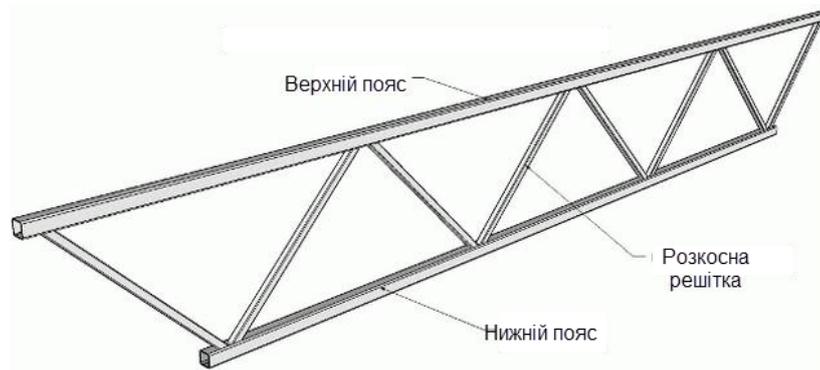


Рис. 1.3 Односкілі ферми із профільної труби- ЗГЗП

Завдяки високій жорсткості та стійкості ці конструкції здатні сприймати значні навантаження. Замкнений переріз сприяє поліпшенню аеродинамічних характеристик, що особливо важливо для мостів і високих споруд, а також відкриває можливість розміщення всередині порожнини інженерних комунікацій. Головним недоліком таких ферм є складність виготовлення, велика кількість зварних швів та необхідність контролю їхньої якості, що істотно ускладнює виробництво і підвищує собівартість. Тому коробчаті ферми зазвичай застосовують у спеціальних спорудах — мостових прогонах, високих щоглах чи кранових конструкціях.

Окремо слід згадати ферми, виконані з легких сталевих тонкостінних профілів (ЛСТК). Вони відрізняються малою вагою і водночас достатньою несучою здатністю, що робить їх зручними для транспортування і швидкого монтажу. Завдяки заводському виготовленню профілі ЛСТК (рис.1.4) мають високу точність геометрії, а їх застосування є економічно вигідним у малоповерховому будівництві.



Рис. 1.4 Кров'яні ферми із ЛСТК

Водночас такі елементи чутливі до локальної втрати стійкості, потребують ретельного антикорозійного захисту та мають обмеження у використанні для великих прольотів. Саме тому ЛСТК доцільно використовувати в житлових і цивільних будівлях із невеликими прольотами,

у павільйонах, надбудовах та під час реконструкцій, де перевагу мають легкість і швидкість зведення.

Загалом вибір конкретного типу профілю для сталеві ферми залежить від прольоту, величини навантаження, умов експлуатації та архітектурних вимог. Якщо необхідно отримати економічне рішення для середніх будівель, доречно застосовувати гарячекатані кутники. Для великих і архітектурно виразних споруд доцільніше використовувати трубчасті перерізи. У випадках, коли вирішальне значення мають жорсткість і несуча здатність, ефективними будуть коробчаті ферми. А для легких будівель, де важлива швидкість монтажу та мінімальна вага, оптимальним вибором є профілі ЛСТК.

Загальні рекомендації

- Вибір типу профілю визначається прольотом, навантаженням, умовами експлуатації та архітектурними вимогами.
- Для економічних і нескладних рішень — кутники; для архітектурних і великих прольотів — труби; для особливо навантажених і відповідальних споруд — коробчаті профілі; для легких і швидкокомтованих будівель — ЛСТК.
- Обов'язково враховуються фактори технологічності виготовлення, вартості монтажу та експлуатаційної довговічності.

Таблиця 1.1 «Переваги – Недоліки» різних типів профілів сталевих ферм

Тип профілю ферми	Переваги	Недоліки
Гарячекатані кутники	- Простота виготовлення та монтажу - Широка доступність і відносна дешевизна - Добра зварюваність та можливість болтових з'єднань	- Невисока ефективність перерізу - Схильність до скручування - Менш виразний архітектурний вигляд
Трубчастий переріз (круглі, квадратні, прямокутні труби)	- Висока жорсткість та міцність при невеликій витраті металу- Стойкість проти кручення і втрати форми- Естетичність, зручний захист від корозії	- Складність зварних та болтових з'єднань - Необхідність спеціального обладнання для розкрою

		- Вища вартість виготовлення
Переріз із гнутих замкнених зварних квадратних	- Дуже висока жорсткість і несуча здатність - Стійкість до дії аеродинамічних навантажень - Можливість розміщення комунікацій усередині	- Висока складність виготовлення та контролю якості - Велика кількість зварних швів - Висока собівартість і металоємність
ЛСТК профілі (тонкостінні)	- Мала вага при достатній несучій здатності - Зручність транспортування й монтажу - Висока точність геометрії - Економічність у малоповерховому будівництві	- Чутливість до локальної втрати стійкості - Потреба в якісному антикорозійному захисті - Обмеженість застосування для великих прольотів

Дослідження та аналіз параметрів оптимізації конструктивного вирішення крокв'яних ферм є **актуальною задачею** та може бути **метою** подальших досліджень.

1.2 Мета, задачі, предмет та об'єкт дослідження

Метою роботи є визначення матеріалоємності плоскої крокв'яної ферми в залежності від критерієм матеріалоємності та вартості матеріалу (сталі).

Задачі, що слід сформулювати для досягнення мети:

- вивчення та аналіз джерел щодо методології призначення перерізів різних типів для елементів крокв'яних ферм;
- призначення параметрів що змінюються. Такими параметрами виступають різні можливі форми поперечного перерізу для конструктивних груп стержнів плоскої ферми- переріз із гарячекатаних кутників, із труби круглої, із профілів сталевих гнутих замкнених зварних квадратних для будівельних конструкцій, профілів ЛСТК.
- оцінити деформований стан різних моделей ферм;
- підібрати в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР нові перерізи згідно із умовами розрахунку стержнів за 1-ю та 2-ю групам граничних

станів;

- обчислити вагу моделей ферми з новими перерізами
- згідно ваги та типу прийнятого профілю для моделі, обчислити вартість моделей, що досліджуються;
- сформулювати висновки

Об'єкт дослідження – моделі плоскої статично визначуваної сталеві кров'яної ферми прольотом 24,0 м та висотою 3,85 м, що відрізняються лише профілем поперечного перерізу.

Предмет дослідження – деформований стан, матеріалоемність (вага) моделей, що досліджуються та вартість цих моделей.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що за допомогою них можливо оцінити: як і наскільки впливає форма перерізу конструктивних груп стержнів на деформований стан ферми та її матеріалоемність, а значить і вагу, й, в кінцевому результаті – на вартість моделі.

Апробація й публікація результатів роботи

Результати роботи опубліковано в збірнику тез студентсько-викладацької щорічної конференції Сумського національного аграрного університету.

Лозко В.Г., Роговий С.І., Срібняк Н.М. РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ПРИКЛАДІ КРОКВ'ЯНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ // Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (листопад 2025 р) – Суми, 2025. с.

Лозко В.Г., Роговий С.І., Срібняк Н.М. РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ФЕРМ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА // Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (листопад 2025 р) – Суми, 2025. с.

РОЗДІЛ 2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

Оптимізація розглядається як процес досягнення найсприятливішого поєднання характеристик об'єкта або процесу. Завдання оптимізації формулюється шляхом визначення критерію оптимальності та сукупності варійованих параметрів, зміна яких впливає на ефективність функціонування системи загалом.

Оптимізація крокв'яних сталевих ферм останніми роками розвивається в двох взаємопов'язаних напрямках:

1) пошук економічно і конструктивно ефективних розмірів і конфігурацій (sizing/shape/topology optimization) з метою мінімізації маси й вартості при дотриманні нормативних обмежень;

2) підвищення якості моделювання реальних деталей конструкції (вузли, фасонки, болтові та зварні з'єднання) для точнішої оцінки їхнього впливу на несучу здатність і динамічні характеристики. У першому напрямі активно застосовуються метаевристичні алгоритми (генетичні алгоритми, диференціальна еволюція, МОЕА), комбіновані методи (гібридні GA–локальний пошук) та чисельно-обґрунтовані підходи топологічної оптимізації; такі підходи дозволяють знаходити компактні, матеріалоощадні геометрії ферм і показали значну економію маси у порівнянні з класичними проектами [17,18]

Другим важливим напрямом є багатокритеріальна (multi-objective) оптимізація, коли одночасно мінімізують масу, вартість, прогин і, за потреби, екологічний вплив (GWP) або показники надійності. У таких роботах застосовують алгоритми, що формують фронт Парето, — це дає змогу розглянути компроміси між протилежними цілями і обрати конструктивне рішення з урахуванням пріоритетів замовника (наприклад, мінімізація маси при жорсткій межі по прогину або навпаки). Розроблені підходи також включають обмеження по стійкості і місцевих втратах стійкості тонкостінних елементів, що є критично важливим для тонкостінних профілів. [19,20]

Низка досліджень приділяє увагу практичним питанням проектування вузлів ферм (gusset plates, bolted/welded connections). Оскільки у реальній конструкції допоміжні деталі (фасонки, накладки, болтові з'єднання, шайби) вносять немалу вагу та локально змінюють розподіл напружень, сучасні рекомендації підкреслюють необхідність або (а) явного врахування мас і жорсткості цих елементів у моделі (як концентрованих мас/жорсткостей), або (б) виконання детального підрахунку маси вузлів і включення поправкового коефіцієнта при узагальненій оцінці ваги ферми. Оглядові праці й технічні звіти по фасонках і з'єднаннях дають методики для оцінювання цих ефектів і показують, що ігнорування вузлів може привести до помилок у оцінці маси й власних частот конструкції. [21; 22].

Зростає роль параметричного й скриптового проектування: комбінування CAD/FE-моделей із оптимізаторами дає змогу автоматизувати і прискорити перебір варіантів (виконувати сотні — тисячі варіантів у короткий час). Такі робочі процеси (parametric design + optimization) дозволяють включати технологічні обмеження (категорії стандартних перерізів, типи з'єднань, умови виробництва) та враховувати економічні параметри (ціни профілів, витрати на монтаж). Практичні приклади демонструють, що вже на стадії ескізного проєкту параметрична оптимізація допомагає визначити вузький набір перспективних конфігурацій [23; 24].

Окремий пласт робіт присвячено підвищенню ефективності обчислювальних методів оптимізації — зменшенню часу пошуку рішення при збереженні якості. Тут з'являються гібридні алгоритми (наприклад, поєднання диференціальної еволюції з методу підсилення чи локального градієнтного пошуку), машинне навчання (surrogate models, метамоделі) і прискорені стратегії для модульних конструкцій. Такі підходи особливо корисні для великих тривимірних ферм або серійних «попередньо змодельованих» елементів у проєктах промислових споруд [25].

У міжнародній практиці також підкреслюють важливість врахування надійності та випадковості вхідних параметрів: стохастична оптимізація або

надійнісні (reliability-based) підходи дозволяють отримати рішення, що забезпечують потрібні гарантії безпеки при змінності навантажень і властивостей матеріалів. Для важливих об'єктів (мости, покриття арен) доцільним вважається поєднання оптимізації за масою з перевіркою надійності та динамічних характеристик [26].

Насамкінець — кілька практичних висновків з огляду зарубіжної літератури. По-перше, для простих крокв'яних ферм при обмеженому наборі типових перерізів метаевристичні алгоритми (GA, DE) ефективні й відносно прості у впровадженні; вони дають помітну економію ваги. По-друге, для складних тривимірних ферм або коли важливі множинні критерії (вартість, прогин, GWP, динаміка), рекомендовано багатокритеріальну оптимізацію з подальшим аналізом фронту Парето. По-третє, точний облік вузлів і допоміжних деталей значно підвищує достовірність оцінки ваги та динамічних характеристик — у багатьох випадках доцільно або явно моделювати ці елементи, або застосовувати обґрунтований поправочний коефіцієнт. Нарешті, інтеграція параметричного моделювання, оптимізаторів та баз даних стандартних профілів робить оптимізацію практично застосовною на стадії ескізу і техніко-економічного обґрунтування [27].

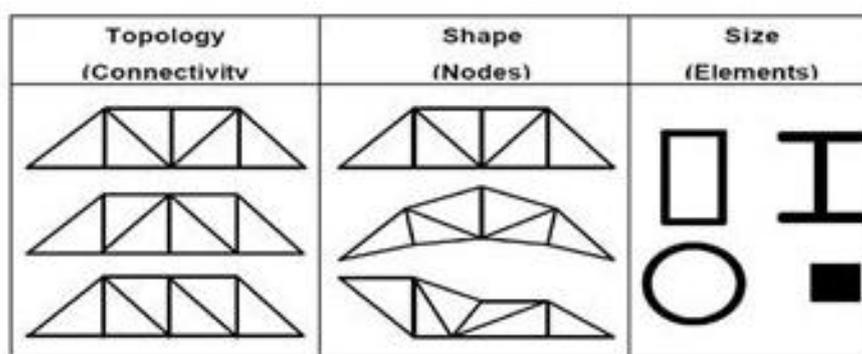


Рис. 2.1 Оптимізація планарної фермової конструкції за допомогою алгоритму Firefly [28]

У статті [28] дослідники застосовують Firefly Algorithm (алгоритм “вогників”) як мета-евристичний метод для size optimization сталевих ферм,

зокрема для мінімізації їх ваги (weight minimization) з урахуванням обмежень по напруженнях, прогинах, кількості та геометрії елементів.

На рис. 2.1 наведено три категорії оптимізації конструкції: *розмірна* (площі перерізів стержнів; оптимізація за обрисом ферми (координація вузлів); оптимізація за топологією (координація вузлів та з'єднань).

На рис. 2.1 показано:

- Як змінюється геометрія ферми в залежності від варіантів розмірів елементів (перерізів) — тобто різні профілі, різні площі поперечних перерізів, які групуються або не групуються.
- Як набір геометричних змін (форми профілів, кількості і типу елементів) впливає на вагу конструкції: рішення з більшими крученими чи тонкими елементами мають більшу вагу, а оптимізовані рішення з більшими перерізами там, де потрібно, і меншими — там, де можна скоротити, дають економію.
- Графіки або діаграми, де порівнюються варіанти з різними профілями (розмірними перерізами) і показано, який варіант дає мінімальну вагу при дотриманні всіх обмежень.

Отже, з вище викладеного можна сформулювати узагальнені висновки, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Алгоритм оптимізації сталевих крокв'яних ферм

Етап	Зміст дій	Інструменти/Методи
1	Формулювання критерію оптимізації (маса, вартість, жорсткість, екологічні показники, багатокритеріальна оптимізація)	Критерії Парето, економічні показники
2	Визначення варійованих параметрів конструкції	Типи перерізів (кутники, труби, коробки, ЛСТК), геометрія, топологія
3	Вибір ключових параметрів для оптимізації	Профіль елементів, довжина панелей, тип вузлів

4	Збір навантажень і постановка розрахункової моделі	Норми навантажень (єврокоди, AISC), регіональні умови
5	Розрахунок за граничними станами	Перша та друга групи граничних станів
6	Оптимізаційний пошук рішення	Генетичні алгоритми, диференціальна еволюція, PSO, Harmony Search
7	Оцінка техніко-економічних показників	Вага, вартість матеріалу й монтажу, ресурсозбереження
8	Порівняння альтернатив і вибір оптимального рішення	Багатокритеріальний аналіз, аналіз чутливості
9	Формування висновків і рекомендацій	Звітність, графічні ілюстрації, креслення

Згідно п.2 таблиці 2.1 в даному дослідженні за параметр, що варіюється приймемо форму профілю для стержньових елементів ферми.

Оцінювання ефективності варіанту конструктивного вирішення ферми буде здійснюватися за проміжним параметром – вагою ферми, та кінцевим параметром – вартістю моделі ферми.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У межах даної роботи доцільним є застосування комплексу методів, які забезпечують можливість оптимального вибору конструктивного рішення крокв'яної сталевий ферми:

1. **Аналітичний метод** – для попереднього визначення впливу форми поперечного перерізу на масу елементів ферми. Використання класичних розрахункових співвідношень дозволяє встановити залежності між геометричними характеристиками профілю та його несучою здатністю.
2. **Метод числового моделювання (метод скінченних елементів, МСЕ)** – для перевірки напружено-деформованого стану та прогинів у фермі при різних варіантах профілів. Це дозволяє об'єктивно оцінити працездатність моделі за 1-ю та 2-ю групами граничних станів.

3. **Метод техніко-економічного аналізу** – для переходу від проміжного параметра (вага) до кінцевого критерію (вартість). На цьому етапі здійснюється перерахунок вартості з урахуванням маси сталі, коефіцієнтів на монтаж та виготовлення, а також можливих додаткових витрат на вузли й з'єднання.
4. **Метод багатокритеріальної оптимізації** – для узгодження двох ключових параметрів (мінімальної ваги та мінімальної вартості). Використання методів Парето дає можливість отримати множину ефективних рішень і надати рекомендації щодо вибору найбільш раціонального профілю залежно від заданих пріоритетів.
5. **Методика розрахунку за сполученням навантажень** полягає у врахуванні одночасної дії різних видів навантажень, що можуть впливати на конструкцію в реальних умовах експлуатації. Відповідно до будівельних норм (наприклад, [31] або [32]), усі навантаження поділяються на:
- Постійні (вага конструкцій, фундаменту, покрівлі тощо);
 - Тимчасові тривалі (корисне навантаження від людей, меблів, обладнання);
 - Тимчасові короточасні (снігове, вітрове);
 - Особливі (сейсмічні, аварійні впливи).
- Щоб перевірити надійність конструкції, виконують розрахунок за комбінаціями навантажень:
1. Визначають діючі навантаження та переводять їх у розрахункові значення за допомогою коефіцієнтів надійності.
 2. Формують комбінації навантажень (основні та особливі), у яких враховуються постійні та найбільш несприятливі поєднання змінних навантажень.
 3. Розраховують зусилля в елементах конструкції для кожної комбінації.
 4. Перевіряють граничні стани (несучої здатності та придатності до експлуатації).
 5. За результатами визначають найбільш небезпечну комбінацію, яка й використовується для остаточного розрахунку конструкції.

6. Таким чином, методика дозволяє врахувати реальні умови дії навантажень і забезпечити безпеку та економічність конструкції

Таким чином, дослідження базується на поєднанні **розрахунково-аналітичних методів, числового моделювання, оптимізаційних алгоритмів і техніко-економічного аналізу**, що дозволяє обґрунтовано порівняти варіанти конструктивних рішень та обрати оптимальний профіль для стержневих елементів ферми.

РОЗДІЛ 4

АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

У межах даної роботи розглядається оптимізація конструкції стропильної металевої ферми з прольотом 24 м, скінченоелементна модель якої наведена на рис. 4.1

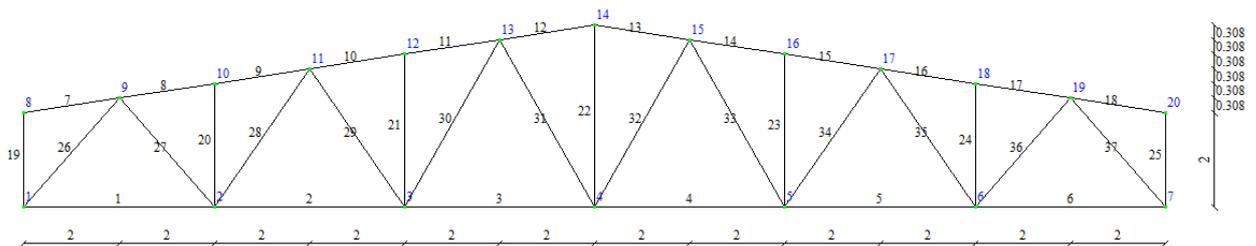


Рис. 4.1 Скінченоелементна розрахункова схема ферми прольотом 24,0 м

Для досягнення поставленої мети пропонується реалізувати алгоритм пошуку оптимального конструктивного рішення, що включає такі етапи: визначення критерію оптимізації; встановлення можливих варійованих параметрів; вибір параметрів для подальшої оптимізації; розрахунок конструкції за першою та другою групами граничних станів; визначення техніко-економічних показників; формування висновків щодо ефективності прийнятого рішення.

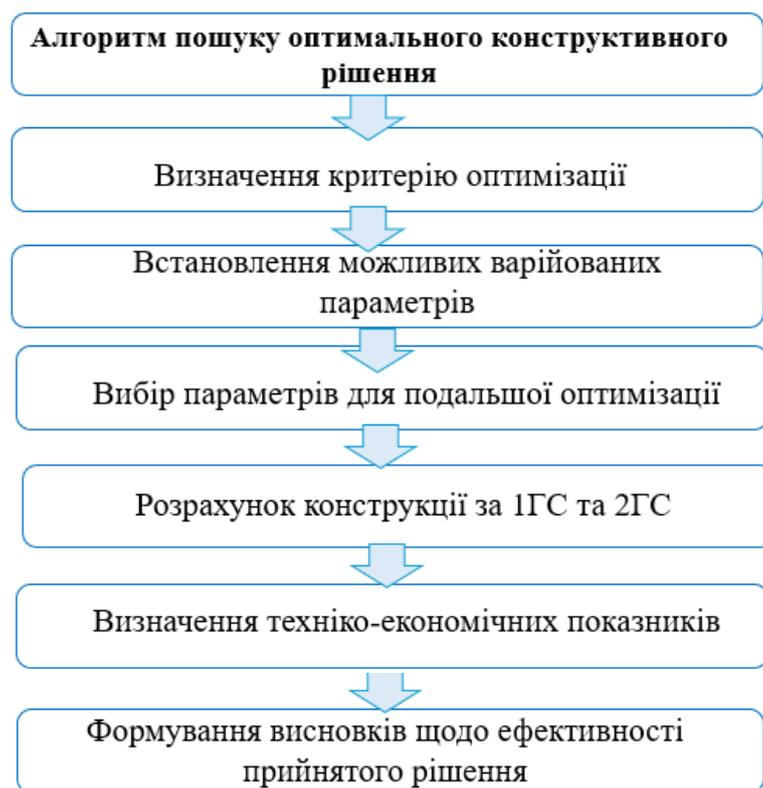


Рис. 4.2 Алгоритм пошуку оптимального конструктивного рішення плоских ферм

Апробація алгоритму передбачає прийняття мінімальної ваги конструкції як основного критерію оптимізації, що відповідає сучасним дослідженням у цій сфері [2, 3]. Значення можливих варійованих параметрів систематизовано у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Параметри крокв'яної ферми

Параметри, що варіюються	Значення
Матеріал конструкції- клас сталі	C235, C245, S355
Типи перерізів елементів	Кутник горячекатаний рівнополочний за ГОСТ 8509-93
	Труба сталева електрозварна прямошовна за ГОСТ 10704-91 (кругла труба)
	Профіль сталевий гнутий замкнений зварний квадратний за ГОСТ 30245-94 (гнутий профіль, в подальшому ЗГСП)

У рамках цієї роботи об'єктом оптимізації обрано тип поперечного перерізу елементів. Для виконання подальших розрахунків здійснюється збір навантажень, з урахуванням районування території будівництва. Як приклад прийнято умови проектування для м. Суми.

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛІ КРОКВ'ЯНИХ ФЕРМ, ЩО ПРИЙНЯТО ДО РОЗРАХУНКУ

Геометрична та скінченоелементна модель ферми наведена на рис. 5.1

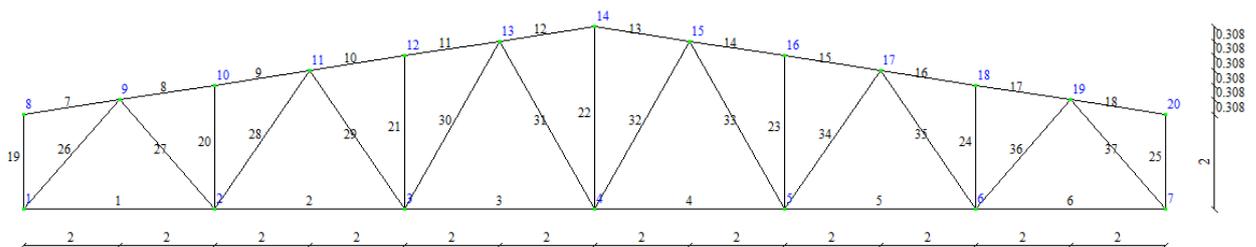


Рис. 5.1 Скінченоелементна схема ферми прольотом 24,0 м

До розрахунку прийнято плоску симетричну ферму з похилими поясами. Проліт (L) ферми становить 24,0 м. Висота ферми в коньку (H , підйом) становить 3,0 м й вимірюється в середині панелі. Висота крайніх стійок решітки ферми становить 2,0 м. Кількість панелей дорівнює 6. Довжина панелі становить 4,0 м.

Ферму змодельовано в площині XOZ в ПК Ліра-САПР. Скінченоелементна модель має ознаку системи №2.

Для лівої опори ферми передбачено заборону переміщення вузла вздовж осей X та Z (рис.5.2) Для правого опорного вузла ферми заборонено переміщення вузла тільки по вертикалі – вздовж осі Z . Вздовж осі X переміщення вузла дозволено.

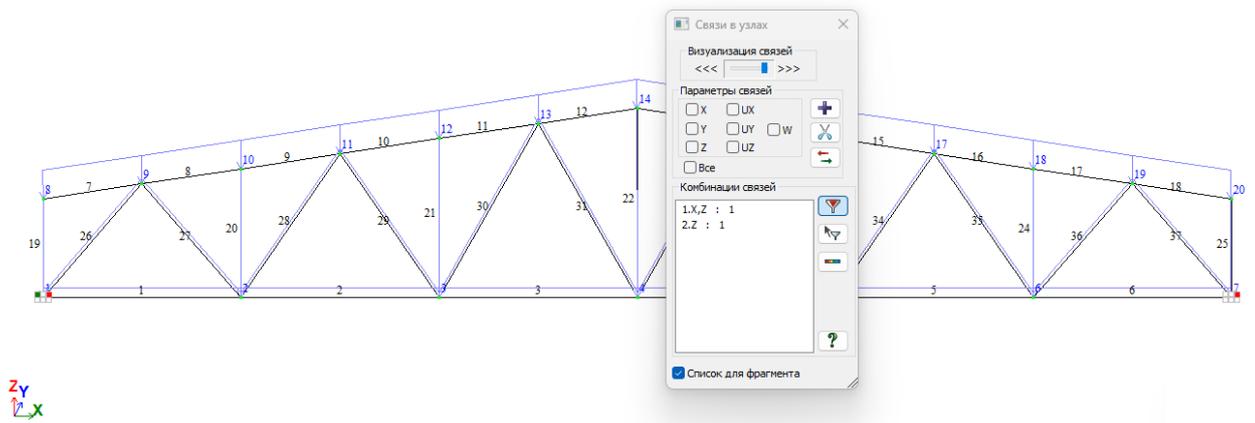


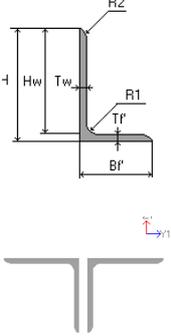
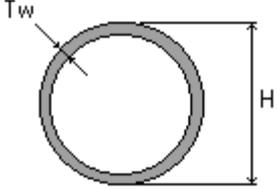
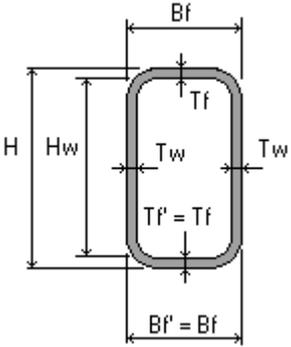
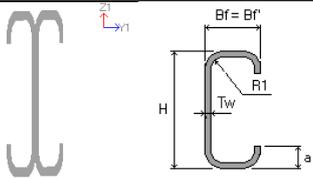
Рис. 5.2 Призначення опорним вузлам ферми зв'язків

Таким чином опорні вузли ферми мають загалом три накладених зв'язки, що робить таку конструкцію статично визначуваною системою (СВС).

Це значить, що різні типи жорсткостей для її елементів (різні профілі) не будуть впливати на величини зусиль (напружений стан) її стержневих елементів.

Як змінний критерій для визначення ефективного конструктивного вирішення плоскої сталеві ферми приймемо такі профілі для стержнів конструкції (таблиця 5.1): 1) ферма з кутників, 2) ферма із трубчатих елементів, 3) ферма із гнутих замкнених зварних квадратних профілів, 4) ферма із ЛСТК профілів.

**Таблиця 5.1 Профілі для стержнів ферми, що прийнято до
розрахунку**

№ профілю за порядком	Назва профілю	Форма профілю
1	Кутники сталеві гарячекатані рівнополочні (ДСТУ 2251:2018).	
2	Труби сталеві зварні для будівельних конструкцій (ГОСТ Р 58064-2018)	
3	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні для будівельних конструкцій (ГОСТ 30245-94)	
4	Профіль С-подібний «PRUSZYNSKI» (ДСТУ Б В.2.6-75:2008) Профіль С-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680- 073-2020)	

В таблиці 5.2 наведено порівняння для чотирьох типів сталевих ферм за основними критеріями.

Таблиця 5.2 Порівняння типів сталевих ферм

Критерій	1. Ферма з кутників	2. Ферма з трубчатих елементів	3. Ферма із гнутих замкнених зварних квадратних профілів (ГКП)	4. Ферма з ЛСТК-профілів
Вага конструкції	Легка–середня	Легка при високій міцності	Середня (трохи важча за труби через товщину стінок)	Дуже легка
Міцність та жорсткість	Достатня, але обмежена для великих прольотів	Висока жорсткість у всіх напрямках	Дуже висока завдяки замкненому профілю	Обмежена, підходить для невеликих навантажень
Економічність сталі	Висока (мінімум відходів)	Витрати сталі більші, ніж у кутників	Більш матеріаломісткі, але забезпечують кращу стійкість	Дуже економічні за масою, але часто дорожчі за рахунок складності профілю
Стійкість до кручення	Невисока, особливо при однополичному навантаженні	Висока, завдяки замкненій формі	Дуже висока	Середня
Стійкість до корозії	Середня (відкриті полиці потребують фарбування)	Краща, але вимагає антикорозійного захисту зсередини	Висока при якісному захисті	Залежить від покриття (оцинковка – найкращий варіант)
Технологічність виготовлення	Дуже проста (різка, зварювання, болти)	Складніша (вирізи, стикові шви)	Складніша, ніж у труб (багато зварних швів)	Потребує спеціального обладнання, але без зварювання
Монтаж	Легкий	Складніший через зварні вузли	Середній за складністю	Дуже швидкий (болтові з'єднання, саморізи)
Сфера застосування	Ангари, навіси, склади, середні прольоти	Мости, великі прольоти, висотні споруди, вежі	Промислові об'єкти, каркаси з підвищеною жорсткістю	Легкі покриття, швидкомонтвані будівлі, приватне будівництво

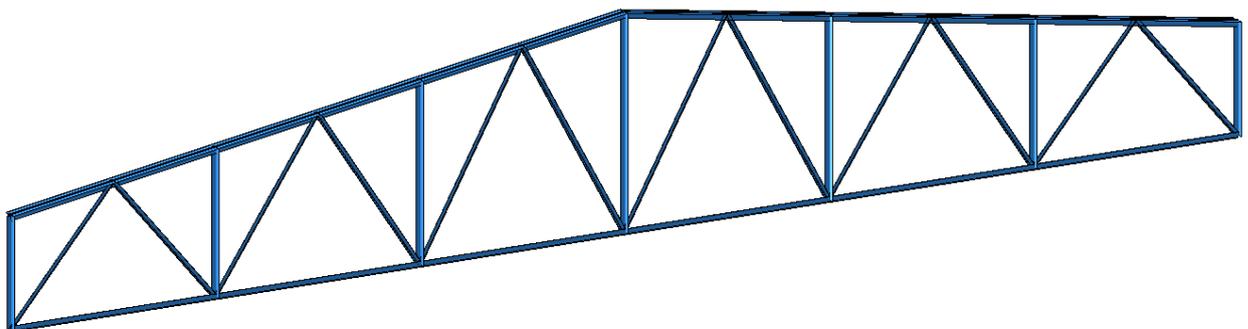
5.1 Модель Ф-КТ

Ферми зі сталевих кутників — це просторові чи плоскі конструкції, які складаються з прутків у вигляді рівнополичних або нерівнополичних кутників, з'єднаних у вузлах (зварюванням, болтами чи заклепками). Вони застосовуються в покриттях промислових і громадських будівель, мостах, щоглах, ангарах та інших спорудах, де потрібні великі прольоти при мінімальній витраті матеріалу.

Переваги.

1. Економічність матеріалу – кутники забезпечують хороше співвідношення міцності до маси, що дозволяє зменшити витрати сталі.
2. Простота виготовлення – кутники легко різати, зварювати або з'єднувати болтами, тому виробництво і монтаж відносно недорогі.
3. Зручність транспортування та монтажу – елементи мають невелику вагу, що спрощує доставку та складання на будівельному майданчику.
4. Універсальність застосування – можуть використовуватись у малих і великих прольотах, для легких покриттів та допоміжних конструкцій.
5. Стійкість у вузлах – завдяки формі кутника ферма добре працює на розтяг і стиск, що підвищує надійність конструкції.
6. Вигідна альтернатива прокатним профілям – у багатьох випадках дешевші за двотаври чи швелери, особливо для легких ферм.

На рис. 5.1 наведено просторову (3Д модель) ферми Ф-КТ, що змодельована із гарячекатаних кутників.



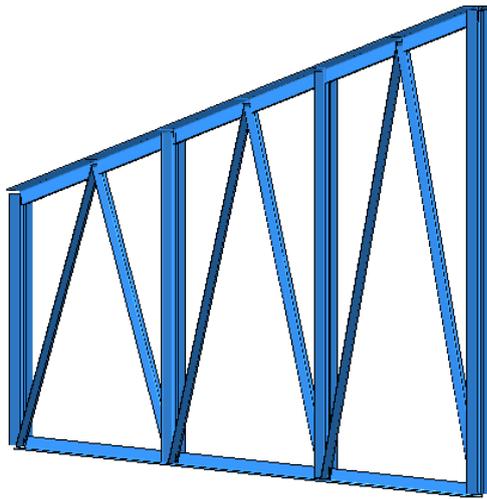


Рис.5.3 Просторова модель ферми Ф-КТ із гарячекатаних кутників в ПК ЛІРА-САПР 2024

5.1.1 Призначення попередніх жорсткостей для елементів моделі Ф-КТ.

У сталевих ферм із похилим верхнім поясом та системою стійок і розкосів вибір і призначення перерізів зі спарених кутників має свої правила, які сформувались у нормативних документах [29, 30] і в практиці проектування.

Типовими елементами елементами ферми є:

- Пояси (верхній і нижній): працюють на значні осьові сили (стиск і розтяг).
- Стійки (вертикалі): найчастіше працюють на стиск.
- Розкоси (діагоналі): працюють на розтяг або стиск залежно від схеми навантаження.

Перерізи з кутників

У конструкціях ферм застосовують спарені рівнополічні або нерівнополічні кутники (L-профілі), які об'єднують між собою за допомогою зварювання або прокладок із болтовими чи заклепковими з'єднаннями. Існує кілька варіантів їх спарювання: «**спинка до спинки**», що утворює осьово симетричний двотавр, та «**полицями всередину**», що забезпечує підвищену жорсткість і компактність елемента.

У фермах із кутників вибір профілів залежить від призначення окремих елементів.

Нижній пояс, що працює на розтяг, може виконуватися з одинарних кутників, особливо у малих фермах, або зі спарених кутників для більшої несучої здатності. Зазвичай їх орієнтують полицею донизу, що полегшує приєднання розкосів та стояків.

Верхній пояс, який сприймає стиск і часто має похиле розташування, виконується переважно зі спарених кутників для забезпечення стійкості. Їх розташовують симетрично відносно осі ферми так, щоб центр ваги збігався з віссю стержня. У випадках, коли довжина панелей є значною, між кутниками додатково встановлюють розкоси, утворюючи ґратчасту стінку в поясі.

Стійки зазвичай виготовляють з одинарних кутників, але при підвищених навантаженнях застосовують спарені. Їх орієнтують полицею у площину ферми, що забезпечує зручність з'єднання у вузлах.

Розкоси здебільшого виконують з одинарних кутників, оскільки вони працюють на розтяг чи стиск із невеликими зусиллями. Лише у випадку значних навантажень застосовуються спарені кутники, однак це трапляється рідше, ніж у поясах.

Практичні рекомендації щодо вибору перерізів ферми залежать від величини прольоту. Для невеликих і середніх прогонів у межах 12–24 м нижній пояс та розкоси доцільно виконувати з одинарних кутників (1L), тоді як верхній пояс і стійки потребують використання спарених кутників (2L) для підвищення стійкості. У випадку великих прогонів понад 30 м усі основні елементи ферми — як пояси, так і стійки — рекомендується виготовляти зі спарених кутників, тоді як розкоси, що працюють переважно на розтяг, можуть залишатися одинарними.

Узагальнюючи, **верхній похилий пояс** завжди виконується зі спарених кутників, розташованих симетрично відносно осі стержня. **Нижній пояс** допускається як у вигляді одинарних, так і спарених кутників, залежно від величини зусиль. **Стійки** зазвичай проєктують зі спарених профілів, особливо

в зонах стиску. **Розкоси** найчастіше залишаються одинарними, хоча за потреби їх також можна спарювати.

Прикладом є плоска ферма з прольотом 24 м, де застосування спарених кутників у верхньому поясі та стійках є рекомендованим рішенням для забезпечення необхідної жорсткості та надійності конструкції.

В таблиці 5.3 наведено жорсткісні параметри для моделі із кутників Ф-КТ, що були призначені при її першому статичному розрахунку.

Таблиця 5.3 Параметри жорсткості для Ф-КТ (попередні)

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	$E, \text{т/м}^2$	ϑ	$R, \text{т/м}^3$
1	Верхній пояс	2L125x10	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	L100x8	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	2L90 x 90 x 6	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	L75x6	2.10062e+007	0,3	7,85

Правила розташування спарених кутників у фермах ґрунтуються на вимогах до їхньої стійкості та надійної роботи в складі конструкції. Насамперед, кутники слід розташовувати симетрично відносно осі стержня так, щоб лінія центра тяжіння збігалася з геометричною віссю елемента — це дозволяє мінімізувати ексцентриситет і забезпечити правильне сприйняття навантажень.

Між собою кутники з'єднують шляхом зварювання по полиці або за допомогою прокладок і планок на болтах. У випадку довгих поясів рекомендується виконувати з'єднання в кількох точках, що допомагає уникнути місцевих вигинів і втрати стійкості окремих елементів.

Якщо стиснута полиця має значну довжину, доцільно передбачати додаткові зв'язки — ригелі між полицями або вертикальні ребра й стяжки, які підвищують загальну жорсткість пояса.

Окрему увагу приділяють вузлам кріплення розкосів і стояків до пояса. Щоб зменшити вплив ексцентриситету, рекомендується застосовувати гнучкі косинки (гусет-плити). У випадках, коли уникнути ексцентриситету неможливо, його враховують у розрахунковій схемі шляхом введення відповідних моментів.

5.2. Призначення попередніх жорсткостей для елементів моделі Ф-ТБ та моделі Ф-КБ

На рис. 5.2 наведена просторова модель ферми із елементів трубчатого перерізу, а на рис. 5.3 наведено просторова модель ферми із сталевих гнутих замкнених зварних квадратних профілів.

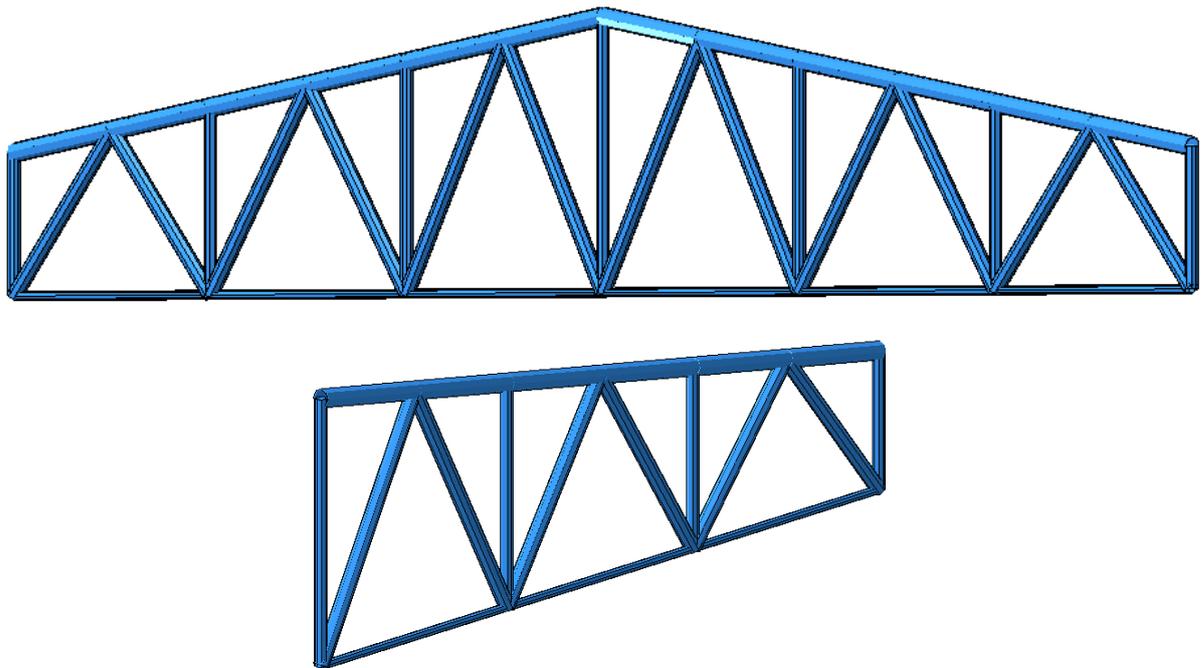


Рис.5.4Просторова модель ферми Ф-ТБ із елементів типу кругла труба

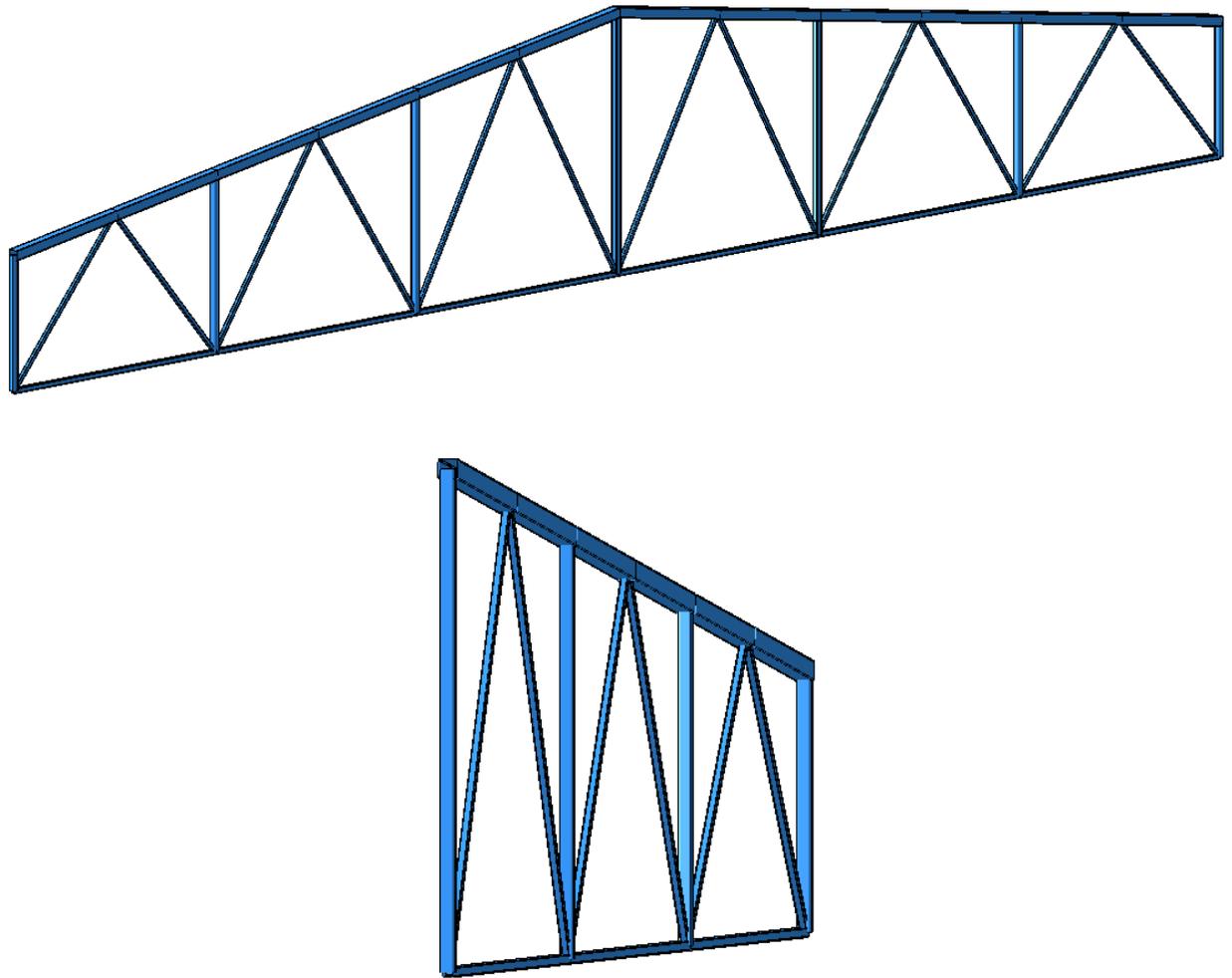


Рис.5.5 Просторова модель ферми Ф-КБ із профілів сталевих гнутих замкнутих зварних квадратних

Сталеві гнуті замкнені зварні квадратні профілі для будівельних конструкцій отримують методом формування із гарячекатаних або холоднокатаних сталевих смуг (штрипсів) із подальшим зварюванням і калібруванням.

Для ферми з прольотом 24 м (шість панелей по 4 м, з підйомом близько 3 м) можливим є варіант заміни традиційних кутників на трубчасті профілі — як круглі (CHS, circular hollow section), так і прямокутні або квадратні (RHS, rectangular hollow section). Така заміна вимагає уважного підбору перерізів і детального опрацювання вузлів, проте має низку переваг.

Основна ідея полягає в тому, що для стиснутих елементів (верхній пояс, стискові стійки) доцільно використовувати труби — як круглі, так і

прямокутні. Вони забезпечують кращу стійкість і меншу схильність до місцевої пластичної деформації, ніж відкриті профілі. У випадку елементів, що працюють на розтяг, елементів (нижній пояс, діагоналі на розтяг) трубчасті профілі також ефективні, оскільки мають достатню площу поперечного перерізу та забезпечують акуратний зовнішній вигляд конструкції.

Для верхнього пояса, який працює на стиск можливі два варіанти: круглі труби $\text{Ø}140 \times 6$ мм, розташовані симетрично, або прямокутні профілі RHS $120 \times 80 \times 6$ мм чи $100 \times 100 \times 6$ мм. Круглий переріз ефективно протидіє втраті стійкості, тоді як RHS спрощує приварювання косинок і вузлових пластин.

Нижній пояс, що сприймає розтяг, можна виконати з однієї труби CHS $\text{Ø}108 \times 5$ мм або $\text{Ø}127 \times 5$ мм, чи використати RHS $100 \times 50 \times 5$ мм або $100 \times 100 \times 6$ мм — вибір залежить від величини зусиль. У розтягу важлива насамперед площа поперечного перерізу, а круглі труби дають додаткову компактність.

Для стійок, які працюють переважно на стиск (раніше L90×6), доцільними є труби CHS $\text{Ø}108 \times 5$ мм або пара труб $\text{Ø}89 \times 4$ мм, а також RHS $80 \times 60 \times 5$ мм чи $100 \times 50 \times 5$ мм. Трубчастий профіль підвищує критичну довжину стійки й забезпечує кращу роботу при стисканні.

Розкоси, що здебільшого працюють на розтяг, можуть бути замінені на труби $\text{Ø}76 \times 4$ мм або $\text{Ø}89 \times 4$ мм, а також RHS $60 \times 40 \times 4$ мм чи $80 \times 40 \times 4$ мм. Якщо ж діагональ опиняється під дією стиску, потрібно застосовувати більші перерізи або навіть спарені труби.

Особливу увагу слід приділити вузлам. Для з'єднання труб найчастіше використовують гусет-плити товщиною 8–12 мм у другорядних і 12–16 мм в основних вузлах. У зварних з'єднаннях практикують врізку труби в пластину або застосування фланцевих рішень.

Вибір між круглими та прямокутними профілями залежить від умов роботи конструкції. Круглі труби (CHS) мають симетричну геометрію, що забезпечує рівномірний розподіл напружень, високу опірність осьовим вигинам та естетичний вигляд. Водночас вони складніші у виготовленні вузлів через необхідність точних вирізів і косинок. Прямокутні та квадратні труби

(RHS) зручніші у з'єднаннях завдяки плоским поверхням, легше забезпечують жорсткі стики, проте їхні полиці більш чутливі до місцевої нестійкості, а поведінка при крученні гірша, ніж у круглих профілів.

В таблицях 5.4 та 5.5 наведено жорсткісні параметри для моделей із круглих труб (Ф-ТБ) та моделі з профілів сталевих гнутих замкнутих зварних квадратних (Ф-КБ).

Таблиця 5.4 Параметри жорсткості для Ф-ТБ (попередні)

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	Е, т/м ²	ϑ	Р, т/м ³
1	Верхній пояс	О273 х 19	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	О127 х 5	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	О178 х 4	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	О219.0 х 5.0	2.10062e+007	0,3	7,85

Таблиця 5.5 Параметри жорсткості для Ф-КБ (попередні)

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	Е, т/м ²	ϑ	Р, т/м ³
1	Верхній пояс	□160 х 8	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	□80 х 6	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	□100 х 6	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	□60 х 4	2.10062e+007	0,3	7,85

5.3. Призначення попередніх жорсткостей для елементів моделі Ф-ЛСТК

ЛСТК-профілі (легкі сталеві тонкостінні конструкції) широко застосовуються для виготовлення ферм у сучасному будівництві. Вони

виготовляються з холодногнутої оцинкованої сталі товщиною, як правило, від 1,0 до 3,0 мм, що забезпечує високу довговічність і стійкість до корозії. Завдяки різним формам перерізів — С-, U-, Σ - чи Z-подібним, а також перфорованим або суцільним варіантам — профілі можна оптимально підбирати залежно від розрахункових навантажень.

Однією з головних переваг ЛСТК є їхня мала вага: вони у 3–5 разів легші за традиційні гарячекатані балки, що значно знижує навантаження на фундамент та спрощує транспортування. Висока точність геометрії профілів сприяє швидкому монтажу та сумісності елементів у модульних фермах. При цьому несуча здатність таких конструкцій залишається високою — завдяки використанню складених перерізів ЛСТК-ферми успішно витримують як розтягувальні, так і стискальні зусилля.

З'єднання профілів можуть виконуватися за допомогою болтів, заклепок або самонарізних гвинтів; у багатьох випадках можливе навіть заводське складання, що додатково скорочує час монтажу на будівельному майданчику. Сфера застосування ЛСТК-ферм охоплює покрівельні та стінові конструкції промислових, складських і цивільних будівель, а також модульні споруди, ангари чи павільйони. До їхніх основних переваг належать швидкість монтажу без потреби у важкій техніці, можливість перекривати великі прольоти (до 30 метрів і більше), висока пожежна безпека завдяки використанню негорючого матеріалу та мінімальні витрати на подальше обслуговування.

Таким чином, ЛСТК-профілі є ефективним та сучасним рішенням для створення ферм, яке поєднує легкість, міцність, універсальність та економічність у будівництві.

Попередні варіаційні розрахунки показали, що для коректного статичного та конструктивного розрахунку в першому наближенні для верхнього поясу слід прийняти профіль у вигляді спарених гарячекатаних швелерів типу «коробка». Два крані розкоси (СЕ №23,37) решітки ферми доцільно прийняти з прокатних гарячекатаних стержнів коробчатого типу.

Таблиця 5.6 Параметри жорсткості для Ф-ЛСТК (попередні)

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	E, т/м ²	ϑ	R, т/м ³
1	Верхній пояс	[] 160x80x5 Швелери сталеві гнуті рівнополочні (ГОСТ 8278-83)	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	С-подібний профіль С 200x60x3	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	С-подібний профіль РС 160 x 68 x 1,5	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	СЕ №26,37: Прямокутна труба 60 x 4 СЕ №27-36: С-подібний профіль РС 140 x 68 x 1.5	2.10062e+007	0,3	7,85

5.4 Збір навантаження на ферму

Прийнято наступні види завантажень на конструкцію [31]:

Завантаження 1 - власна вага плити (постійне навантаження)

Завантаження 2 - власна вага конструктивних шарів покрівлі (постійне навантаження)

Завантаження 3 – снігове навантаження для м. Суми (тимчасове навантаження)

В таблиці 5.7 наведено збір навантаження на 1м² вантажної площі для сталеві крокв'яної ферми.

Таблиця 5.7 Збір навантаження на 1м² вантажної площі для сталеві крокв'яної ферми

№ з/п	Навантаження	Характеристичне значення	Коефіцієнт	Розрахункове

		навантаження, кг/м ²	надійності за навантаження М	навантаження, кг/м ²
1. Постійні навантаження від конструкції покрівлі				
1.1	Полімерна мембрана «Plastfoil FL» -1,2 мм	1,6	1,3	2,08
1.2	PIR- панелі «PirroMembrane» - 120 мм	3,7	1,2	4,44
1.3	Техноніколь «Паробар'єр СФ-1000»	1	1,3	1,3
1.4	Профільований лист НК 75-750-0.8	11,1	1,05	11,66
1.5	Металевий прогон: швелер №27	6	1,05	6,3
	Постійне без врахування власної ваги ферми	23,4		25,8
1.6	Власна вага ферми	Обчислюється автоматично ПК «ЛІРА-САПР»		
2. Тимчасове навантаження				
2.1	Сніг для м. Суми	167	1,04	173,68
Разом постійне та тимчасове (без урахування власної ваги ферми)		190,4		199,48

Прийmemo крок розташування плоских рам каркасу, складовим елементом яких плоскі ферми, як 6, 0 м.

Приведемо навантаження від покрівлі з розподіленого по площі до розподіленого по довжині ферми:

$$q_{\text{покр}} = g_p \cdot B = 0,0258 \cdot 6,0 = 0,1548 \text{ т/м}$$

Приведемо навантаження, що розподілене по довжині ферми до зосереджено у вузлах верхнього поясу ферми:

-середніх вузлах:

$$F_{\text{сер}}^{\text{покр}} = q_{\text{покр}} \cdot L_{\text{пан1}} = 0,1548 \cdot 4,0 = 0,6192 \text{ т/м}$$

-крайніх вузлах:

$$F_{\text{кр}}^{\text{покр}} = q_{\text{покр}} \cdot L_{\text{пан2}} = 0,1548 \cdot 2,0 = 0,3096 \text{ т/м}$$

Приведемо навантаження від снігу з розподіленого по площі до розподіленого по довжині ферми:

$$q_{\text{сніг}} = g_{\text{р,сн}} \cdot B = 0,17368 \cdot 6,0 = 1,042 \text{ т/м}$$

Приведемо навантаження, що розподілене по довжині ферми до зосереджено у вузлах верхнього поясу ферми:

-середніх вузлах:

$$F_{\text{сер}}^{\text{сніг}} = q_{\text{сніг}} \cdot L_{\text{пан1}} = 1,042 \cdot 4,0 = 4,168 \text{ т/м}$$

-крайніх вузлах:

$$F_{\text{кр}}^{\text{сніг}} = q_{\text{сніг}} \cdot L_{\text{пан2}} = 1,042 \cdot 2,0 = 2,084 \text{ т/м}$$

Схеми вузлового завантаження ферми від власної ваги конструкції, ваги покрівлі та від ваги снігу наведено на рис. 4.4, 4.5 та 4.6 відповідно.

1. Завантаження 1 (власна вага)

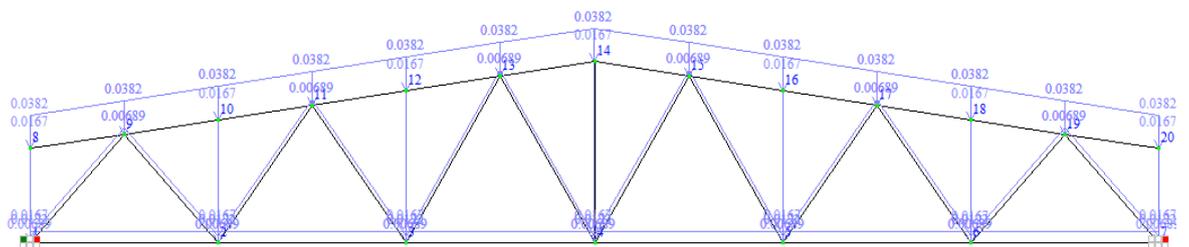


Рис. 5.6 Завантаження №1 - власна вага ферми

2. Завантаження 2 (покрівля)

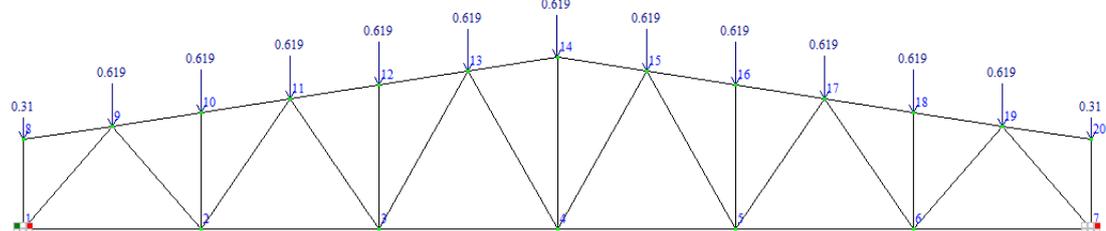


Рис. 5.7 Завантаження №2- вага покрівлі

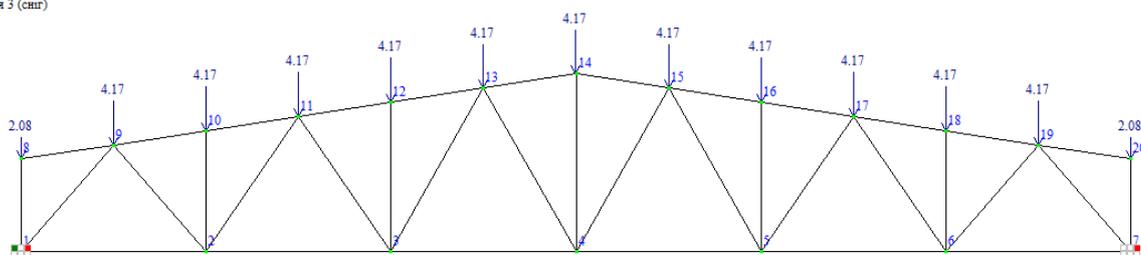


Рис.5.8 Завантаження №3- снігове навантаження

Завантаження від власної ваги конструкції залежить від прийнято профілю стержньового елемента та обчислюється в ПК Ліра-САПР автоматично.

Зусилля та деформації були обчислені згідно методики розрахунку за розрахунковим сполученням навантажень (РСН) згідно норм [31].

На рис. 5.9 наведено діалогове вікно в ПК Ліра-САПР для методу розрахунку за сполученням навантажень.

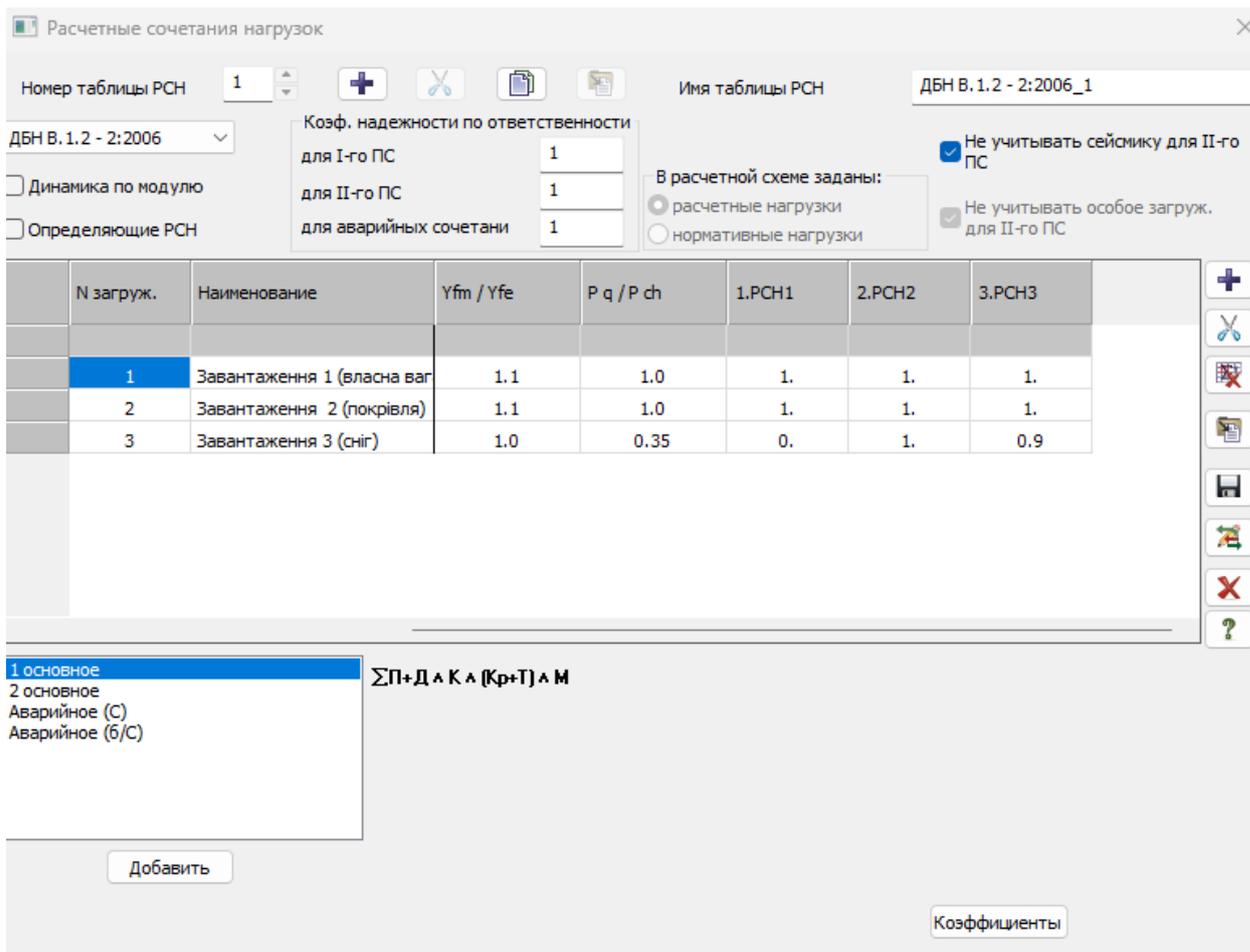


Рис. 5.9 Діалогове вікно в ПК Ліра-САПР для методу розрахунку за сполученням навантажень

В якості основних сполучень навантажень прийнято перше основне завантаження та друге основне завантаження [31].

РОЗДІЛ 6

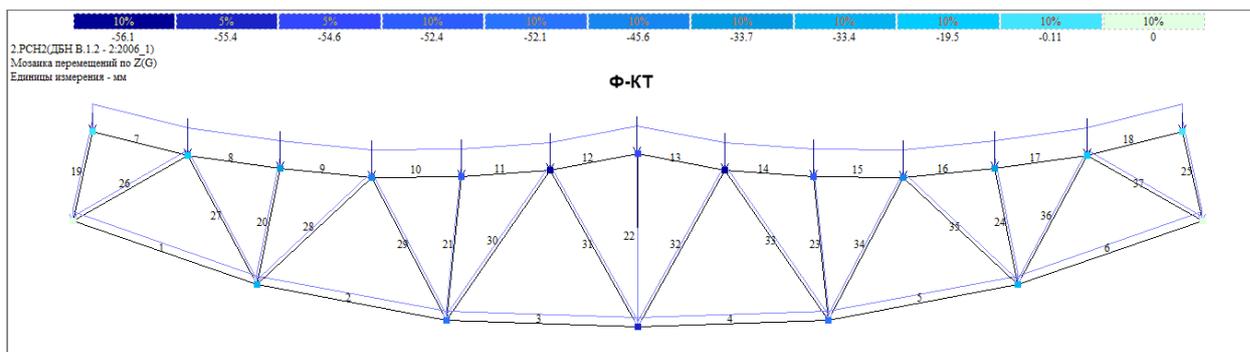
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО ТА КОНСТРУКТИВНОГО РОЗРАХУНКІВ

6.1 Результати статичного розрахунку

6.1.1 Аналіз деформованого стану СЕ моделей

На основі жорсткостей скінченних елементів, визначених у першому наближенні (див. табл. 5.1), проведено статичний розрахунок чотирьох розрахункових моделей крокв'яних ферм за методикою поєднання навантажень.

Аналіз напружено-деформованого стану виконано для розрахункових поєднань із урахуванням найбільш несприятливої комбінації дії навантажень. На рис. 6.1 подано мозаїку переміщень вузлів уздовж осі Z від поєднання РСН2 для досліджуваних схем ферм.



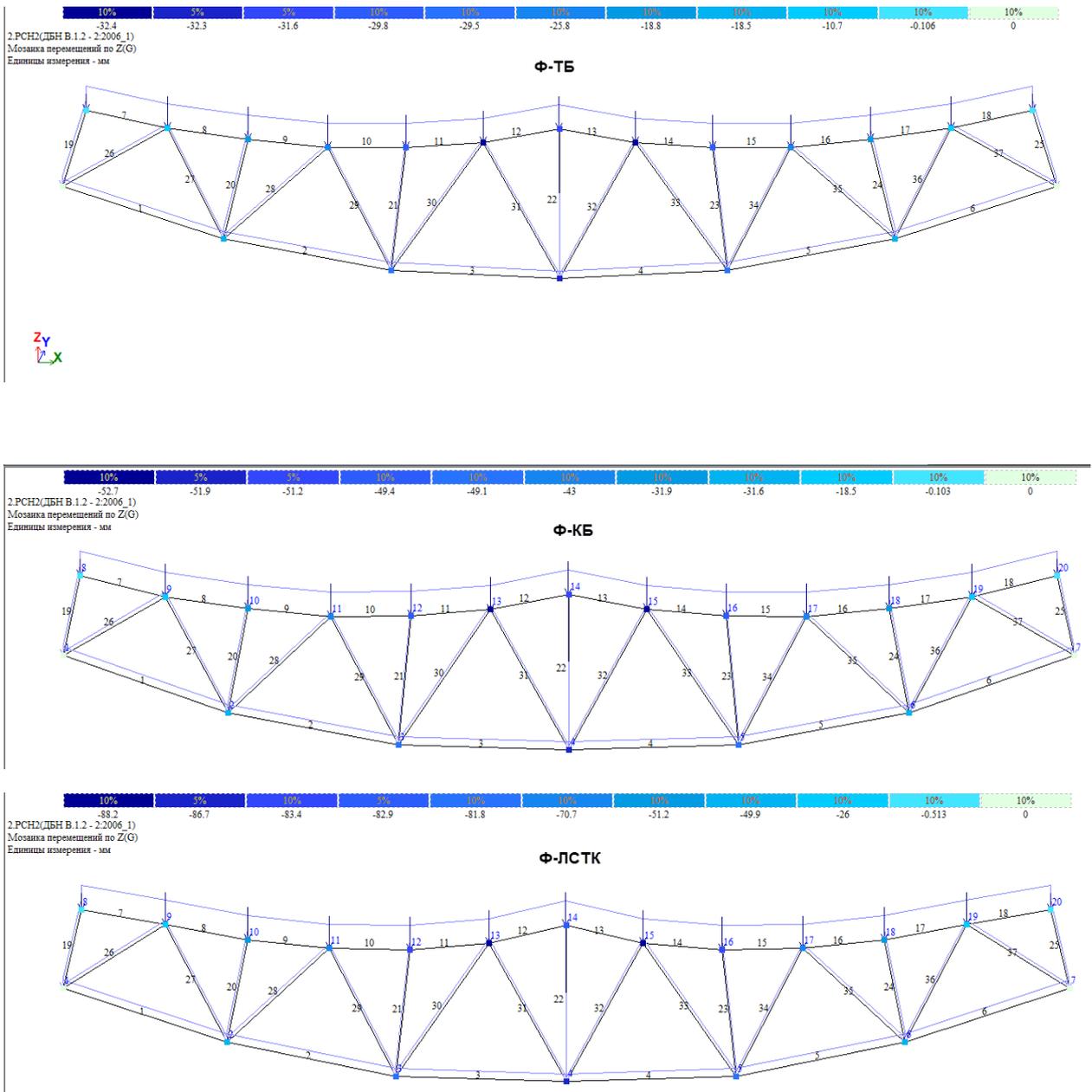


Рис.6.1 Деформовані схеми плоскої ферми та мозаїка вертикальних переміщень вузлів: для Ф-КТ-а; для Ф-ТБ -б; для Ф-КБ-в; для Ф-ЛСТК – в

В таблиці 6.1 наведено максимальні переміщення вузлів СЕ моделей ферм від усіх розрахункових сполучень навантажень (РСН1 , РСН2, РСН3).

Таблиця 6.1 Максимальні переміщення вузлів моделей ферм

Назва моделі ферми	РСН1	РСН2	РСН3
Ф-КТ	8,76	56,1	51,3
Ф-ТБ	7,76	49,5	45,4
Ф-КБ	7,76	49,5	45,4
Ф-ЛСТК	13,8	88,2	80,7

На рис.6.2 наведено максимальні переміщення вузлів моделі від РСН2.

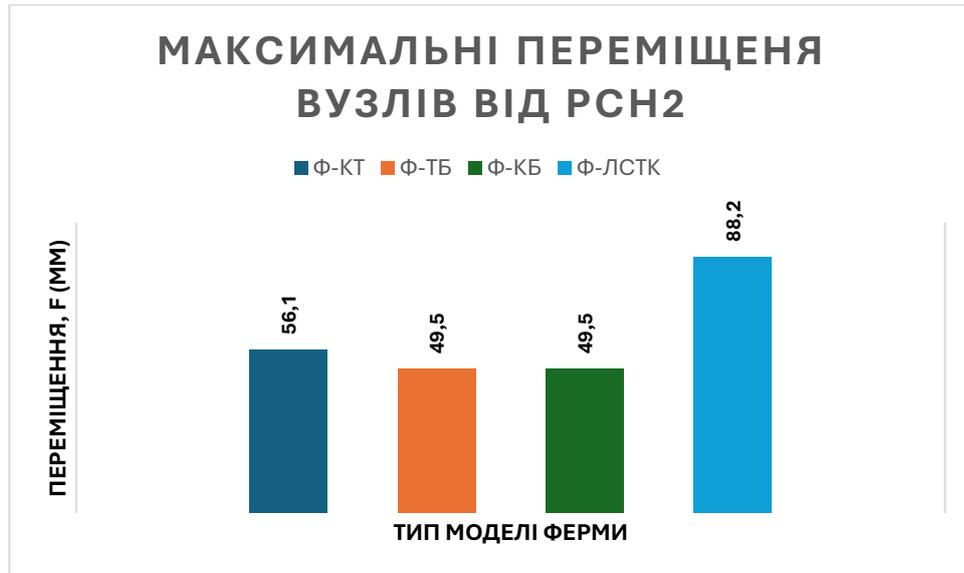


Рис. 6.2 Максимальні переміщення вузлів моделі від РСН2

Вертикальний граничний прогин ферми [33]:

$$f_u = l/250$$

Довжина ферми становить 24 м, отже,

$$f_u = \frac{2400}{250} = 9,6 \text{ см.}$$

Так, із рис.6.2 видно, що величини вертикальних прогинів знаходяться в допустимих межах та не перевищують граничного допустимого значення вертикально прогину згідно норм [33].

$$f_z^{(\Phi\text{-КТ})} = 5,6 \text{ см} < f_u = 9,6 \text{ см}$$

$$f_z^{(\Phi\text{-ТБ})} = 4,95 \text{ см} < f_u = 9,6 \text{ см}$$

$$f_z^{(\Phi\text{-КБ})} = 4,95 \text{ см} < f_u = 9,6 \text{ см}$$

$$f_z^{(\Phi\text{-ЛСТК})} = 8,8 \text{ см} < f_u = 9,6 \text{ см}$$

Видно, що найменшу деформативність мають ферми трубчатого й коробчатого профілів, а найбільш деформативною є модель ферми із легкого ЛСТК-профілю. Максимальний прогин ферми Ф-ЛСТК становить майже допустиме значення максимальної величини.

6.1.2 Аналіз напруженого стану СЕ моделей

Оскільки дана ферма є статично визначуваною системою, то незалежно від форми профілю перерізу стержнів елементів ферми зусилля в усіх елементах для усіх моделей ферм будуть однаковими (рис.6.2).

На рис.6.3 наведено осьові зусилля розтягу-стиску в стержнях ферми для усіх її моделей.

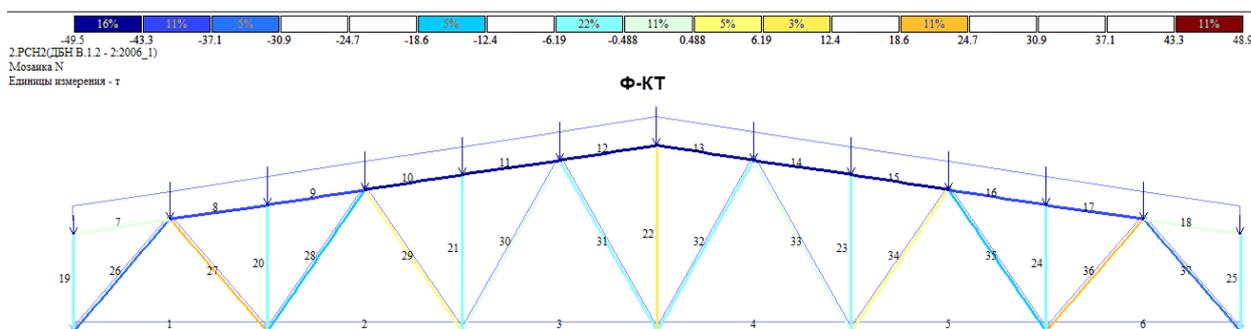


Рис. 6.3 Мозаїка осьового зусилля N в стержнях усіх моделей ферм від РСН2

Від другого сполучення навантажень (всі постійні + тимчасове) виникають найбільші зусилля осьового розтягу-стиску в моделі, які відповідно становлять $N_{\max}=48,9$ т та $N_{\min}=-49,5$ т.

6.2 Результати конструктивного розрахунку

6.2.1 Аналіз використання несучої здатності перерізів

конструктивних груп стержнів

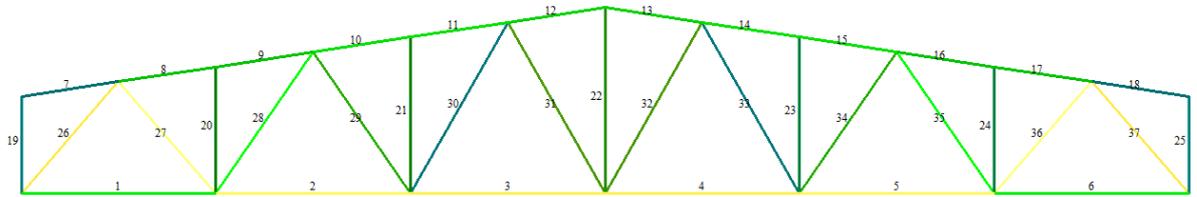
Згідно попередньо призначених жорсткостей елементів (див. табл. 5.3–5.6) виконали статичний розрахунок моделей ферми.

В модулі «Метал» ПК Ліра-САПР 2024 виконано підбір нових перерізів стержньовим елементів, таким чином, щоб вони відповідали умовам міцності, стійкості та жорсткості згідно [31].

На рис.6.4 – 6.11 наведено мозаїку розрахунків за 1ГС з поперечними перерізами стержнів, що прийнято у вихідних даних для Ф-КТ та мозаїку результатів розрахунку за 1ГС металевих стержнів, з підібраними поперечними перерізами.



Вариант конструирования: Вариант 1
 Расчет по РСН, ДБН В.1.2 - 2:2006_1 (ДБН В.2.6-198:2014)



Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 1 предельному состоянию

Рис.6.4 Мозаїка розрахунків за 1ГС з поперечними перерізами стержнів, що прийнято у вихідних даних для Ф-КТ



Вариант конструирования: Вариант 1
 Расчет по РСН, ДБН В.1.2 - 2:2006_1 (ДБН В.2.6-198:2014)

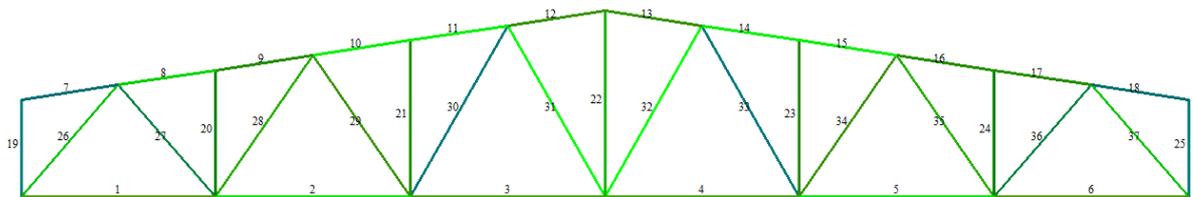
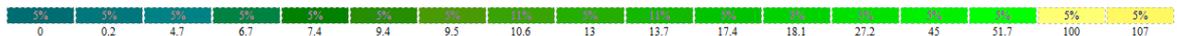
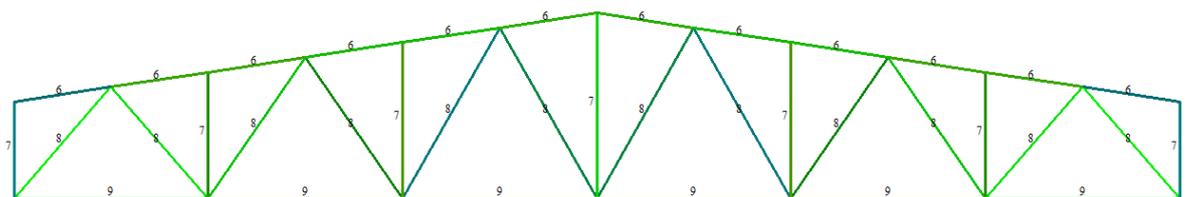


Рис.6.5 Мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих стержнів, з підібраними поперечними перерізами (у % несучої здатності) для Ф-КТ

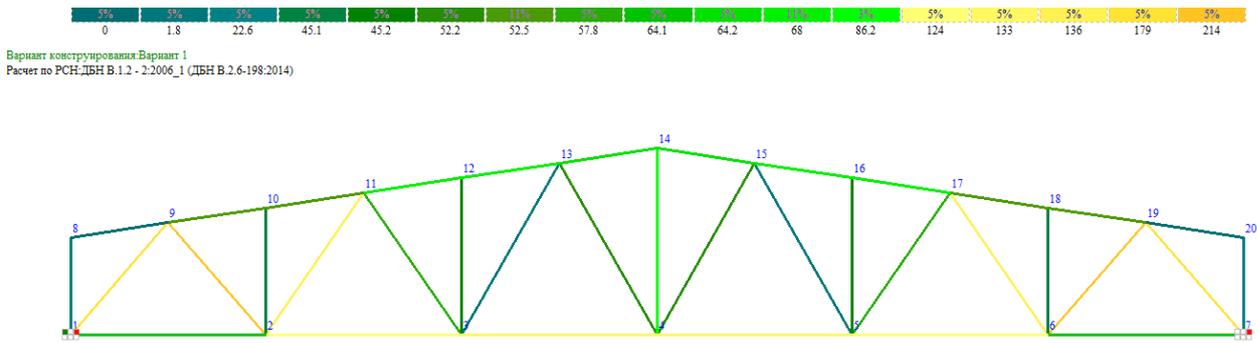


Вариант конструирования: Вариант 1
 Расчет по РСН, ДБН В.1.2 - 2:2006_1 (ДБН В.2.6-198:2014)



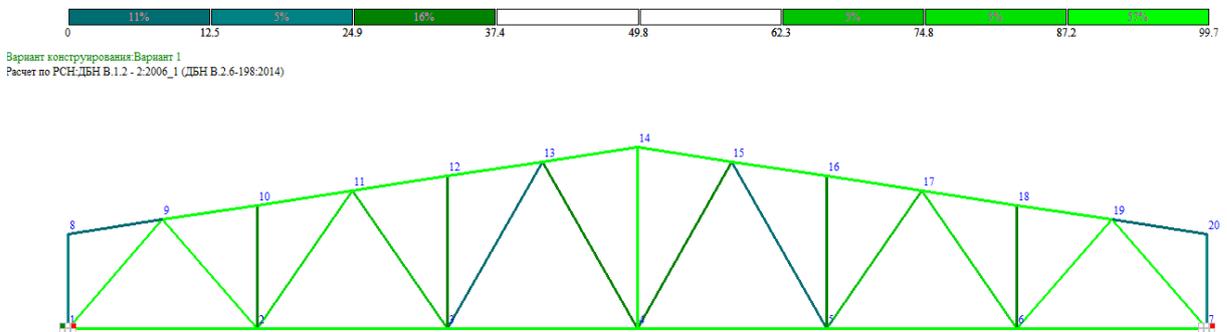
Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 1 предельному состоянию

Рис.6.6 Мозаїка розрахунків за 1ГС з поперечними перерізами стержнів, що прийнято у вихідних даних для Ф-ТБ



Мозаика результатов проверки назначенных сечений по 1 предельному состоянию

Рис.6.10 Мозаїка розрахунків за 1ГС з поперечними перерізами стержнів, що прийнято у вихідних даних для Ф-ЛСТК



Мозаика результатов проверки подобранных сечений по 1 предельному состоянию

Рис.6.11 Мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих стержнів, з підібраними поперечними перерізами (у % несучої здатності) для Ф-ЛСТК

В таблиці 6.2 наведено максимальний відсоток використання перерізу після першого ітераційного статичного розрахунку.

Таблица 6.2 Максимальне використання , (%) перерізу після 1-ї ітерації

Назва конструктивної групи стержнів	Назва моделі ферми			
	Ф-КТ	Ф-ТБ	Ф-КБ	Ф-ЛСТК
	%	%	%	%
Верхній пояс	92,8-99,5	93,8-94,6	91,5-97,7	88-97,5
Нижній пояс	94,5-98,7	98,5-99,7	86,4-96,4	96,5-99,7
Стійки	46,4-98,1	28,2-93,4	26,9-85,1	14,2-99,0
Розкоси	5,3-99,9	1,5-98,1	2,6-98,1	2-98,1

Дані із таблиці 6.2 наведено на рис.6.12-6.15.



Рис.6.12 Мінімальний % використання несучої здатності верхнього поясу



Рис.6.13 Мінімальний % використання несучої здатності нижнього поясу

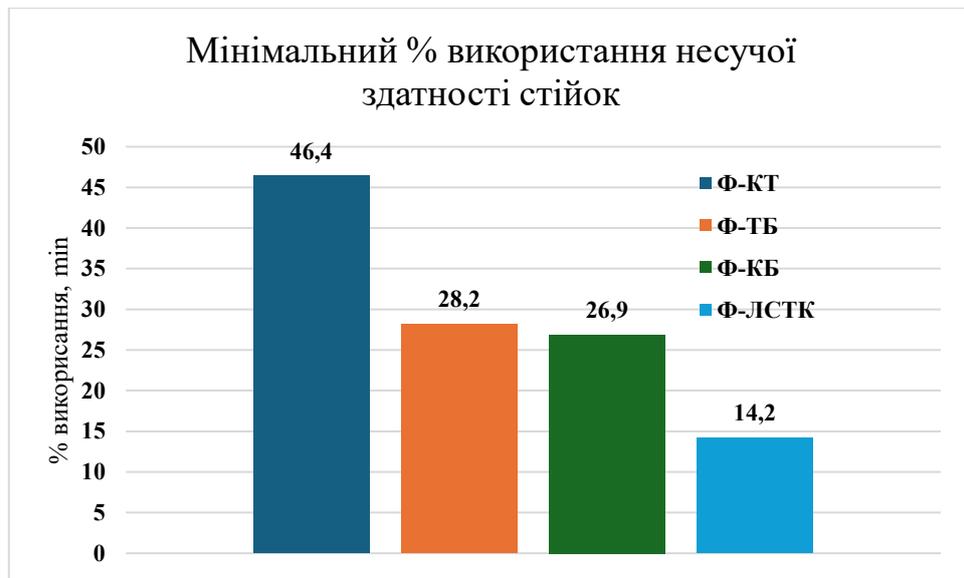


Рис.6.14 Мінімальний % використання несучої здатності стійок



Рис.6.15 Мінімальний % використання несучої здатності розкосів

Із рис.6.12 видно, що після підбору нових перерізів згідно норм [31] несуча здатність верхнього поясу використовується найбільш повно. Відсоток використання становить більше 90%. Лише у моделі Ф-ЛСТК максимальний % використання несучої здатності перерізу становить менше 90%.

Відсоток використання становить більше 90% й для нижнього поясу всіх моделей. Відсоток мінімальний використання перерізів стійок решітки моделей становить від 46,4% (модель Ф-КТ) до 14,% (модель Ф-ЛСТК).

Відсоток мінімальний використання перерізів розкосів решітки ферми моделей становить від 5,3% (модель Ф-КТ) до 2,0% (модель Ф-ЛСТК).

6.2.2 Підбір нових перерізів стержнів моделей ферм в модулі «Метал2

ПК Ліра-САПР 2024

Результати підбору перерізів стержнів моделей ферм в модулі «Метал»
ПК Ліра-САПР 2024 наведено в табл. 6.3 -6.6.

Таблиця 6.3 Підрахунок ваги елементів ферми Ф-КТ

Верхній пояс						
№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п, т	Вага загальна, т
7	2L125x10	2L25x3	2,02363	С235	0,00224	0,004532931
8		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
9		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
10		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
11		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
12		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
13		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
14		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
15		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
16		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
17		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
18		2L25x3	2,02363		0,00224	0,004532931
					Вага верхнього поясу	0,322890403
Нижній пояс						
№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
1	L100x8	L 90x6	4	С235	0,00833	0,03332
2		L 125x9	4		0,0173	0,0692
3		L 125x9	4		0,0173	0,0692
4		L 125x9	4		0,0173	0,0692
5		L 125x9	4		0,0173	0,0692
6		L 90x6	4		0,00833	0,03332
					Вага нижнього поясу	0,34344

Стійки						
№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т

19	2L 90x90x6	2L 20x20x3	2	C235	0,00178	0,00356
20		2L 20x20x3	2,62		0,00178	0,0046636
21		2L 20x20x3	3,23		0,00178	0,0057494
22		2L 35x35x3	3,85		0,0032	0,01232
23		2L 20x20x3	3,23		0,00178	0,0057494
24		2L 20x20x3	2,62		0,00178	0,0046636
25		2L 20x20x3	2		0,00178	0,00356
Вага стійок					0,040266	

Розкоси

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т		
26	L 75x6	L100x8	3,05	C235	0,01225	0,0373625		
27		L90x6	3,05		0,00833	0,0254065		
28		L63x5	3,54		0,00481	0,0170274		
29		L35x4	3,54		0,0021	0,007434		
30		L25x3	4,07		0,00112	0,0045584		
31		L30x4	4,07		0,00178	0,0072446		
32		L30x4	4,07		0,00178	0,0072446		
33		L25x3	4,07		0,00112	0,0045584		
34		L35x4	3,54		0,0021	0,007434		
35		L63x5	3,54		0,00481	0,0170274		
36		L90x6	3,05		0,00833	0,0254065		
37		L100x8	3,05		0,01225	0,0373625		
Вага розкосів					0,1980668			

Загальна вага ферми

0,905

Таблиця 6.4 Підрахунок ваги елементів ферми Ф-ТБ

Верхній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п, т	Вага загальна, т
7	ТБ 273x19	ТБ 42x3	2,02363	C235	0,002883	0,005834125
8		ТБ 114x5	2,02363		0,0134331	0,027183624
9		ТБ 114x5	2,02363		0,0134331	0,027183624
10		ТБ133x5,5	2,02363		0,0172851	0,034978647
11		ТБ133x5,5	2,02363		0,0172851	0,034978647
12		ТБ127x5.5	2,02363		0,0164716	0,033332424
13		ТБ127x5.5	2,02363		0,0164716	0,033332424

14		ТБ133x5,5	2,02363		0,0172851	0,034978647
15		ТБ133x5,5	2,02363		0,0172851	0,034978647
16		ТБ 114x5	2,02363		0,0134331	0,027183624
17		ТБ 114x5	2,02363		0,0134331	0,027183624
18		ТБ 42x3	2,02363		0,002883	0,005834125
Вага верхнього поясу						0,326982183

Нижній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
1	ТБ127x5	ТЕ 83x4	4	С235	0,00778836	0,03115344
2		ТЕ159x4	4		0,01529	0,06116
3		ТЕ 168x4	4		0,01618	0,06472
4		ТЕ 168x4	4		0,01618	0,06472
5		ТЕ159x4	4		0,01529	0,06116
6		ТЕ 83x4	4		0,00778836	0,03115344
Вага нижнього поясу						0,31406688

Стійки

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
19	ТБ178x4	ТБ 42x3	2	С235	0,002883	0,005766
20		ТБ 42x3	2,62		0,002883	0,00755346
21		ТБ 42x3	3,23		0,002883	0,00931209
22		ТБ 42x3,5	3,85		0,00332053	0,012784041
23		ТБ 42x3	3,23		0,002883	0,00931209
24		ТБ 42x3	2,62		0,002883	0,00755346
25		ТБ 42x3	2		0,002883	0,005766
Вага стійок						0,058047141

Розкоси

№ стержня (СЕ)	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т	
26	ТБ219x5	ТЕ108x5	С235	0,0126939	0,038716395	
27		ТЕ102x3		0,00732	0,022326	
28		ТЕ 57x4		0,00518	0,0183372	
29		ТЕ 57x3		0,004	0,01416	
30		ТЕ 57x3		4,07	0,004	0,01628
31		ТЕ 57x3		4,07	0,004	0,01628
32		ТЕ 57x3		4,07	0,004	0,01628
33		ТЕ 57x3		4,07	0,004	0,01628
34		ТЕ 57x3		3,54	0,004	0,01416
35		ТЕ 57x4		3,54	0,00518	0,0183372

36		TE 102x3	3,05		0,00732	0,022326
37		TE108x5	3,05		0,0126939	0,038716395
					Вага розкосів	0,25219919
					Загальна вага ферми	0,951295393

Таблиця 6.5 Підрахунок ваги елементів ферми Ф-КБ

Верхній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п, т	Вага загальна, т
7	□ 160x8	□ 50x2	2,02363	С235	0,003	0,00607089
8		□ 80x6	2,02363		0,014	0,02833082
9		□ 80x6	2,02363		0,014	0,02833082
10		□ 140x4	2,02363		0,017	0,03440171
11		□ 140x4	2,02363		0,017	0,03440171
12		□ 140x4	2,02363		0,017	0,03440171
13		□ 140x4	2,02363		0,017	0,03440171
14		□ 140x4	2,02363		0,017	0,03440171
15		□ 140x4	2,02363		0,017	0,03440171
16		□ 80x6	2,02363		0,014	0,02833082
17		□ 80x6	2,02363		0,014	0,02833082
18		□ 50x2	2,02363		0,003	0,00607089
					Вага верхнього поясу	0,33187532

Нижній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
1	□ 80x6	□ 100x3	4	С235	0,0091	0,0364
2		□ 140x4	4		0,017	0,068
3		□ 140x4	4		0,017	0,068
4		□ 140x4	4		0,017	0,068
5		□ 140x4	4		0,017	0,068
6		□ 100x3	4		0,0091	0,0364
					Вага нижнього поясу	0,3448

Стіжки

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
19	□ 100x6	□ 50x2	2	С235	0,003	0,006

20		□50x2	2,62		0,003	0,00786
21		□50x2	3,23		0,003	0,00969
22		□50x2,5	3,85		0,0036	0,01386
23		□50x2	3,23		0,003	0,00969
24		□50x2	2,62		0,003	0,00786
25		□50x2	2		0,003	0,006
Вага стійок						0,06096

Розкоси

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
26	□60x4	80x5,5	3,05	С235	0,014	0,0427
27		60x4,5	3,05		0,00743	0,0226615
28		50x3,5	3,54		0,00486	0,0172044
29		40x2	3,54		0,00231	0,0081774
30		40x2	4,07		0,00231	0,0094017
31		40x2	4,07		0,00231	0,0094017
32		40x2	4,07		0,00231	0,0094017
33		40x2	4,07		0,00231	0,0094017
34		40x2	3,54		0,00231	0,0081774
35		50x3,5	3,54		0,00486	0,0172044
36		60x4,5	3,05		0,00743	0,0226615
37		80x5,5	3,05		0,014	0,0427
Вага розкосів						0,2190934

Загальна вага ферми

0,95672872

Таблиця 6.6 Підрахунок ваги елементів ферми Ф-ЛСТК

Верхній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п, т	Вага загальна, т
7	[] 160x80x5 Швелери сталеві гнуті рівнополочні (ГОСТ 8278-83)	2Гн[80x50x4	2,02363	С235	0,0113	0,022867019
8		2Гн[120x60x4	2,02363		0,015072	0,01618904
9		2Гн[120x60x4	2,02363		0,015072	0,030500151
10		2Гн[120x60x5	2,02363		0,01884	0,038125189
11		2Гн[120x60x5	2,02363		0,01884	0,038125189
12		2Гн[140x60x4	2,02363		0,016328	0,033041831
13		2Гн[140x60x4	2,02363		0,016328	0,033041831
14		2Гн[120x60x5	2,02363		0,01884	0,038125189
15		2Гн[120x60x5	2,02363		0,01884	0,038125189
16		2Гн[120x60x4	2,02363		0,015072	0,030500151
17		2Гн[120x60x4	2,02363		0,015072	0,030500151
18		2Гн[80x50x4	2,02363		0,0113	0,022867019
					Вага верхнього поясу	0,3720

Нижній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
1	С-подібний профіль С 200x60x3	С350x75x2,5	4	С235	0,009813	0,039252
2		С350x75x2,5	4		0,009813	0,039252
3		С400x60x2,5	4		0,010205	0,04082
4		С400x60x2,5	4		0,010205	0,04082
5		С350x75x2,5	4		0,009813	0,039252
6		С350x75x2,5	4		0,009813	0,039252
					Вага нижнього поясу	0,2386

Стійки

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
19	С-подібний профіль РС 160 x 68 x 1,5	ГнСРС170x68x3	2	С235	0,007205	0,01441
20		ГнСРС170x68x3	2,62		0,007205	0,0188771
21		ГнСРС170x68x3	3,23		0,007205	0,02327215
22		ГнСРС120x68x1,5	3,85		0,003014	0,0116039
23		ГнСРС170x68x3	3,23		0,007205	0,02327215
24		ГнСРС170x68x3	2,62		0,007205	0,0188771
25		ГнСРС170x68x3	2		0,007205	0,01441

Вага
стійок

0,1247

Розкоси

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т		
26	СЕ №26,37: Прямокутна труба 60 х 4 СЕ №27-36: С-подібний профіль РС 140 х 68 х 1.5	Гн []80х5,5	3,05	С235	0,012866	0,0392413		
27		ГнСРС160х68х3	3,05		0,006967	0,02124935		
28		ГнСРС170х68х3	3,54		0,007205	0,0255057		
29		ГнСРС100х68х1,5	3,54		0,002776	0,00982704		
30		ГнСРС100х68х1,5	4,07		0,002776	0,01129832		
31		ГнСРС170х68х3	4,07		0,007205	0,02932435		
32		ГнСРС100х68х1,5	4,07		0,002776	0,01129832		
33		ГнСРС100х68х1,5	4,07		0,002776	0,01129832		
34		ГнСРС100х68х1,5	3,54		0,002776	0,00982704		
35		ГнСРС170х68х3	3,54		0,007205	0,0255057		
36		ГнСРС160х68х3	3,05		0,006967	0,02124935		
37		Гн []80х5,5	3,05		0,012866	0,0392413		
					Вага розкосів	0,2549		
					Загальна вага ферми	0,9902		

РОЗДІЛ 7

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ВАГИ МОДЕЛЕЙ ФЕРМ

Вага ферми складається з ваги основних елементів — стержнів та ваги допоміжних деталей. Головні конструктивні елементи, їхні розміри та вага визначаються діючими зусиллями та уточнюються при розрахунку на міцність. Допоміжні елементи формують конструктивне оформлення ферми й не залежать безпосередньо від силових навантажень. Їхнє основне призначення — забезпечення стійкості головних елементів (наприклад, прокладки між кутиками), з'єднання окремих частин між собою (фасонки), а також компонування опорних вузлів тощо [1].

Вага допоміжних деталей враховується за допомогою будівельного коефіцієнта та може визначатися за формулами, які запропонував Я.М. Ліхтарников [1].

7.1 Вага допоміжних деталей моделей ферм

Вагу допоміжних деталей для ферм приймають пропорційною масі основних стрижневих елементів через будівельний (масовий) коефіцієнт. Тобто спочатку обчислюють масу основних стрижнів ферми, потім множать на коефіцієнт, а різниця дає масу допоміжних деталей.

Вага основних стрижнів (металу в стрижнях):

$$G_{\text{осн}} = \sum (l_i \cdot m_i'),$$

де l_i – довжина i -го стержня (м),

m_i' – вага 1 м цього профілю (кг/м) або $m' = \rho \cdot A$

Прийнятий будівельний коефіцієнт маси K (безрозмірний) — враховує вагу вузлових фасонки, прокладок, болтів, шайб, зварювальних накладок та інших допоміжних деталей.

Загальна вага ферми з урахуванням допоміжних деталей:

$$G = K \cdot G_{\text{осн}},$$

$G_{\text{осн}}$ — вага основних елементів (стержнів ферми, визначена за розрахунковим перерізом);

K — коефіцієнт, що враховує додаткову вагу допоміжних деталей.

Ліхтарніков запропонував орієнтовні значення K :

$$K = 1,05 \div 1,15,$$

в залежності від типу ферми, кількості вузлів і складності з'єднань.

- для простих плоских ферм із мінімальною кількістю з'єднань: $K \approx 1,05$
- для ферм із багатьма вузлами, складними фасонками, накладками та зварними швами : до $K \approx 1,15$

Тоді вага допоміжних деталей:

$$G_{\text{всп}} = G_{\text{общ}} - G_{\text{осн}} = (K - 1) \cdot G_{\text{осн}}.$$

(ця методика та наведені нижче типові значення коефіцієнта — загальноприйняті при проектуванні сталевих ферм; див. джерела.)

Типові значення коефіцієнта K

З практики для сталевих ферм покриттів зустрічаються такі показники:
 $K \approx 1,20$ — при використанні вузлових фасонки і прокладок (пара куточків і фасонки).

$K \approx 1,03 \div 1,05$ — при більш «чистих» безфасонкових/зварених вузлах.

У літературі та збірниках даних наводяться табличні значення залежно від типу вузлів і профілів [1-7].

Коефіцієнт K (за Ліхтарниковим та у будівельній практиці) залежить від типу профілю та конструкції вузлів: наскільки складно/важко вони оформлюються фасонками, накладками, прокладками тощо.

7.2 Орієнтовні значення K

- Ферми з кутників (звичайно з фасонками в вузлах):

$$K \approx 1,15 \div 1,20$$

Часто приймають 1,20 як стандартне.

Для ваги ферми Ф-КТ із кутників ($m_1=0,905$ т):

$$G_{всп} = (1,20 - 1) \cdot 0,905 \approx 0,181 \text{ т.}$$

Для ваги ферми Ф-ТБ та Ф-КБ із круглих та квадратних профілів ($m_2=0,905$ т та $m_3=0,957$ т) - зварні стики, фасонки мінімум::

$$K \approx 1,03 \div 1,05$$

Доречно прийняти для труб та коробчатого перерізу $K=1,05$, тоді:

Для трубчатих ферм Ф-ТБ ($m_3=0,905$ т):

$$G_{всп} = (1,05 - 1) \cdot 0,951 \approx 0,048 \text{ т.}$$

Для Ф-КБ – ферм коробчатого профілю із зварними замкненими перерізами аналогічно трубчастим профілям ($m_3=0,957$ т):

$$G_{всп} = (1,05 - 1) \cdot 0,957 \approx 0,048 \text{ т.}$$

Коефіцієнт K для ЛСТК профілів рекомендовано приймати:

- Для одиночних С-профілів (одиночні профілі в поясах та розкосах):

$$K=1,03 \dots 1,05$$

Як правило приймають $K=1,04$.

- Для спарених 2С профілів (паралельні або склепані або зєднані дві С-полоски як спарений пояс):

$$K=1,06\dots 1,10$$

Як правило приймають $K=1,08$.

ЛСТК — тонкостінні легкі елементи; маса допоміжних деталей (накладки, болти, самонарізи, плечові пластини, стикові накладки, підсилювальні пластини, зв'язки) невелика порівняно з масою масивних профілів, тому базовий коефіцієнт близький до 1,03–1,05.

У спарених рішеннях кількість стиків і накладок зростає (накладки між двома профілями, додаткові самонарізи/болти, шпильки, пластини жорсткості) — отже, K більший.

Якщо вузли виконані винятково самонарізами/без накладок і мінімум накладок, можна застосувати нижню межу інтервалу; якщо вузли з накладками/пластинами/великою кількістю болтів — традиційно брати верхню.

Для Ф-ЛСТК ($m_4=0,990$ т):

- Спарені 2С-елементи: $G_{2C}=0,372$ т, приймаємо $K_{2C}=1,08$
- Одиночні С-елементи: $G_C=0,593$ т, приймаємо $K_C=1,04$
- Гнуті коробчасті елементи: $G_{box}=0,026$ т, приймаємо $K_{box}=1,08$ (як для складених/посилених тонкостінних профілів)

Вага допоміжних деталей для кожного типу профілів в моделі Ф-ЛСТК:

- Для спарених 2С:

$$G_{всп,2C} = (1,08 - 1) \times 0,372 = 0,08 \times 0,372 = 0,02976 \text{ т.}$$

-Для одиночних С:

$$G_{всп,C} = (1,04 - 1) \times 0,593 = 0,04 \times 0,593 = 0,02372 \text{ т.}$$

-Для коробчатих ЛСТК-профілів:

$$G_{всп,box} = (1,08 - 1) \times 0,026 = 0,08 \times 0,026 = 0,00208 \text{ т.}$$

Сумарна вага допоміжних деталей:

$$G_{всп.заг} = 0,02976 + 0,02372 + 0,00208 = 0,05556 \text{ т.}$$

7.3 Повна загальна вага моделей ферм з урахуванням допоміжних елементів

Обчислимо повну загальну вагу моделей ферм з урахуванням допоміжних елементів.

1. Ферма з кутників Ф-КТ

Вага основних стержнів: $G_{осн}=0,905 \text{ т}$

Коефіцієнт $K=1,20$

Вага допоміжних деталей: $G_{всп} = (1,20 - 1) \cdot 0,905 = 0,181 \text{ т}$

Загальна (повна) вага: $G_{повн} = 1,20 \cdot 0,905 = 1,086 \text{ т}$

2. Ферма з труб Ф-ТБ

Вага основних стержнів: $G_{осн}=0,951 \text{ т}$

Коефіцієнт $K=1,05$

Вага допоміжних деталей: $G_{всп} = (1,05 - 1) \cdot 0,951 = 0,048 \text{ т}$

Загальна (повна) вага: $G_{повн} = 1,05 \cdot 0,951 = 0,999 \text{ т}$

3. Ферма з коробчатого профілю Ф-КБ

Вага основних стержнів: $G_{осн}=0,957 \text{ т}$

Коефіцієнт $K=1,05$

Вага допоміжних деталей: $G_{всп} = (1,05 - 1) \cdot 0,957 = 0,048 \text{ т}$

Загальна (повна) вага: $G_{повн} = 1,05 \cdot 0,957 = 1,005 \text{ т}$

4. Ферма з ЛСТК-профілів Ф-ЛСТК

4.1 Для спарених 2С:

Вага основних стержнів: $G_{2С}=0,372 \text{ т}$

Коефіцієнт $K=1,08$

Вага допоміжних деталей

$G_{всп,2С} = (1,08 - 1) \times 0,372 = 0,08 \times 0,372 = 0,02976 \text{ т.}$

Загальна (повна) вага: $1,08 \cdot 0,372 = 0,402 \text{ т}$

4.2 Для одиночних С:

Вага основних стержнів: $G_C=0,593 \text{ т}$

Коефіцієнт $K_C=1,04$

Вага допоміжних деталей

$$G_{\text{всп,с}} = (1,04 - 1) \times 0,593 = 0,04 \times 0,593 = 0,02372 \text{ т.}$$

Загальна (повна) вага: $1,04 \cdot 0,593 = 0,617 \text{ т}$

4.3 Для коробчатих ЛСТК-профілів:

Вага основних стержнів: $G_{\text{box}} = 0,026 \text{ т}$

Коефіцієнт $K_{\text{box}} = 1,08$

Вага допоміжних деталей:

$$G_{\text{всп,box}} = (1,08 - 1) \times 0,026 = 0,08 \times 0,026 = 0,00208 \text{ т.}$$

Загальна (повна) вага: $1,08 \cdot 0,026 = 0,028 \text{ т}$

Загальна вага основних елементів Ф-ЛСТК: $0,372 + 0,593 + 0,026 = 0,990 \text{ т}$

Сумарна вага допоміжних елементів ферми Ф-ЛСТК:

$$G_{\text{всп,заг}} = 0,02976 + 0,02372 + 0,00208 = 0,05556 \text{ т.}$$

Повна вага ферми Ф-ЛСТК:

$$G_{\text{повн}} = G_{\text{осн}} + G_{\text{всп,заг}} = 0,990 + 0,05556 = 1,046 \text{ т.}$$

Таблиця 7.1 Підрахунок загальної ваги моделей ферм

Тип ферми	Вага стержнів, т	К	Вага допоміжних деталей, т	Повна вага ферми, т
Ф-КТ (з кутників)	0,905	1,20	0,181	1,086
Ф-ТБ (з труб)	0,951	1,05	0,048	0,999
Ф-КБ (з коробчатого профілю)	0,957	1,05	0,048	1,005
Ф-ЛСТК (з ЛСТК-профілів)	0,990	1,04; 1,08	0,0556	1,046

На рис. 7.1 наведено вагу основних елементів моделей ферм.

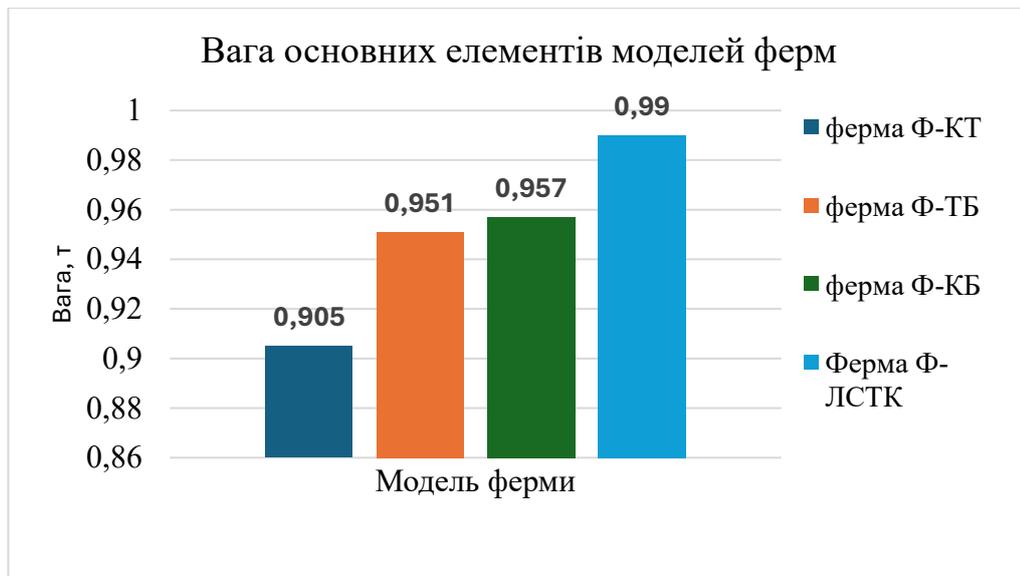


Рис. 7.1 Вага основних стержньових елементів моделей ферм

Отже, з рис. 7.1 можна зробити висновок, що найменша вага стержнів буде у моделі ферми із кутників Ф-КТ. Але, фактично вага моделей ферм відрізняється одна від одної на зовсім не значну величину. Найбільша вага ферми буде мати модель Ф-ЛСТК – із легких сталевих гнутих елементів.

Різниця у вазі між Ф-КТ та Ф-ЛСТК становить 9,4%. Вага моделей із трубчатого профілю та коробчатого профілю фактично між собою не відрізняються.

На рис.7.2 наведено графічну ілюстрацію, що відображає вагу допоміжних деталей моделей ферм.

Так, із рис. 7.2 видно, що вага допоміжних деталей є найбільшою для моделі із гарячекатаних кутників. І найменшою вага допоміжних деталей буде для моделей ферм із труб та коробів (Ф-ТБ та Ф-КБ).

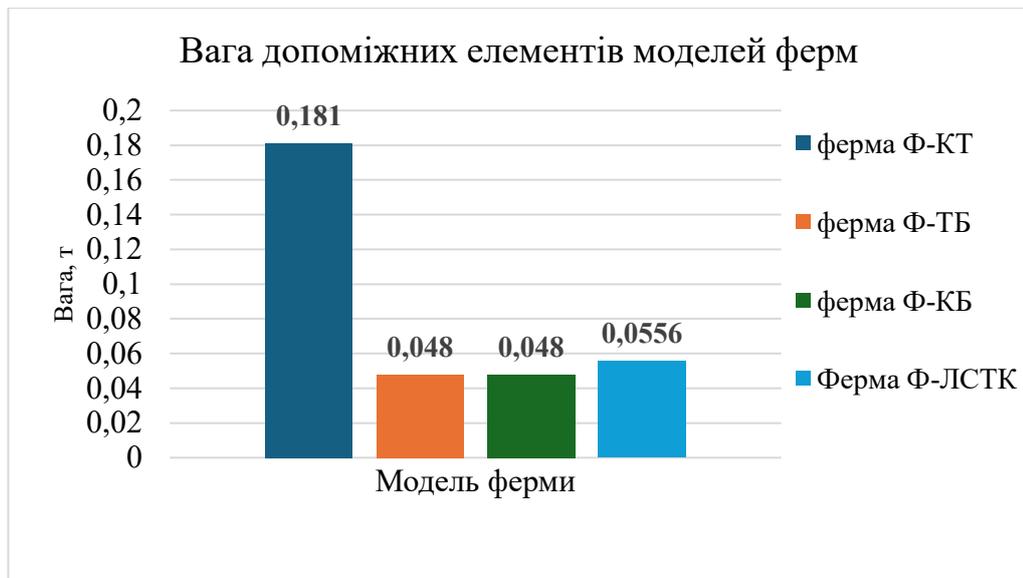


Рис.7.2 Вага допоміжних деталей моделей ферм

На рис. 7.3 наведено сумарну вагу основних стержньових елементів та допоміжних деталей для моделей ферм, що досліджуються.



Рис. 7.3 Зміна загальної ваги моделей ферм в залежності від типу перерізу

Із рис. 7.3 видно, що підсумувавши вагу основних стержнів та вагу деталей отримали такі результати. Модель з найбільшою вагою є модель Ф-КТ- модель ферми із гарячекатаних кутників. Другою за загальною вагою є модель із ЛСТК-профілів. І майже однакову вагу мають моделі із труб та із коробчастого перерізу (Ф-ТБ, Ф-КБ).

Різниця у вазі між Ф-КТ та Ф-ЛСТК становить 3,8%. Для ферм Ф-ТБ та Ф-КТ така різниця майже відсутня.

РОЗДІЛ 8.

ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ КОНСТРУКЦІЇ

Вирішення зазначеного питання супроводжується певним рівнем наближеності, оскільки вартість чорних металів суттєво залежить від ринкових коливань. При визначенні актуальних цін на металопрокат зафіксовано відмінності у вартості серед різних постачальників, а також варіації цін залежно від калібру перерізів. Водночас, з огляду на те, що основною метою дослідження є встановлення загальних закономірностей, застосування усереднених показників вартості металопрокату видається цілком доцільним [10]. Слід уточнити, що в межах даної роботи враховується виключно вартість металопрокату, яка приймається як еквівалент вартості ферми. Відповідно до відкритих даних компанії «А ГРУПП» визначено ціни на металопрокат (див. табл. 3). Підсумкові результати розрахунків вартості ферм наведено у таблиці 4.

Нижче наведено опис можливої вартості профілів різних типів, що отримані з різних джерел.

Профілі типу кутник

Для виготовлення сталевих ферм широко застосовуються гарячекатані сталеві кутники різних розмірів та товщин.

Згідно з інформацією компанії Metinvest-SMC [13,14], в асортименті представлені кутники типових розмірів — $20 \times 20 \times 3$, $25 \times 25 \times 3$, $30 \times 30 \times 3$ зі сталі марок ст1-3пс/сп. Орієнтовна вартість такої продукції становить близько 33 000 – 35 000 грн за тонну (для окремих позицій — $\approx 35\,040$ грн/т).

У каталозі компанії КТ-Стал наводяться дані щодо кутника $20 \times 20 \times 4$, вартість якого складає близько 43 000 – 44 000 грн за тонну (зокрема, 43 490 грн/т).

Трубчасті профілі

Для виготовлення елементів сталевих ферм часто застосовуються круглі та профільні труби різних діаметрів і товщин стінки.

За даними металотрейдерів та відкритих цінових каталогів [8,9,10]:

- Тонкостінні круглі труби діаметром 20–40 мм із товщиною стінки 2–3 мм оцінюються в середньому у 38 000 – 42 000 грн за тонну.
- Профільні труби прямокутного або квадратного перерізу розміром 40×40×2 мм або 60×40×3 мм коштують орієнтовно 40 000 – 45 000 грн за тонну.
- Труби більшого перерізу, наприклад 100×100×4 мм, можуть досягати вартості 47 000 – 50 000 грн за тонну.

Таким чином, середній діапазон вартості трубчастого прокату для конструкцій ферм становить \approx 38 000 – 50 000 грн/т, залежно від розміру та товщини.

Коробчаті профілі

Коробчасті (замкнуті) профілі виконуються на основі гарячекатаного або холодногнутого прокату й застосовуються в конструкціях, що потребують підвищеної жорсткості.

Згідно з інформацією постачальників [15,16]:

- Замкнуті профілі типу 80×80×3 мм коштують близько 44 000 – 46 000 грн за тонну.
- Вироби середнього калібру, наприклад 100×60×4 мм, мають вартість у межах 46 000 – 49 000 грн за тонну.
- Профілі великого перерізу, зокрема 120×120×5 мм, реалізуються за ціною 50 000 – 55 000 грн за тонну.

У середньому вартість коробчатих профілів коливається в межах \approx 44 000 – 55 000 грн за тонну, що робить їх дещо дорожчими за труби й кутники, однак вони забезпечують вищу несучу здатність.

ЛСТК-профілі

Для виготовлення конструкцій із ЛСТК використовуються оцинковані сталеві листи різної товщини та марок.

Згідно з інформацією від компанії Metinvest-SMC [11,12], застосовуються оцинковані листи марки DX51D товщиною від 0,4 до 0,7 мм. Вартість такої сталі становить приблизно 46 500 – 50 560 грн за тонну.

Постачальник УТМК пропонує тонколистовий оцинкований метал марки 08пс DX51, виготовлений за стандартом ГОСТ 14918, товщиною 0,65 мм. Ціна становить близько 46 500 грн за тонну.

Крім того, у металотрейдерів («Рулони металу оцинковані / сталь в рулонах») представлена тонколиста оцинкована сталь товщиною від 0,4 до 2 мм марок DX51D та 08ПС. Вона може постачатися як без полімерного покриття, так і з ним. Діапазон вартості такого матеріалу коливається від 55 000 до 73 000 грн за тонну, залежно від характеристик.

Усереднені показники вартості 1м.п профілю різного типу згідно із даних відкритих джерел [8-16] наведено в таблиці 8.1. В цій же таблиці підрахована вартість кожної моделі крокв'яної ферми, що досліджується.

Таблиця 8.1 Показники ваги та вартості різних конструкцій ферм

Марка ферми	Вага ферми, т	Вага 1т металу, грн	Вартість матеріалу ферми, грн
Ф-КТ	1,086	45000	48870
Ф-ТБ	0,999	40000	39960
Ф-КБ	1,005	45000	45225
Ф-ЛСТК	1,046	60000	62760

На рис. 8.1 наведено графічне зображення зміну вартості ферми в залежності від типу перерізу.

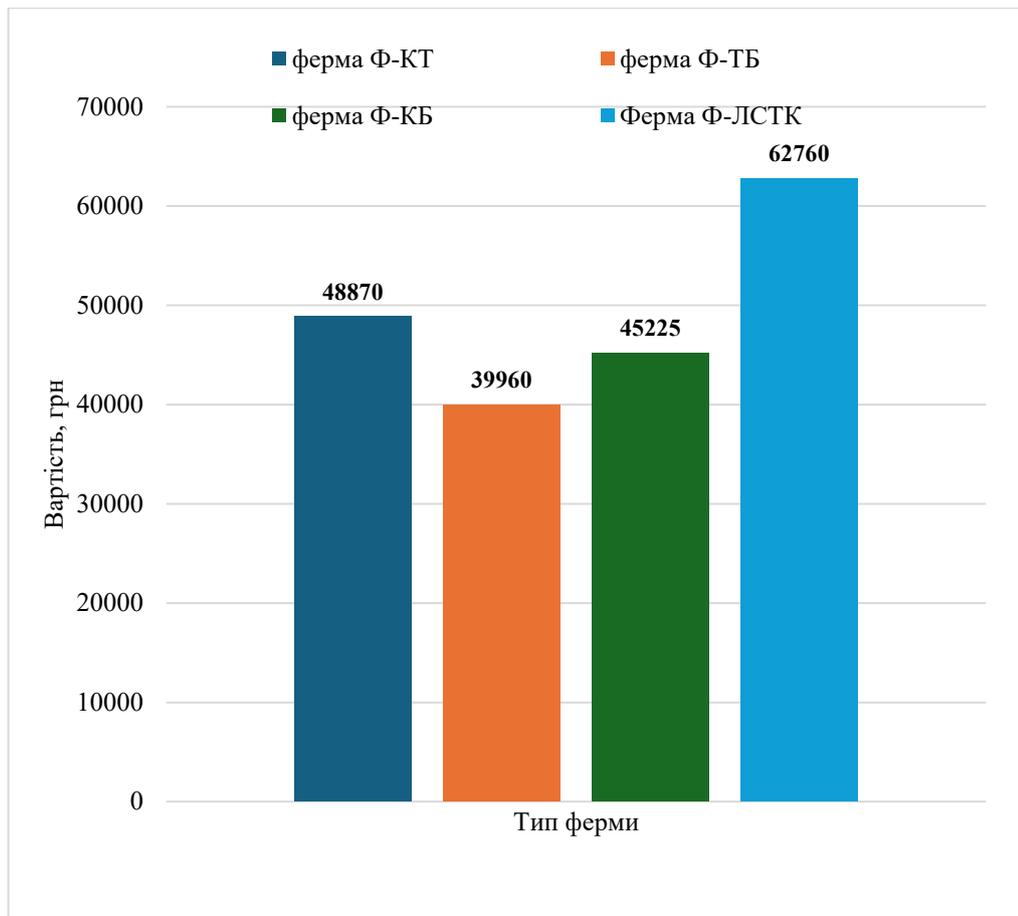


Рис.8.1 Зміна вартості ферми в залежності від типу перерізу

РОЗДІЛ 9.

ВИСНОВКИ

1) Ферма Ф-КТ (ферма з кутників)

- Має найбільшу вагу (1,086 т).
- Загальна вартість матеріалу – 48 870 грн, що є другою за величиною.
- Порівняно висока металоємність робить її менш економічною при великих об'ємах будівництва.

2) Ферма Ф-ТБ (ферма з труби)

- Найменша вага серед моделей (0,999 т).
- Має найнижчу собівартість – 39 960 грн, що робить цей варіант найбільш економічно вигідним.
- Оптимальне співвідношення "міцність – вага – вартість".

3) Ферма Ф-КБ (ферма із профілів сталевих гнутих замкнутих зварних квадратних)

- Вага близька до трубної (1,005 т).
- Вартість – 45 225 грн, що більше ніж у трубної, але менше ніж у кутникової та ЛСТК.
- Є компромісним варіантом між простотою виготовлення та економічністю.

4) Ферма Ф-ЛСТК (ферма з легких сталевих тонкостінних конструкцій)

- Вага невелика (1,046 т), але завдяки високій ціні за тону металу загальна вартість сягає 62 760 грн.
- Це найдорожчий варіант, який доцільний при потребі зменшення ваги та швидкого монтажу, але економічно найменш вигідний.

Отже, за критеріями економічності та ефективності використання металу найкращі результати показала ферма з трубчастого профілю (Ф-ТБ) – вона має найменшу вагу та найнижчу вартість. Ферми з кутників (Ф-КТ) та квадратного профілю (Ф-КБ) займають проміжне положення, причому кутникова конструкція більш металоємна. Ферми з ЛСТК (Ф-ЛСТК), незважаючи на знижену вагу, є економічно не вигідними через високу ціну тонкого сталевого профілю.

Література

1. U.S. Department of Transportation, Research and Innovative Technology Administration. Full-Scale Wall of Wind Testing of Variable Message Signs / A. G. Chowdhury et al. — 2015. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/36970/dot_36970_DS1.pdf
2. American Institute of Steel Construction (AISC). Guidelines for Steel Truss Bridge Analysis — G13.2-2024 / American Institute of Steel Construction. — 2024. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.aisc.org/globalassets/nsba/aashto-nsba-collab-docs/g13.2-2024-guidelines-for-steel-truss-bridge-analysis.pdf>
3. American Institute of Steel Construction (AISC). ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings / AISC. — Chicago, IL : AISC, 2016. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16w-rev-june-2019.pdf>
4. Boltcouncil (The International Institute for Steel Construction and Fastening). Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints (2nd Edition) / G.L. Kulak et al. — 2001. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.boltcouncil.org/files/2ndEditionGuide.pdf>
5. Steel Construction Institute (SCI). Simple Joints to Eurocode 3 (P358) / Steel Construction Institute. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.steelconstruction.info/images/a/a9/SCI_P358.pdf
6. Handbook of Structural Steel Connection Design and Details / (підручник). — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://moys.gov.iq/upload/common/Handbook_of_Structural_Steel_Connection_Design_and_Details%2C_Third_Edition.pdf

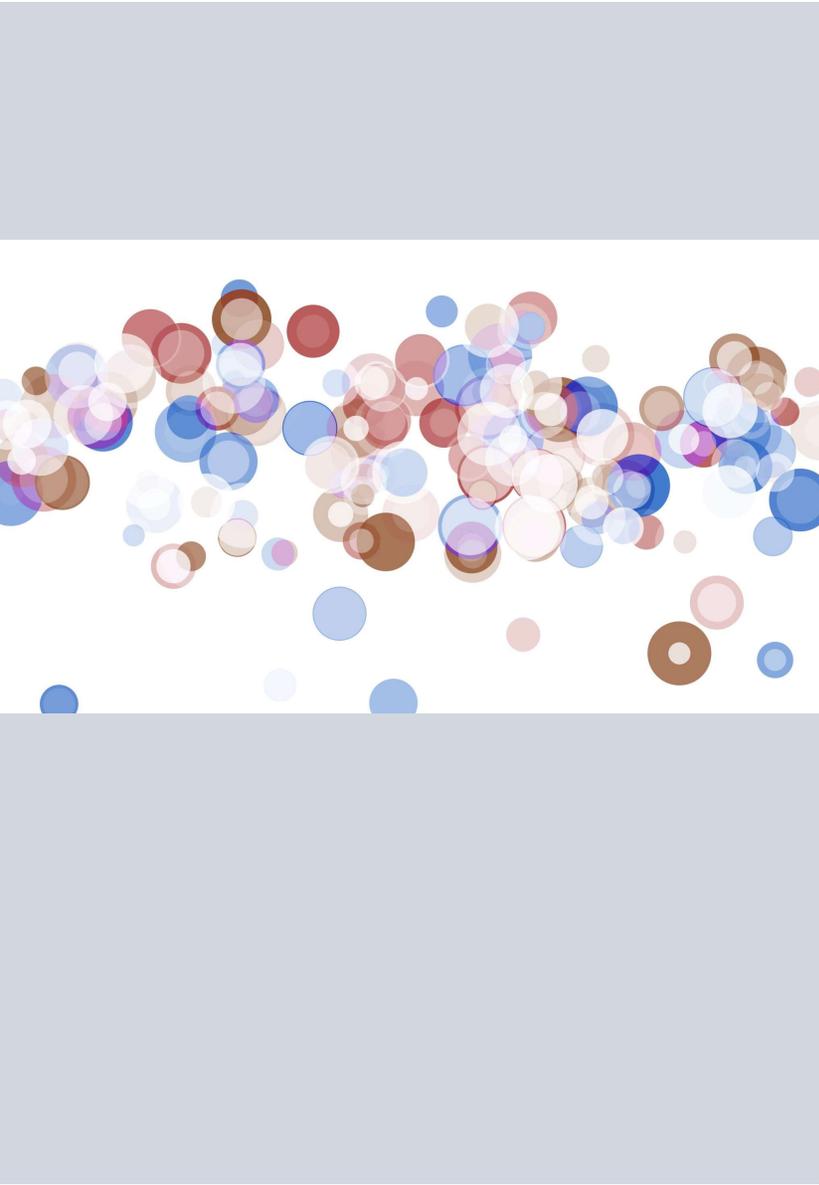
7. SteelConstruction.info. Simple connections / Steel Construction Institute.
— [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
https://www.steelconstruction.info/Simple_connections
8. **Metinvest-SMC**. Труба профільна 25×25×1,8 мм, ст1-3пс/сп — 38 050,00 грн/т (48,20 грн/м.п.) [електронний ресурс]. — Режим доступу: metinvest-smc.com/ua/products/truba-profilnaya/ Metinvest
9. **КТ-Сталь**. Труба профільна 140×140×3 г/к — середня ціна 49 250 грн/т; труба 150×100×4 г/к — 47 340 грн/т. [електронний ресурс]. — Режим доступу: kt-stal.com.ua/catalog/truba-kruglaya-vgr-2/pryamougolnue-profilnue-trubu КТ-СТАЛЬ
10. **ProfMetall (Київ)**. Ціни на профільні труби 40×20 з різними товщинами (1,2; 1,5; 2 мм) та їх вартість за тону з ПДВ. [електронний ресурс]. — Режим доступу: profmetall.kiev.ua/uk/metalloprokat/truba/profilnaya-truba/truba-profilnaja-40-20mm/
11. **Metinvest-SMC**. Лист оцинкований 0,7 × 1250 × 2500, марка DX51D — 46 585 грн/т [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/product/list-otsinkovannyy-15kh1250kh2500-zn140-dx51d>.
12. **Metinvest-SMC**. Лист оцинкований 0,5 × 1250 × 2500, марка DX51D — 49 070 грн/т [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/product/list-otsinkovannyy-05kh1250kh2500-zn140-dx51d>.
13. **Metinvest-SMC**. Кутник 30×30×3, ст1-3пс/сп — приблизно 34 690 грн/т (в каталозі компанії) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/products/ugolok>.
14. **Metinvest-SMC**. Кутники в асортименті (ціни від 30 до 70 грн/кг, що відповідає 30 000 – 70 000 грн/т) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/lviv/products/ugolok>.

- 15 EvrazTrade. Швелер – металевий виріб коробчатого (П-подібного) перерізу – реалізується в Україні (ціни за метр або тонну) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: evraztrade.com/ua/catalog/chernyj-prokat/shveler ЕВРАЗТРЕЙД
- 16 UkrStarline. Сталевий С-профіль (профіль із відкритим перерізом) в Україні — приклади цін 58 грн/кг (що еквівалентно 58 000 грн/т) для профілю 70×50×... мм
- 17 Kaveh A., Talatahari S. A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2009. – Vol. 65 (8–9). – P. 1558–1568. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.021
- 18 Kaveh A., Kalatjari V. Optimal design of steel truss structures using hybrid genetic algorithm // *Advances in Engineering Software*. – 2003. – Vol. 34 (7). – P. 401–413. DOI: 10.1016/S0965-9978(03)00031-4
- 19 Camp C. V., Bichon B. J., Stovall S. P. Design of steel frames using ant colony optimization // *Journal of Structural Engineering*. – 2005. – Vol. 131 (3). – P. 369–379. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(369)
- 20 Saka M. P., Hasançebi O. Discrete optimization of steel frames using improved harmony search algorithm // *Computers & Structures*. – 2010. – Vol. 88 (19–20). – P. 1922–1933. DOI: 10.1016/j.compstruc.2010.06.007
- 21 Hassanein M. F., Kharoob O. Optimized design of gusset plate connections in steel trusses // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 75. – P. 501–515. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.06.003
- 22 Liu M., Burns S. A. Performance-based optimization of truss structures with fatigue and fabrication constraints // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2012. – Vol. 46. – P. 341–352. DOI: 10.1007/s00158-012-0764-1

- 23 Kaveh A., Hosseini P. Layout and size optimization of truss structures using hybrid GA and particle swarm optimization // *Applied Soft Computing*. – 2010. – Vol. 10 (2). – P. 747–755. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.09.010
- 24 Gholizadeh S. Optimal design of structures with stability constraints using metaheuristic algorithms: A review // *Advances in Engineering Software*. – 2017. – Vol. 110. – P. 1–16. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.03.002
- 25 Kaveh A., Zolghadr A. A comparative study of metaheuristic algorithms for optimal design of truss structures with frequency constraints // *Advances in Engineering Software*. – 2016. – Vol. 98. – P. 163–181. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.04.005
- 26 Bekdaş G., Nigdeli S. M., Geem Z. W. Structural optimization using harmony search: A review // *Structures*. – 2015. – Vol. 3. – P. 131–151. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.05.002
- 27 CET Journal. — Центр / *CET – Civil Engineering and Traffic Journal*. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.cetjournal.it/>
- 28 Degertekin S. O., Lamberti L. Sizing Optimization of Truss Structures Using the Firefly Algorithm // *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. – 2013. – DOI: 10.4203/ccp.102.229.
- 29 ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. — 120 с.
- 30 Єврокоди. Проектування сталевих конструкцій : EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3. — Брюссель : CEN, 2005. — 120 с.
- 31 ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2007. — 75 с.

- 32 EN 1990: Eurocode – Basis of structural design. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>
- 33 ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова з визначення прогинів і переміщень будівельних конструкцій. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. – 48 с.

ДОДАТКИ



Сумський НАУ
Кафедра будівельних конструкцій

**ОПТИМІЗАЦІЯ
КОНСТРУКТИВНОГО
ВИРІШЕННЯ СТАЛЕВОЇ
КРОКВ'ЯНОЇ ФЕРМИ ЗА
КРИТЕРІЄМ
МАТЕРІАЛОЄМНОСТІ**

Студент: Лозко В.Г.
Група БУД 2401-1м , курс 2м

Керівник: д.т.н., професор Роговий С.І.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ

- Лозко В.Г., Роговий С.І. РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ПРИКЛАДІ КРОКВ'ЯНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ // Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (листопад 2025 р) – Суми, 2025. с.
- Лозко В.Г., Роговий С.І. РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ФЕРМ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА // Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (листопад 2025 р) – Суми, 2025. с.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

- **Оптимізація** розглядається як процес досягнення найсприятливішого поєднання характеристик об'єкта або процесу. Завдання оптимізації формулюється шляхом визначення критерію оптимальності та сукупності варійованих параметрів, зміна яких впливає на ефективність функціонування системи загалом.
- Оптимізація крокв'яних сталевих ферм останніми роками розвивається в двох взаємопов'язаних напрямках:
 - 1) пошук економічно і конструктивно ефективних розмірів і конфігурацій (sizing/shape/topology optimization) з метою мінімізації маси й вартості при дотриманні нормативних обмежень;
 - 2) підвищення якості моделювання реальних деталей конструкції (вузли, фасонки, болтові та зварні з'єднання) для точнішої оцінки їхнього впливу на несучу здатність і динамічні характеристики

Можна сформулювати узагальнені висновки, наведені в таблиці 1.

Таблиця 2.1 Алгоритм оптимізації сталевих крокв'яних ферм

Етап	Зміст дій	Інструменти/Методи
1	Формулювання критерію оптимізації (маса, вартість, жорсткість, екологічні показники, багатокритеріальна оптимізація)	Критерії Парето, економічні показники
2	Визначення варійованих параметрів конструкції	Типи перерізів (кутники, труби, коробки, ЛСТК), геометрія, топологія
3	Вибір ключових параметрів для оптимізації	Профіль елементів, довжина панелей, тип вузлів
4	Збір навантажень і постановка розрахункової моделі	Норми навантажень (єврокоди, AISC), регіональні умови
5	Розрахунок за граничними станами	Перша та друга групи граничних станів
6	Оптимізаційний пошук рішення	Генетичні алгоритми, диференціальна еволюція, PSO, Harmony Search
7	Оцінка техніко-економічних показників	Вага, вартість матеріалу й монтажу, ресурсозбереження
8	Порівняння альтернатив і вибір оптимального рішення	Багатокритеріальний аналіз, аналіз чутливості
9	Формування висновків і рекомендацій	Звітність, графічні ілюстрації, креслення

В даній роботі оцінювання ефективності варіанту конструктивного вирішення ферми буде здійснюватися за проміжним параметром – *вагою ферми*, та кінцевим параметром – *вартістю моделі ферми*

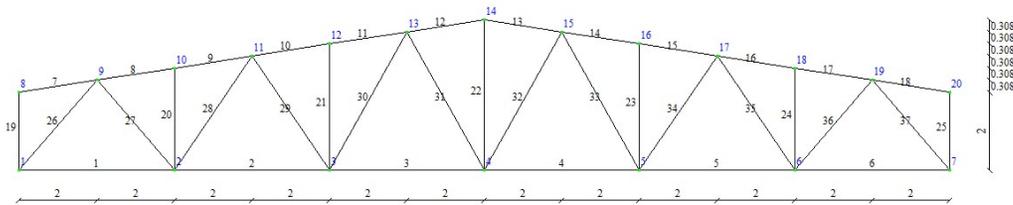
МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

- **Аналітичний метод** – для попереднього визначення впливу форми поперечного перерізу на масу елементів ферми. Використання класичних розрахункових співвідношень дозволяє встановити залежності між геометричними характеристиками профілю та його несучою здатністю.
- **Метод числового моделювання (метод скінченних елементів, МСЕ)** – для перевірки напружено-деформованого стану та прогинів у фермі при різних варіантах профілів. Це дозволяє об'єктивно оцінити працездатність моделі за 1-ю та 2-ю групами граничних станів.
- **Метод техніко-економічного аналізу** – для переходу від проміжного параметра (вага) до кінцевого критерію (вартість). На цьому етапі здійснюється перерахунок вартості з урахуванням маси сталі, коефіцієнтів на монтаж та виготовлення, а також можливих додаткових витрат на вузли й з'єднання.
- **Метод багатокритеріальної оптимізації** – для узгодження двох ключових параметрів (мінімальної ваги та мінімальної вартості). Використання методів Парето дає можливість отримати множину ефективних рішень і надати рекомендації щодо вибору найбільш раціонального профілю залежно від заданих пріоритетів.
- **Методика розрахунку за сполученням навантажень** полягає у врахуванні одночасної дії різних видів навантажень, що можуть впливати на конструкцію в реальних умовах експлуатації.

- **Метою роботи** є визначення матеріалоємності плоскої крокв'яної ферми в залежності від критерієм матеріалоємності та вартості матеріалу (сталі).
- **Задачі**, що слід сформулювати для досягнення мети:
 - вивчення та аналіз джерел щодо методології призначення перерізів різних типів для елементів крокв'яних ферм;
 - призначення параметрів що змінюються. Такими параметрами виступають різні можливі форми поперечного перерізу для конструктивних груп стержнів плоскої ферми- переріз із гарячекатаних кутників, із труби круглої, із профілів сталевих гнутих замкнутих зварних квадратних для будівельних конструкцій, профілів ЛСТК.
 - оцінити деформований стан різних моделей ферм;
 - підібрати в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР нові перерізи згідно із умовами розрахунку стержнів за 1-ю та 2-ю групам граничних станів;
 - обчислити вагу моделей ферми з новими перерізами
 - згідно ваги та типу прийнятого профілю для моделі, обчислити вартість моделей, що досліджуються;
 - сформулювати висновки

- **Об'єкт дослідження** – моделі плоскої статично визначуваної сталеві кров'яної ферми прольотом 24,0 м та висотою 3,85 м, що відрізняються лише профілем поперечного перерізу.
- **Предмет дослідження** – деформований стан, матеріалоємність (вага) моделей, що досліджуються та вартість цих моделей.
- **Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що за допомогою них можливо оцінити: як і наскільки впливає форма перерізу конструктивних груп стержнів на деформований стан ферми та її матеріалоємність, а значить і вагу, й, в кінцевому результаті – на вартість моделі.

МОДЕЛІ КРОКВ'ЯНИХ ФЕРМ, ЩО ПРИЙНЯТО ДО РОЗРАХУНКУ



Скінченоелементна схема ферми прольотом 24,0 м

Як змінний критерій для визначення ефективного конструктивного вирішення плоскої сталеві ферми приймемо такі профілі для стержнів конструкції :

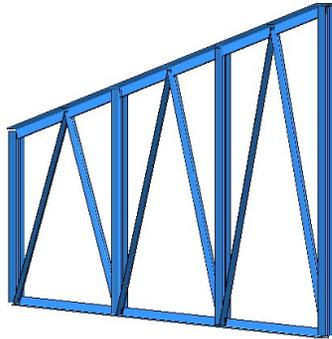
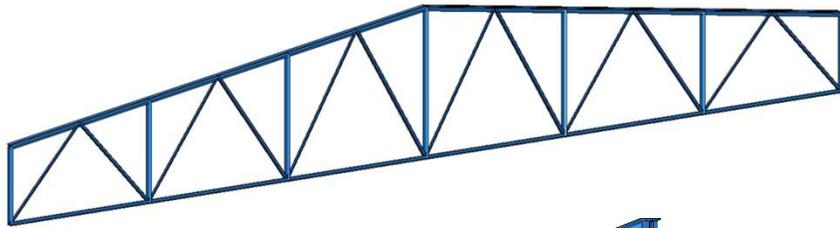
- 1) ферма з кутників,
- 2) ферма із трубчатих елементів,
- 3) ферма із гнутих замкнених зварних квадратних профілів,
- 4) ферма із ЛСТК профілів.

До розрахунку прийнято плоску симетричну ферму з похилими поясами. Проліт (L) ферми становить 24,0 м. Висота ферми в коньку (H , підйом) становить 3,0 м й вимірюється в середині панелі. Висота крайніх стійок решітки ферми становить 2,0 м. Кількість панелей дорівнює 6. Довжина панелі становить 4,0 м.

Ферму змодельовано в площині XOZ в ПК Ліра-САПР. Скінченоелементна модель має ознаку системи №2.

Для лівої опори ферми передбачено заборону переміщення вузла вздовж осей X та Z (рис.5.2) Для правого опорного вузла ферми заборонено переміщення вузла тільки по вертикалі – вздовж осі Z . Вздовж осі X переміщення вузла дозволено.

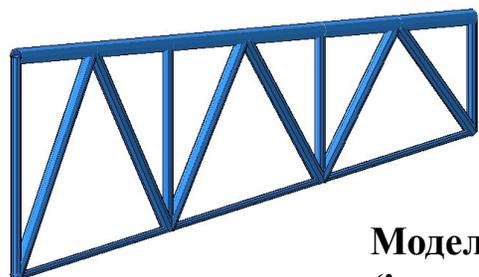
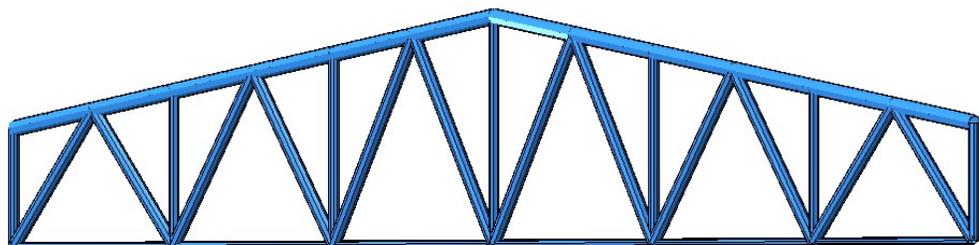
**Модель Ф-КТ
(з кутників)**



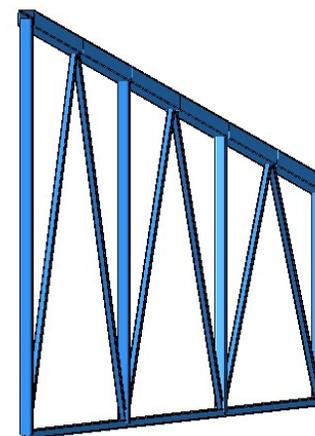
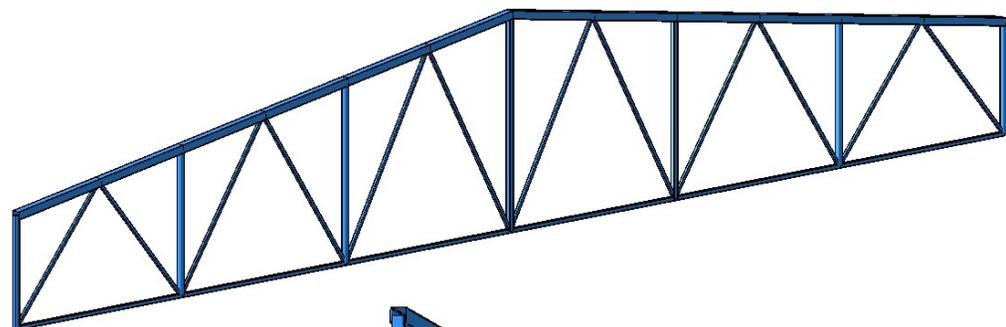
№ профілю за порядком	Назва профілю	Форма профілю
1	Кутники сталеві гарячекатані рівнополочні (ДСТУ 2251:2018).	
2	Труби сталеві зварні для будівельних конструкцій (ГОСТ Р 58064-2018)	
3	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні для будівельних конструкцій (ГОСТ 30245-94)	
4	Профіль С-подібний «PRUSZYNSKI» (ДСТУ Б В.2.6-75:2008) Профіль С-подібний «Akfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	

**Таблиця. Профілі
для стержнів
ферми, що
прийнято до
розрахунку**

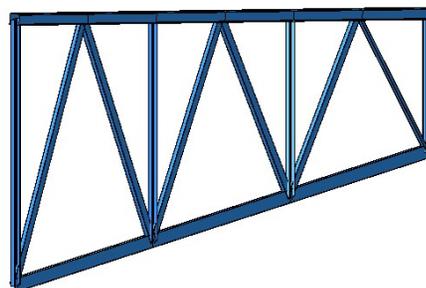
Модель Ф-ТБ
(з труби)



Модель Ф-КБ
(із профілів сталевих гнутих замкнутих зварних квадратних)



Модель Ф-ЛСТК
(із профілів легких сталевих гнутих)



Параметри жорсткості для моделі Ф-КТ

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	E, т/м ²	ϑ	R, т/м ³
1	Верхній пояс	2L125x10	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	L100x8	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	2L90 x 90 x 6	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	L75x6	2.10062e+007	0,3	7,85

Параметри жорсткості для моделі Ф-КБ

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	E, т/м ²	ϑ	R, т/м ³
1	Верхній пояс	□160 x 8	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	□80 x 6	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	□100 x 6	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	□60 x 4	2.10062e+007	0,3	7,85

Параметри жорсткості для моделі Ф-ТБ

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	E, т/м ²	ϑ	R, т/м ³
1	Верхній пояс	O273 x 19	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	O127 x 5	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	O178 x 4	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	O219.0 x 5.0	2.10062e+007	0,3	7,85

Параметри жорсткості для моделі Ф-ЛСТК

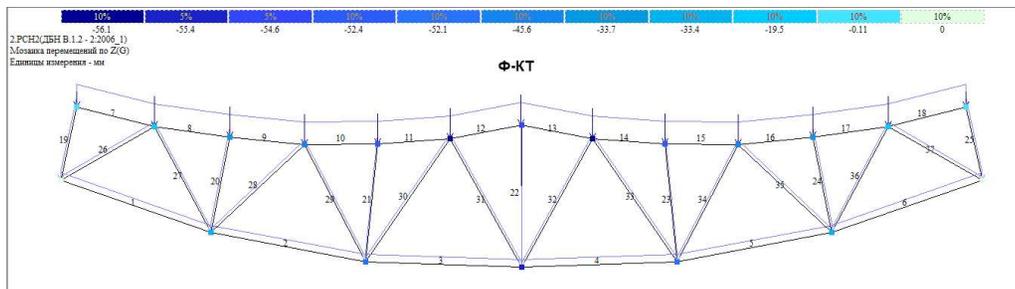
№ з/п	Назва конструктивного елемента	Переріз	E, т/м ²	ϑ	R, т/м ³
1	Верхній пояс	□ 160x80x5 Швелери сталеві гнуті рівнополочні (ГОСТ 8278-83)	2.10062e+007	0,3	7,85
2	Нижній пояс	C-подібний профіль C 200x60x3	2.10062e+007	0,3	7,85
3	Стійки	C-подібний профіль РС 160 x 68 x 1,5	2.10062e+007	0,3	7,85
4	Розкоси	СЕ №26,37: Прямокутна труба 60 x 4 СЕ №27-36: C-подібний профіль РС 140 x 68 x 1.5	2.10062e+007	0,3	7,85

Збір навантаження на 1м² вантажної площі для сталеві крокв'яної ферми

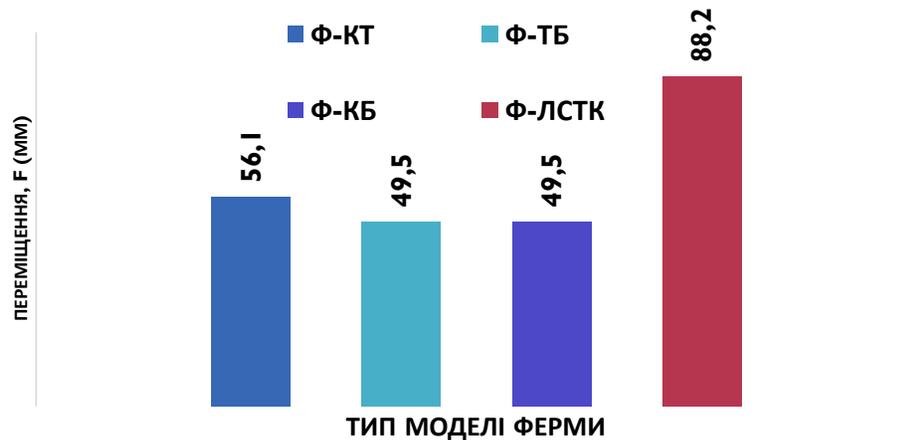
№ з/п	Навантаження	Характеристичне значення навантаження, кг/м ²	Коефіцієнт надійності за навантаженням	Розрахункове навантаження, кг/м ²
1. Постійні навантаження від конструкції покрівлі				
1.1	Полімерна мембрана «Plastfoil FL» -1,2 мм	1,6	1,3	2,08
1.2	PIR- панелі «PirroMembrane» - 120 мм	3,7	1,2	4,44
1.3	Техноніколь «Паробар'єр СФ-1000»	1	1,3	1,3
1.4	Профільований лист НК 75-750-0.8	11,1	1,05	11,66
1.5	Металевий прогон: швелер №27	6	1,05	6,3
	Постійне без врахування власної ваги ферми	23,4		25,8
1.6	Власна вага ферми	Обчислюється автоматично ПК «ЛІРА-САПР»		
2. Тимчасове навантаження				
2.1	Сніг для м. Суми	167	1,04	173,68
Разом постійне та тимчасове (без урахування власної ваги ферми)		190,4		199,48

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Деформована модель ферми



МАКСИМАЛЬНІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВУЗЛІВ ВІД РСН2



Максимальні переміщення вузлів моделей ферм

Назва моделі ферми	РСН1	РСН2	РСН3
Ф-КТ	8,76	56,1	51,3
Ф-ТБ	7,76	49,5	45,4
Ф-КБ	7,76	49,5	45,4
Ф-ЛСТК	13,8	88,2	80,7

Вертикальний граничний прогин ферми [33]:

$$f_u = l/250$$

Довжина ферми становить 24 м, отже,

$$f_u = \frac{2400}{250} = 9,6 \text{ см.}$$

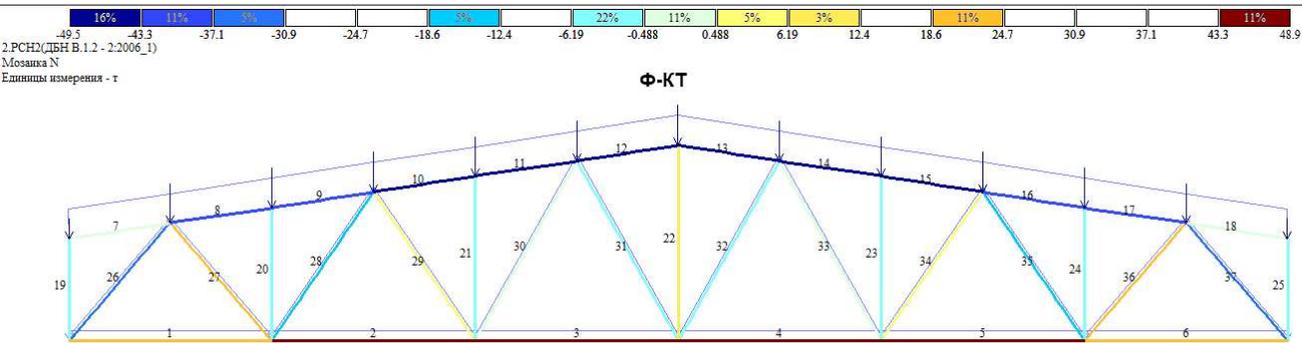
$$f_z^{(\Phi\text{-КТ})} = 5,6 \text{ см} < f_u^{\square} = 9,6 \text{ см}$$

$$f_z^{(\Phi\text{-ТБ})} = 4,95 \text{ см} < f_u^{\square} = 9,6 \text{ см}$$

$$f_z^{(\Phi\text{-КБ})} = 4,95 \text{ см} < f_u^{\square} = 9,6 \text{ см}$$

$$f_z^{(\Phi\text{-ЛСТК})} = 8,8 \text{ см} < f_u^{\square} = 9,6 \text{ см}$$

Мозаїка осьового зусилля **N** в стержнях усіх моделей ферм від РСН2 (на прикладі Ф-КТ)



Від другого сполучення навантажень (всі постійні + тимчасове) виникають найбільші зусилля осьового розтягу-стиску в моделі, які відповідно становлять $N_{\max}=48,9$ т та $N_{\min}=-49,5$ т.

РЕЗУЛЬТАТИ КОНСТРУКТИВНОГО РОЗРАХУНКУ



Варіант конструювання: Варіант 1
 Расчет по РСН, ДБН В.1.2 - 2.2006_1 (ДБН В.2.6-198:2014)

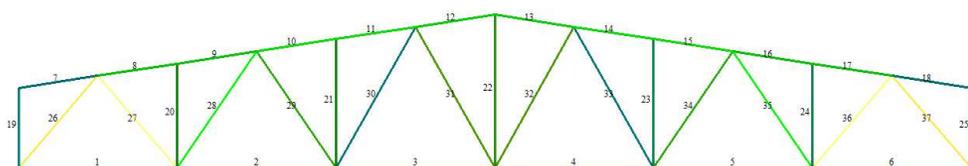


Рис.6.4 Мозаїка розрахунків за 1ГС з поперечними перерізами стержнів, що прийнято у вихідних даних для **Ф-КТ**



Мозаїка результатів перевірки визначених сечей по 1 предельному состоянию



Варіант конструювання: Варіант 1
 Расчет по РСН, ДБН В.1.2 - 2.2006_1 (ДБН В.2.6-198:2014)

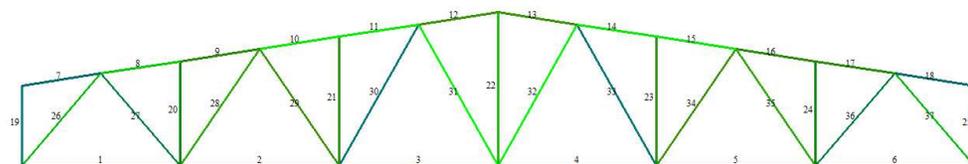


Рис.6.5 Мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих стержнів, з підібраними поперечними перерізами (у % несучої здатності) для **Ф-КТ**



Варіант конструювання: Варіант 1
 Расчет по РСН, ДБН В.1.2 - 2.2006_1 (ДБН В.2.6-198:2014)

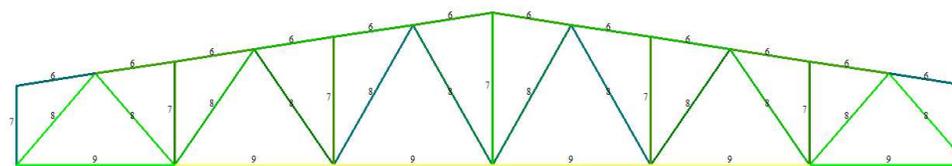


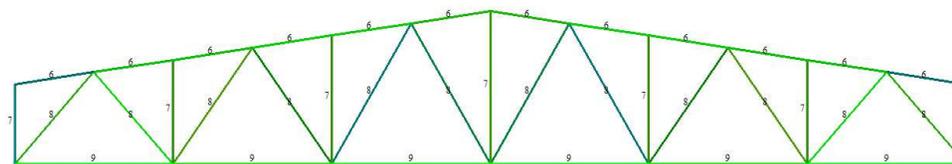
Рис.6.6 Мозаїка розрахунків за 1ГС з поперечними перерізами стержнів, що прийнято у вихідних даних для **Ф-ТБ**



Мозаїка результатів перевірки визначених сечей по 1 предельному состоянию



Варіант конструювання: Варіант 1
 Расчет по РСН, ДБН В.1.2 - 2.2006_1 (ДБН В.2.6-198:2014)



Мозаїка результатів перевірки подобраних сечей по 1 предельному состоянию

Рис.6.7 Мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих стержнів, з підібраними поперечними перерізами (у % несучої здатності) для **Ф-ТБ**

Таблиця 6.2 Максимальне використання , (%) перерізу після 1-ї ітерації

Назва конструктивної групи стержнів	Назва моделі ферми			
	Ф-КТ	Ф-ТБ	Ф-КБ	Ф-ЛСТК
	%	%	%	%
Верхній пояс	92,8-99,5	93,8-94,6	91,5-97,7	88-97,5
Нижній пояс	94,5-98,7	98,5-99,7	86,4-96,4	96,5-99,7
Стойки	46,4-98,1	28,2-93,4	26,9-85,1	14,2-99,0
Розкоси	5,3-99,9	1,5-98,1	2,6-98,1	2-98,1



- Із рисунка видно, що після підбору нових перерізів згідно норм [31] несуча здатність верхнього поясу використовується найбільш повно. Відсоток використання становить більше 90%. Лише у моделі Ф-ЛСТК максимальний % використання несучої здатності перерізу становить менше 90%.
- Відсоток використання становить більше 90% й для нижнього поясу всіх моделей. Відсоток мінімальний використання перерізів стійок решітки моделей становить від 46,4% (модель Ф-КТ) до 14,% (модель Ф-ЛСТК).
- Відсоток мінімальний використання перерізів розкосів решітки ферми моделей становить від 5,3% (модель Ф-КТ) до 2,0% (модель Ф-ЛСТК).

ТАБЛИЦЯ 6.3 ПІДРАХУНОК ВАГИ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПРИКЛАДІ ФЕРМИ Ф-КТ

Верхній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п, т	Вага загальна, т
7	2L125x10	2L25x3	2,02363	С235	0,00224	0,004532931
8		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
9		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
10		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
11		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
12		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
13		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
14		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
15		2L90x6	2,02363		0,01666	0,033713676
16		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
17		2L75x6	2,02363		0,01378	0,027885621
18		2L25x3	2,02363		0,00224	0,004532931
Вага верхнього поясу						0,322890403

Нижній пояс

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
1	L100x8	L 90x6	4	С235	0,00833	0,03332
2		L 125x9	4		0,0173	0,0692
3		L 125x9	4		0,0173	0,0692
4		L 125x9	4		0,0173	0,0692
5		L 125x9	4		0,0173	0,0692
6		L 90x6	4		0,00833	0,03332
Вага нижнього поясу						0,34344

Стілки

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
19	2L 90x90x6	2L 20x20x3	2	С235	0,00178	0,00356
20		2L 20x20x3	2,62		0,00178	0,0046636
21		2L 20x20x3	3,23		0,00178	0,0057494
22		2L 35x35x3	3,85		0,0032	0,01232
23		2L 20x20x3	3,23		0,00178	0,0057494
24		2L 20x20x3	2,62		0,00178	0,0046636
25		2L 20x20x3	2		0,00178	0,00356
Вага стійок						0,040266

Розкоси

№ стержня (СЕ)	Попередньо прийнятий профіль	Профіль	Довжина, м	Марка сталі	Вага 1м.п	Вага загальна, т
26	L 75x6	L100x8	3,05	С235	0,01225	0,0373625
27		L90x6	3,05		0,00833	0,0254065
28		L63x5	3,54		0,00481	0,0170274
29		L35x4	3,54		0,0021	0,007434
30		L25x3	4,07		0,00112	0,0045584
31		L30x4	4,07		0,00178	0,0072446
32		L30x4	4,07		0,00178	0,0072446
33		L25x3	4,07		0,00112	0,0045584
34		L35x4	3,54		0,0021	0,007434
35		L63x5	3,54		0,00481	0,0170274
36		L90x6	3,05		0,00833	0,0254065
37		L100x8	3,05		0,01225	0,0373625

Вага розкосів **0,1980668**

Загальна вага ферми **0,905**

Вагу **допоміжних деталей** для ферм приймають пропорційною масі основних стрижневих елементів через будівельний (масовий) коефіцієнт. Тобто спочатку обчислюють масу основних стрижнів ферми, потім множать на коефіцієнт, а різниця дає масу допоміжних деталей.

Вага основних стрижнів (металу в стрижнях):

$$G_{осн} = \sum (l_i \cdot m'_i),$$

де l_i – довжина i -го стержня (м),

m_l – вага 1 м цього профілю (кг/м) або $m_l = \rho \cdot A$

Прийнятий будівельний коефіцієнт маси K (безрозмірний) — враховує вагу вузлових фасонки, прокладок, болтів, шайб, зварювальних накладок та інших допоміжних деталей.

Загальна вага ферми з урахуванням допоміжних деталей:

$$G = K \cdot G_{осн},$$

$G_{осн}$ — вага основних елементів (стержнів ферми, визначена за розрахунковим перерізом);

K — коефіцієнт, що враховує додаткову вагу допоміжних деталей.

Ліхтарніков запропонував орієнтовні значення K :

$$K = 1,05 \div 1,15,$$

в залежності від типу ферми, кількості вузлів і складності з'єднань.

• для простих плоских ферм із мінімальною кількістю з'єднань: $K \approx 1,05$

• для ферм із багатьма вузлами, складними фасонками, накладками та зварними швами : до $K \approx 1,15$

Тоді вага допоміжних деталей:

$$G_{\text{всп}} = G_{\text{общ}} - G_{\text{осн}} = (K - 1) \cdot G_{\text{осн}}.$$

З практики для сталевих ферм покриттів зустрічаються такі показники:

— при використанні вузлових фасонки і прокладок (пара куточків і фасонки).

$$K \approx 1,20$$

$$K \approx 1,03 \div 1,05$$

— при більш «чистих» безфасонкових/зварених вузлах.

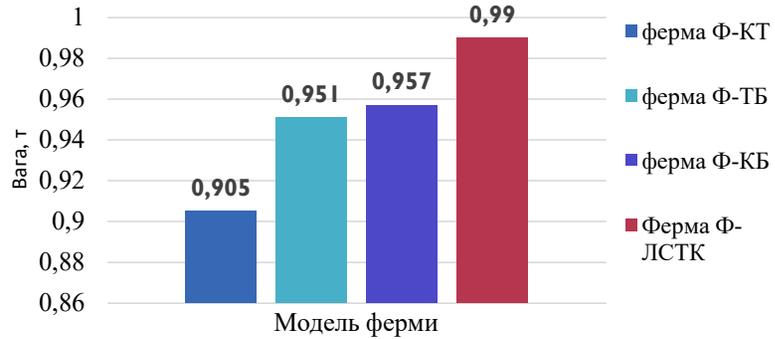
У літературі та збірниках даних наводяться табличні значення залежно від типу вузлів і профілів [1-7].

Коефіцієнт K (за Ліхтарниковим та у будівельній практиці) залежить від типу профілю та конструкції вузлів: наскільки складно/важко вони оформлюються фасонками, накладками, прокладками тощо.

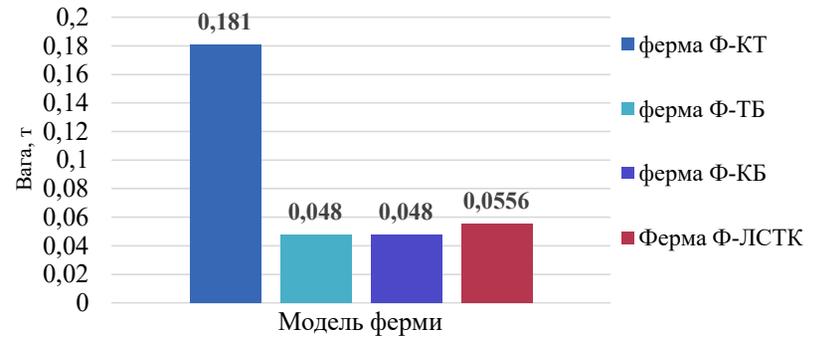
Таблиця 7.1 Підрахунок загальної ваги моделей ферм

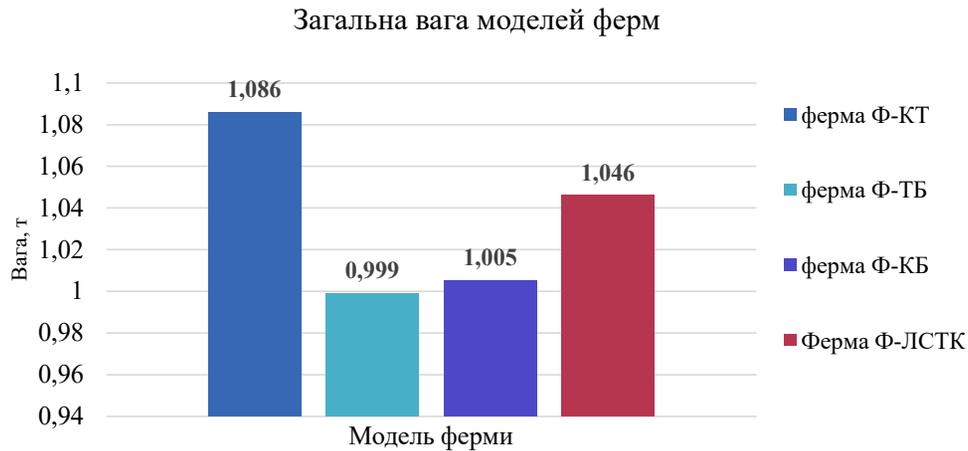
Тип ферми	Вага стержнів, т	К	Вага допоміжних деталей, т	Повна вага ферми, т
Ф-КТ (з кутників)	0,905	1,20	0,181	1,086
Ф-ТБ (з труб)	0,951	1,05	0,048	0,999
Ф-КБ (з коробчатого профілю)	0,957	1,05	0,048	1,005
Ф-ЛСТК (з ЛСТК-профілів)	0,990	1,04; 1,08	0,0556	1,046

Вага основних елементів моделей ферм



Вага допоміжних елементів моделей ферм





Із рис. 7.3 видно, що підсумувавши вагу основних стержнів та вагу деталей отримали такі результати.

Модель з найбільшою вагою є модель **Ф-КТ**- модель ферми із гарячекатаних кутників. Другою за загальною вагою є модель із **ЛСТК-профілів**. І майже однакову вагу мають моделі із труб та із коробчастого перерізу (Ф-ТБ, Ф-КБ).

Різниця у вазі між Ф-КТ та Ф-ЛСТК становить 3,8%. Для ферм Ф-ТБ та Ф-КТ така різниця майже відсутня.

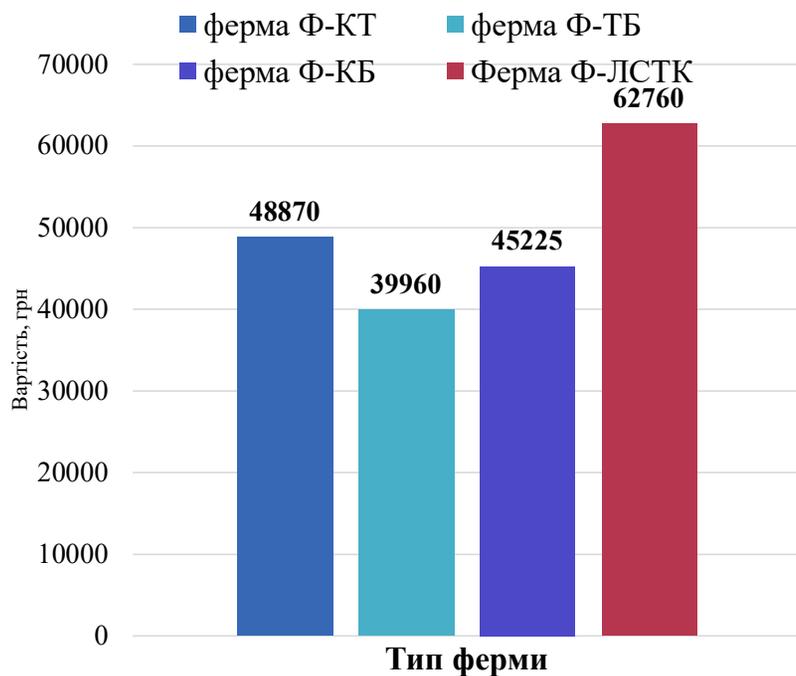
ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ КОНСТРУКЦІЇ

Вирішення зазначеного питання супроводжується певним рівнем наближеності, оскільки вартість чорних металів суттєво залежить від ринкових коливань. При визначенні актуальних цін на металопрокат зафіксовано відмінності у вартості серед різних постачальників, а також варіації цін залежно від калібру перерізів. Водночас, з огляду на те, що основною метою дослідження є встановлення загальних закономірностей, застосування усереднених показників вартості металопрокату видається цілком доцільним [10]. Слід уточнити, що в межах даної роботи враховується виключно вартість металопрокату, яка приймається як еквівалент вартості ферми. Відповідно до відкритих даних компанії «А ГРУПП» визначено ціни на металопрокат (див. табл. 3). Підсумкові результати розрахунків вартості ферм наведено у таблиці 4.

Таблиця. Показники ваги та вартості різних конструкцій ферм

Марка ферми	Вага ферми, т	Вага 1 т металу, грн	Вартість матеріалу ферми, грн
Ф-КТ	1,086	45000	48870
Ф-ТБ	0,999	40000	39960
Ф-КБ	1,005	45000	45225
Ф-ЛСТК	1,046	60000	62760

Рис. Зміна вартості ферми в залежності від типу перерізу



ВИСНОВКИ

- 1) Ферма Ф-КТ (ферма з кутників)
 - Має найбільшу вагу (1,086 т).
 - Загальна вартість матеріалу – 48 870 грн, що є другою за величиною.
 - Порівняно висока металоємність робить її менш економічною при великих об'ємах будівництва.
- 2) Ферма Ф-ТБ (ферма з труби)
 - Найменша вага серед моделей (0,999 т).
 - Має найнижчу собівартість – 39 960 грн, що робить цей варіант найбільш економічно вигідним.
 - Оптимальне співвідношення "міцність – вага – вартість".
- 3) Ферма Ф-КБ (ферма із профілів сталевих гнутих замкнутих зварних квадратних)
 - Вага близька до трубної (1,005 т).
 - Вартість – 45 225 грн, що більше ніж у трубної, але менше ніж у кутникової та ЛСТК.
 - Є компромісним варіантом між простотою виготовлення та економічністю.

ВИСНОВКИ

4) Ферма Ф-ЛСТК (ферма з легких сталевих тонкостінних конструкцій)

- Вага невелика (1,046 т), але завдяки високій ціні за тону металу загальна вартість сягає 62 760 грн.

- Це найдорожчий варіант, який доцільний при потребі зменшення ваги та швидкого монтажу, але економічно найменш вигідний.

Отже, за критеріями економічності та ефективності використання металу найкращі результати показала ферма з трубчастого профілю (Ф-ТБ) – вона має найменшу вагу та найнижчу вартість.

Ферми з кутників (Ф-КТ) та квадратного профілю (Ф-КБ) займають проміжне положення, причому кутникова конструкція більш металоємна. Ферми з ЛСТК (Ф-ЛСТК), незважаючи на знижену вагу, є економічно не вигідними через високу ціну тонкого сталевого профілю.