

**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: «Дослідження конструкцій диску перекриття з легких  
ферм»

Виконав (ла)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Безсонов К. С.

\_\_\_\_\_  
(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**

**Безсонов Кирило Сергійович**

**Тема роботи:** Дослідження конструкцій диску перекриття з  
легких ферм

Затверджено наказом по університету № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2025р.

Строк здачі студентом закінченої роботи: "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2025 р.

Вихідні дані до роботи:

Об'ємо-планувальне та конструктивне рішення промислової сталевий  
будівлі з розміром в плані 18x24 м

---

---

---

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

---

*Виконати огляд джерел щодо ефективних конструкцій покриття із жорстких блоків, представлених фермами із ЛСТК. Створити СЕ моделі традиційної конструкції покриття із кроквяних ферм із гарячекатаних профілів та модель із ЛСТК ферм, що об'єднані у вигляді жорстких блоків. Оцінити НДС моделей, стійкість, матеріалоемність моделей. роботу під локальним навантаженням*

---

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

---

*Мультимедійна презентація в форматі Microsoft PowerPoint*

---

---

---

---

---

---

---

---

**Керівник :**

  
(підпис)

Н.М. Срібняк  
(Прізвище, ініціали)

**Консультант**

  
(підпис)

. . Луцьковський  
(Прізвище, ініціали)

**Завдання прийняв до виконання:**

**Здобувач**

(підпис)

К.С. Безсонов  
(Прізвище, ініціали)

## Анотація

**Безсонов Кирило Сергійович. Дослідження конструкцій диску перекриття з легких ферм – 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 визначити з-поміж двох моделей конструкцій покриттів, що досліджуються, найбільш ефективну за декількома критеріями, в тому числі й критерієм матеріалоемності

**Аналіз публікацій та досліджень** встановив, що великопролітні просторові рішення для громадських, промислових, спортивних споруд, палаців спорту, торгових та логістичних площ, розважальних центрів і концертних майданчиків можуть бути реалізовані із застосуванням наскрізних просторових перехресних систем. Просторова робота покриття із застосуванням легких перехресних ферм покриття забезпечується завдяки зв'язкам, розташованим у двох напрямках ферм, які переносять зовнішні навантаження. Підвищення жорсткості покриття сприяє зниженню зусиль в окремих його елементах, що дозволяє використовувати тонкостінні сталеві профілі з меншою витратою сталі порівняно із суцільностінчастими прокатними балками.

В **основній частині** наведено опис двох скінченоелементних моделей сталевих покриття каркасної будівлі з розмірами в плані 18x24 м. Перша модель являє собою «класичне» поширене вирішення покриття промислової будівлі. Воно вирішене у вигляді крокв'яних конструкцій ферм Ф-1 прольотом 18,0 м. В торцях диска перекриття 18,0 x24,0 м розташовані зв'язкові ферми Ф-2 довжиною 6,0 м. По нижнім поясам ферм Ф-1 та Ф-2 розташовано горизонтальні зв'язки жорсткості. По верхнім поясам крокв'яних ферм Ф-1 розташовані прогони покриття. Ці елементи теж є елементами жорсткості всієї конструкції. Всі елементи такої моделі покриття виконані із гарячекатаних сталевих профілів за сортаментами.

Друга модель являє собою ефективне перекриття із легких тонкостінних сталевих профілів. Профілі ЛСТК мають відкриту форму та виготовляються способом холодного формування. Їх особливістю є зазвичай мала товщина стінки профілю, яка знаходиться в межах від 1,5 до 4 мм.

Конструкція покриття за схемою №2 складається з легких перехресних ферм, що являють собою жорсткі прямокутні замкнені блоки 6x12м. Загальна стійкість конструкції досягається шляхом формування декількох просторових блоків вздовж периметра покриття.

Ідея роботи такого покриття полягає в тому, що ферми із ЛСТК, які закріплені із площини по нижньому поясу горизонтальними зв'язками, а по верхньому прогонами утворюють жорсткий диск покриття. Жорсткий диск покриття гарним чином забезпечує просторову роботу каркасу будівлі. Профілі, прийняті для елементів ферм є тонкостінним та мають профіль типу [ та ]].

У **висновках** встановлено, що максимальні переміщення  $f_z$  вузлів скінченоелементної схеми від РСН2 для моделі №2 (із ЛСТК) є на 128,% (або в 2,3 рази) меншими, ніж максимальні переміщення вузлів скінченоелементної моделі №1, що свідчить про значну жорсткість й набагатоменшу деформативність моделі покриття, де застосований принцип просторових замкнених жорстких

блоків. Числовий експеримент підтвердив, що завантаження, прикладене до будь-якої точки покриття за моделлю №2 (із замкнутих жорстких блоків ЛСТК) викликає спротив протидію), а значить й включає до спільної роботи всі елементи загалом.

**Ключові слова:** легка сталева тонкостінна конструкція (ЛСТК), профіль холодного формування, деформативність, жорсткість, матеріалоемність, скінченоелементна модель, ферма, жорсткий блок

**Структура роботи.** Робота складається з основного тексту на 59 сторінках, у тому числі 24 таблиці, 38 рисунка. Текст роботи містить 7 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 19 джерела, 1 додатку на 30 сторінках. Графічна частина складається з 30 слайдів мультимедійної презентації.

### **Abstract**

**Bezsonov Kyrylo Serhiiovych. Study of light truss pavement disc structures** – Master's qualification work with manuscript rights.

**Master's qualification work** in specialty 192 "Construction and civil engineering". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The manuscript consists of the *table of contents, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the chosen topic, sections of the main part, conclusions based on the results of research and formulation of conclusions from research* (in Ukrainian and English).

The **goal, tasks, object and subject of research, methods of scientific research** are formulated.

The **research results** allow us to determine the most effective among the two models of coating structures under study by several criteria, including the criterion of material consumption.

An **analysis of publications** and studies has shown that large-span spatial solutions for public, industrial, sports facilities, sports palaces, retail and logistics areas, entertainment centres and concert venues can be implemented using through spatial cross-beam systems. The spatial operation of the pavement using lightweight crossover pavement trusses is ensured by the connections located in two directions of the trusses, which carry external loads. The increased stiffness of the cover helps to reduce the forces in its individual elements, which makes it possible to use thin-walled steel profiles with lower steel consumption compared to solid-walled rolled beams

The **main part** of the paper describes two finite element models of a steel roof of a frame building with dimensions of 18x24 m. The first model is a 'classical' common solution for covering an industrial building. It is designed in the form of truss structures of F-1 trusses with a span of 18.0 m. At the ends of the 18.0 x 24.0 m floor disc, there are 6.0 m long F-2 link trusses. Horizontal stiffening ties are located along the lower belts of the F-1 and F-2 trusses. The upper belts of the F-1 trusses are covered with roof purlins. These elements are also stiffening elements of the entire structure. All the elements of this roofing model are made of hot-rolled steel profiles according to the sections.

The second model is an effective floor made of lightweight thin-walled steel profiles. LSTS profiles have an open shape and are made by cold forming. Their feature is usually a small profile wall thickness, which ranges from 1.5 to 4 mm.

The roof structure according to scheme No. 2 consists of lightweight cross trusses, which are rigid rectangular closed blocks of 6x12m. The overall stability of the

structure is achieved by forming several spatial blocks along the perimeter of the pavement.

The idea behind this type of roofing is that the LSTS trusses, which are fixed from the plane along the lower belt with horizontal ties and along the upper belt with girders, form a hard disc of roofing. The rigid roofing disc provides a good spatial support for the building frame. The profiles used for the truss elements are thin-walled and have a profile of the type [ and ]].

The **conclusions** established that the maximum displacements  $f_z$  of the nodes of the finite element scheme from the RSN2 for model No. 2 (with LSTS) are 128.% (or 2.3 times) less than the maximum displacements of the nodes of the finite element model No. 1, which indicates a significant stiffness and much lower deformability of the pavement model, where the principle of spatial closed rigid blocks is applied. The numerical experiment confirmed that the load applied to any point of the pavement according to model No. 2 (from closed rigid LSTS blocks) causes resistance, and thus involves all elements in general.

**Keywords:** light steel thin-walled structure (LSSTS), cold-formed profile, deformability, stiffness, material consumption, finite element model, truss, rigid block

In the **appendices** are given an album of multimedia presentation slides.

**Structure of the manuscript.** The manuscript consists of the main text on 59 pages, including 24 tables and 38 figures. The text of the paper contains 7 chapters, including a general description of the work and conclusions, a list of 19 references, and 1 appendix on 30 pages. The graphic part consists of 30 slides of a multimedia presentation.

## ЗМІСТ

<i>Завдання</i> .....	
<i>Анотація</i> .....	
<b>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ</b> .....	
1.1 Актуальність теми.....	
1.2 Тонкостінні сталеві профілі.....	
<b>РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	
2.1 Тонкостінні сталеві профілі.....	
2.2 Характеристики перерізів ЛСТК.....	
2.3 Проектування елементів ЛСТК, що зазнають стиску під навантаженням.....	
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	
<b>РОЗДІЛ 4 ЖОРСТКИЙ ДИСК ПОКРИТТЯ БУДІВЛІ ІЗ ПЕРЕХРЕСНИХ ЛЕГКИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ (ЛСТК)</b> .....	
<b>РОЗДІЛ 5 СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНІ СХЕМИ В РАМКАХ ВИКОНАННЯ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ</b> .....	
5.1 Скінченоелементні моделі конструкцій сталевих покриття каркасної будівлі .....	
5.2 Параметри жорсткості моделей, що досліджуються.....	
5.3 Навантаження, що призначається.....	
<b>РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ</b> .....	
6.1 Деформативність розрахункових моделей.....	
6.2 Напружений стан моделей, що досліджуються.....	
6.3 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються.....	
6.4 Аналіз ступеня використання несучої здатності перетину трубчастих стержнів.....	
6.5 Підбір нових перерізів конструкцій покриття після 1-го ітераційного розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР.....	

**РОЗДІЛ 7. ЛОКАЛЬНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПОКРИТТЯ**

**ВИСНОВКИ**.....

*Література*.....

**Додатки**.....

*Додаток 1. Графічний матеріал (презентація)*

*Додаток 2 Апробація результатів дослідження*

# РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

## 1.1 Актуальність теми

Будівлі класифікують за конструктивною схемою на безкаркасні, каркасні та з неповним каркасом. Металеві споруди зазвичай мають каркасну конструктивну схему.

Каркасні будівлі складаються з взаємопов'язаних елементів, що забезпечують нормальне функціонування обладнання всередині споруди, сприймають навантаження від кранів, технологічних процесів, погодних умов та інших чинників, а також формують геометрію будівлі. Каркас слугує основою для кріплення огорожувальних конструкцій.

Каркасні конструкції поділяються на дві основні системи:

- - Поперечну, яка зазвичай представлена рамами.
- - Поздовжню, що включає колони та елементи, які забезпечують їхню стійкість і сприймають навантаження у поздовжньому напрямку.

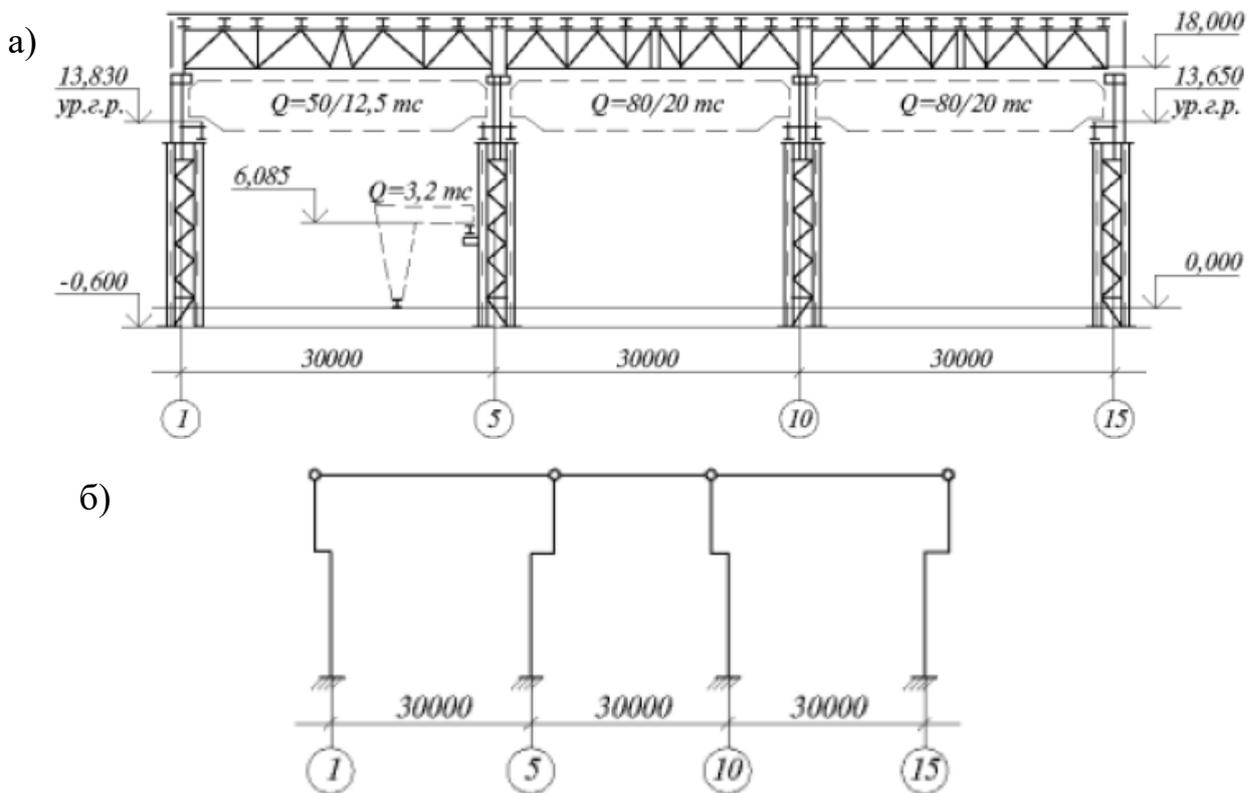


Рис.1.1 Конструктивне вирішення плоскої сталеві рами-а; розрахункова схема плоскої рами-б

Обидві зазначені системи можуть розглядатися окремо в разі плоскої конструктивної схеми або спільно при просторовій схемі. Проте незалежно від обраних передумов, за наявності диска покриття та гальмівних конструкцій у будь-якому каркасі реалізується просторова схема роботи. У цьому випадку зсуви сусідніх плоских рам взаємопов'язані за допомогою дисків. Розрахунок каркасів за плоскою схемою здебільшого є умовним.

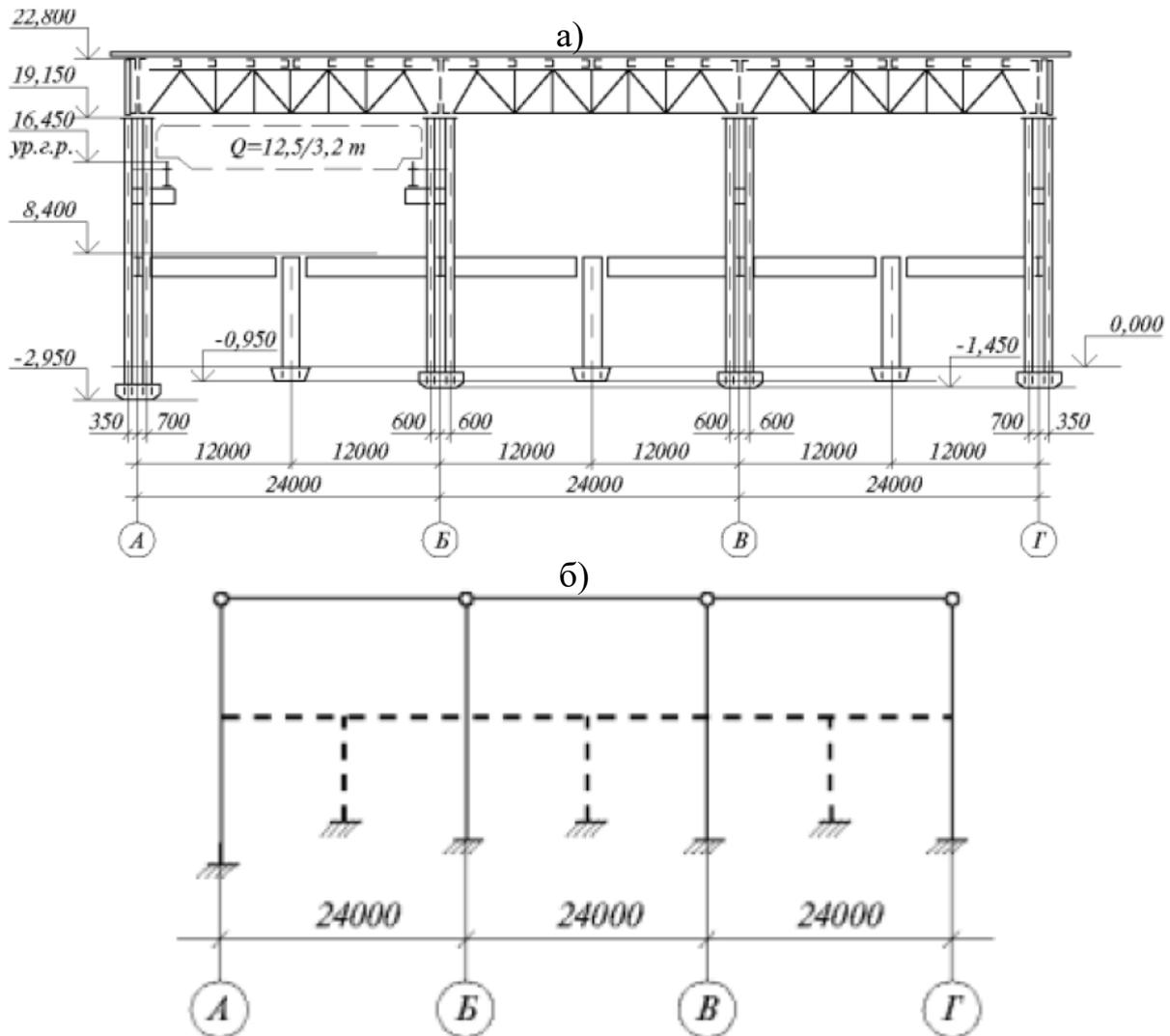


Рис.1.2 Конструктивне вирішення плоскої сталеві рами-а; розрахункова схема плоскої рами-б

Поперечна рама складається з об'єднаних в єдину систему ригелів покрівлі та колон. До поздовжніх конструкцій належать підкранові балки, вертикальні зв'язки вздовж колон, а також зв'язки та розпірки, що забезпечують стійкість каркаса у поздовжньому напрямку.

Залежно від способу з'єднання елементів, поперечні рами поділяються на такі типи:

- **Шарнірні** – ригелі приєднані до колон шарнірно, а самі колони (повністю або частково) закріплені в фундаментах жорстко.
- **Жорсткі** – ригелі та колони з'єднані між собою жорстко.
- **Змішані** – деякі вузли виконані жорсткими, а деякі – шарнірними.

Каркасні схеми класифікують за способом сприйняття горизонтальних навантажень на в'язеві, рамні та рамно-в'язеві. Найекономічнішими та найпростішими у виготовленні й монтажі є в'язеві каркаси. Проте сучасні архітектурно-будівельні вимоги та необхідність забезпечення технологічної гнучкості виробничих споруд ускладнюють їх широке застосування.

## 1.2 Тонкостінні сталеві профілі

Термін «сталевий тонкостінний профіль» або «профіль ЛСТК» стосується холодногнутих сталевих профілів відкритого перерізу з максимальною товщиною стінки до 4 мм. Профілі товщиною від 0,7 мм до 2,0 мм зазвичай використовуються в каркасно-щитовому будівництві, тоді як елементи з товщиною від 1,4 мм до 4 мм застосовуються для каркасів будівель павільйонного типу, стінових та покрівельних прогонів. Виготовлення профілів здійснюється шляхом згинання або прокатки оцинкованого сталевого штрипсу, нарізаного з рулонної листової сталі. Для тонкостінних елементів найчастіше використовуються марки сталі S350 та 08кп/пс, а імпортований прокат зазвичай постачається класів сталі S350, S390 та S450.

Сучасні промислові, комерційні, адміністративні, житлові та інші будівлі базуються на легких металоконструкціях (ЛСТК або ЛМК). Ці конструкції складаються з полегшених профілів, що формують каркас, та

огороджувальних елементів, виготовлених із сендвіч-панелей, профнастилу та інших матеріалів. Швидкий розвиток виробництв і зростання підприємств, які надають широкий спектр послуг, сприяли популярності будівництва з ЛМК в Україні та інших країнах. З їхньою допомогою можна звести криті приміщення будь-якої площі та конфігурації (включно з арочними), при цьому мінімізуючи вартість монтажних робіт.



Рис. 1.3 Каркасна будівля з ЛСТК

Отже, поряд із конструктивними рішеннями традиційних сталевих каркасів будівель нині популярності та актуальності набирають каркаси із легких профілів.

Так, наприклад, конструкція покриття із легких холодногнутих ферм може стати чудовою альтернативою в якості конструктивного вирішення покриття каркасної будівлі в порівнянні із традиційними важкими кроквяними фермами із масивних гарячекатаних профілів.

Тому тема дослідження статичної роботи конструкції з ферм їх ЛСТК є **актуальною задачею** дослідження.

**Метою** числових розрахунків є виявлення напружено-деформованого стану скінченоелементних моделей покриття із гарячекатаних профілів та ЛСТК-профілів. Також необхідно встановити параметри стійкості двох моделей та оцінити та проаналізувати їх деформований стан при локальному завантаженні. Згідно напружено-деформованого стану виконати

конструювання перерізів елементів скінченоелементних схем. Оцінити матеріалоємність варіантів.

**Задачі**, які сформульовані для досягнення мети, що вказана

- 1) З'ясувати особливості та принципи конструювання типових покриттів сталевих каркасних будівель покриттів із крокв'яних конструкцій, що виконані із гарячекатаних профілів та покриттів каркасних будівель із легких ферм та в'язей, що виконані із профілів ЛСТК;
- 2) Змодельовати використовуючи метод скінчених елементів дві розрахункові моделі покриття для будівлі прольотом 18х24 м. Перша модель являє собою класичне вирішення із кроквяних гарячекатаних сталевих ферм прольотом 18,0 м та розташованих з кроком 6, м. Друга модель являє собою систему жорстких і стійких замкнених дисків із ферменних конструкцій ЛСТК;
- 3) Задати всі необхідні параметри моделей , виконати статичний розрахунок та оцінити результати статичного розрахунку (напружений стан елементів, деформований стан елементів, стійкість);
- 4) Виконати одну із задач числового експерименту, що являє собою завантаження системи точковим локальним навантаженням. Оцінити характер деформування та параметри деформування двох систем, що локально завантажені;
- 5) Виконати конструювання згідно вимог 1ГС та 2ГМ для елементів двох скінченоелементних моделей.
- 6) Оцінити матеріалоємність моделей, сформулювати загальні висновки з дослідження.

**Об'єкт дослідження** – дві скінченоелементні моделі конструкції покриття каркасної будівлі, що виконані із гарячекатаних профілів та профілів ЛСТК.

**Предметом дослідження** є напружено-деформований стан моделей моделі конструкції покриття каркасної будівлі, що виконані із гарячекатаних профілів та профілів ЛСТК, конструктивне рішення таких моделей й їх матеріалоемність.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати числового експерименту дозволяють визначити з-поміж двох моделей конструкцій покриттів, що досліджуються, найбільш ефективну за декількома критеріями, в тому числі й критерієм матеріалоемності.

### **Апробація результатів дослідження**

Срібняк Н.М., Галушка С.А., Безсонов К.С., Андрушечко Ю.О. Ефективні сталеві конструкції для покриття будівель. Міжнародна науково-практична конференція «GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION» 10-12.03.2025 року Київ, Україна

## **РОЗДІЛ 2**

### **БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **2.1 Тонкостінні сталеві профілі**

Легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК) — це каркасні споруди, створені з тонких сталевих елементів товщиною до 3 мм. Цей тип металоконструкцій використовується для зведення швидкокомонтованих будівель [14-19].

В Україні технологія ЛСТК з'явилася відносно недавно, хоча у світі вона відома вже кілька десятиліть. У 1950-х роках у Канаді було розроблено план швидкого будівництва великої кількості малоповерхових будинків. Експеримент виявився успішним, і методика швидкого зведення будівель почала стрімко поширюватися по всьому світу. Невдовзі ЛСТК здобули значну популярність, що цілком виправдано, адже ця технологія може застосовуватися в широкому спектрі сфер [1].

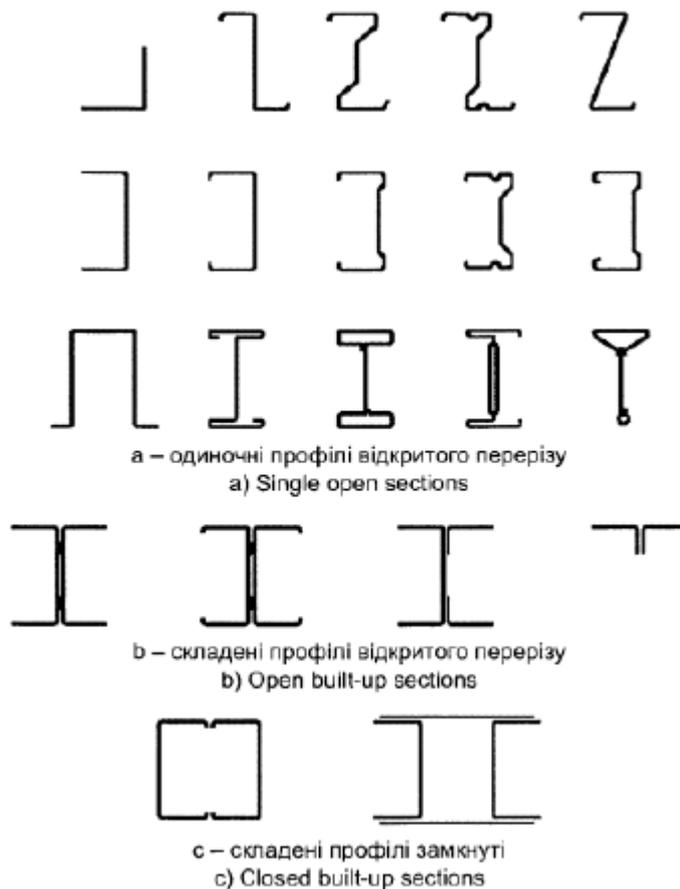


Рис.2.1 Холодногнуті профілі ЛСТК

Найпоширенішим типом профілю в каркасах ЛСТК є С-подібний профіль з відгинами полиць. Ці профілі зазвичай використовуються як стійки, колони, балки та прогони. С-подібний профіль простий у виготовленні та виробляється більшістю компаній на ринку ЛСТК. Наявність відгину полиць забезпечує додаткову жорсткість та підвищує критичні напруження втрати місцевої стійкості. У малоповерховому житловому будівництві висота профілю зазвичай варіюється від 65 мм до 200 мм для стійок стінових панелей та від 150 мм до 300 мм для балок міжповерхових перекриттів. Прогони, як правило, виготовляють із Z-подібних, С-подібних або  $\Sigma$ -подібних профілів з висотою від 150 мм до 400 мм.

a)



b)



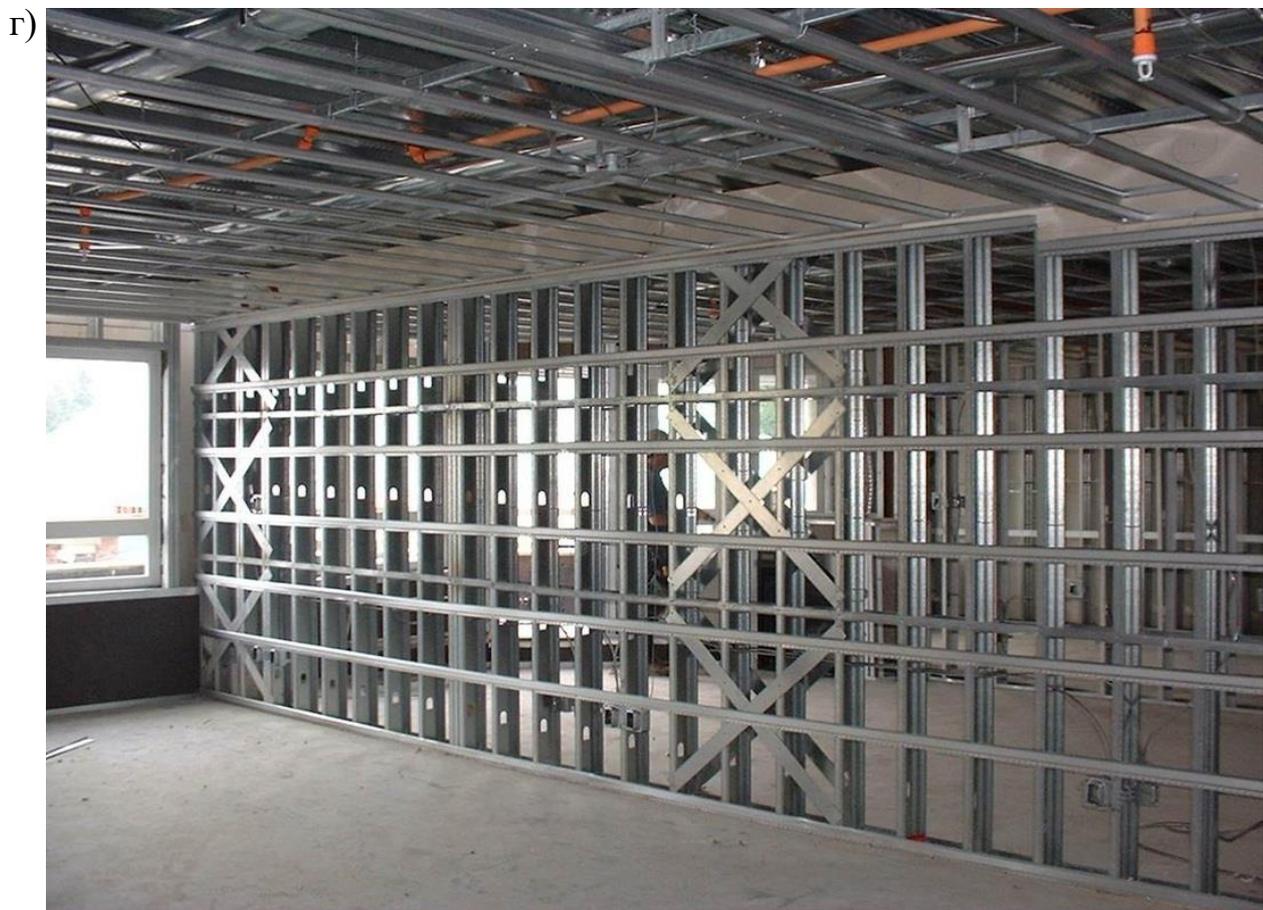


Рис.2.2 Приклад каркасу будівлі із ЛСТК-а; будівля з холодногнутих тонкостінних сталевих конструкцій-б [14]; Легкі сталеві конструкції - будівельні матеріали: Революція в сучасному будівництві-в [17]; легкий сталевий каркас перед встановленням покрівельного покриття-г [18]

На рис.2.2 зображено об'ємний модуль, виготовлений у заводських умовах. Подібні каркасні рішення застосовуються в стінових панелях

заводського виробництва, а також при монтажі на будівельному майданчику з великих елементів або окремих деталей. Проектування ЛСТК регламентується стандартом [2]. Сфера застосування цього стандарту обмежується профілями, для яких накопичено достатній досвід та здійснено випробування. Для елементів, що виходять за ці межі, несуча здатність та експлуатаційна придатність повинні визначатися на основі результатів випробувань або розрахунків, підтверджених експериментально.

Усі марки сталі, що призначаються для холодноформованих елементів й настилів з профільованого листа, повинні бути придатними для способу холодного формування й зварювання. Також на поверхні можна наносити покриття. Марку сталі обирає проектувальник.

## **2.2 Характеристики перерізів ЛСТК**

Для визначення несучої здатності тонкостінного профілю при вигині, стиску або інших видах напружено-деформованого стану під різними навантаженнями необхідно спочатку обчислити геометричні характеристики перерізу. Для тонкостінних сталевих профілів розрізняють такі типи характеристик перерізу:

- Характеристики бруто-перерізу: властивості повного, номінального перерізу без урахування можливих втрат стійкості.
- Характеристики ефективного або редукованого перерізу: робоча розрахункова площа перерізу, визначена з урахуванням втрати місцевої стійкості поздовжньо стиснутих ділянок профілю в експлуатаційних умовах при поперечному згині.

Ці характеристики є основою для точних розрахунків і забезпечення надійності конструкцій з тонкостінних сталевих профілів.

Термін «ефективний» або «редукований» стосується умовного поперечного перерізу, отриманого шляхом виключення окремих ділянок та зменшення площі для врахування місцевої втрати стійкості при розрахунку

несучої здатності. Також може знадобитися редукція для врахування втрати стійкості форми перерізу. Зазвичай, несуча здатність тонкостінних сталевих профілів, за винятком випадків розтягування, розраховується з використанням характеристик ефективного перерізу.

Термін «брутто-характеристики» стосується геометричних параметрів перерізу без урахування зменшення площі або місцевої втрати стійкості окремих ділянок. Розрахунок брутто-характеристик для найпоширеніших форм профілів є відносно простим і включає підсумовування елементарних площ, статичних моментів та моментів інерції (полиць, стінок, елементів жорсткості тощо), а також визначення розташування головних центральних осей перерізу та моментів інерції всього перетину.

Аналогічні процедури можуть бути застосовані для обчислення інших необхідних характеристик брутто-перерізу. Проте, при роботі з тонкостінними сталевими профілями слід врахувати три важливі аспекти:

- **Товщина сталевих листів:** впливає на міцність і жорсткість профілю.
- **Використання теорії серединної лінії:** передбачає розрахунки, засновані на середній лінії товщини перерізу.
- **Вплив радіусів заокруглення:** заокруглення на кутах профілю можуть змінювати розподіл напружень і впливати на загальні характеристики перерізу.

Окремою проблемою при розрахунку геометричних характеристик брутто- та ефективного перерізів є визначення центру згину (або центру зсуву) перерізу. Крім того, зазвичай при розрахунках використовуються дві основні гіпотези:

- **Гіпотеза недеформованості контуру поперечного перерізу:** передбачає, що форма перерізу не змінюється під навантаженням.
- **Гіпотеза плоских перерізів:** припускає, що переріз залишається плоским після деформації.

Ці гіпотези спрощують аналіз і розрахунки, дозволяючи отримати наближені, але практично корисні результати.

Гіпотеза плоских перерізів може бути застосована до всіх звичайних сталевих конструкцій у будівництві. Її фізико-механічний зміст полягає в тому, що перерізи, які до деформації були плоскими та перпендикулярними до поздовжньої осі елемента, залишаються такими ж після деформації. У тонкостінних профілях ця гіпотеза є прийнятною за умови невеликих поздовжніх деформацій та обмежених змін форми поперечного перерізу. Однак при крученні гіпотеза плоских перерізів порушується через депланацію перерізу — явище, при якому площинність поперечного перерізу стрижня або балки змінюється, перетворюючись на нелінійну поверхню або сукупність поверхонь.



Рис.2.3 З'єднання елементів конструкцій ЛСТК

Фізико-механічний зміст гіпотези незмінності контуру поперечного перетину полягає в припущенні, що під час кручення навколо поздовжньої осі, яка проходить через центр вигину, контур профілю залишається незмінним, тобто переріз поводить себе як жорсткий диск. У тонкостінних профілях використання ефективного перерізу в розрахунках допускає місцеву втрату стійкості стінок та полиць елементів, що призводить до зміни

контур поперечного перерізу, геометричних характеристик і, як наслідок, виникнення додаткових напружень. Ці ефекти можна врахувати шляхом застосування додаткових знижувальних коефіцієнтів до геометричних характеристик ефективного перерізу.

Загалом, у місцях закріплення профілю та за відсутності кручення, гіпотезу про незмінність контуру поперечного перерізу можна вважати прийнятною з певним ступенем наближення. Додавання планок, ребер та вставок підвищує жорсткість профілю, що сприяє більш точному застосуванню цієї гіпотези.

### **2.3 Проектування елементів ЛСТК, що зазнають стиску під навантаженням**

Тонкостінні сталеві профілі широко застосовуються для передачі осьових стискаючих навантажень, наприклад, у ролі стійок, колон або розкосів ферм. Подібно до їхніх товстостінних зварних або катаних аналогів, основним видом втрати несучої здатності таких профілів під час стиску є втрата стійкості, а не міцності. Це призводить до того, що фактична несуча здатність елемента значно нижча за граничне значення, визначене за міцністю перерізу. Тому методика розрахунку таких елементів базується на оцінці їхньої несучої здатності щодо загальної стійкості і багато в чому схожа на проектування звичайних сталевих нетонкостінних колон. Проте поведінка тонкостінних сталевих стійок у деяких випадках відрізняється від товстостінних профілів, і ці особливості слід враховувати під час проектування.

На відміну від колон, які в межах каркасу функціонують як окремі елементи, тонкостінні сталеві стійки часто застосовуються в несучих панелях, обшитих гіпсокартоном або іншими матеріалами. Наявність обшивки забезпечує певний ступінь розкріплення в її площині, що може бути враховано при розрахунку несучої здатності щодо втрати стійкості. Однак ступінь такого розкріплення слід підтвердити експериментальними

випробуваннями, використовуючи стійки певних типів із заданою гнучкістю, а також обшивку та кріплення, що відповідають реальним умовам експлуатації.

На відміну від гарячекатаних сталевих колон, де основним видом втрати стійкості є поздовжній вигин, багато тонкостінних сталевих профілів схильні до згинально-крутильної втрати стійкості. Якщо згинально-крутильна втрата стійкості настає при нижчому навантаженні, ніж поздовжній вигин, саме цей вид втрати несучої здатності стає визначальним при виборі перерізу елемента.

Тонкостінні сталеві профілі схильні до місцевої втрати стійкості та деформації форми перерізу, що може негативно впливати на стійкість елемента під час стиску. При розрахунку таких елементів слід використовувати геометричні характеристики ефективного поперечного перерізу замість характеристик бруто-перерізу. Процедура проєктування тонкостінних сталевих елементів на стиск описана в [2]. Несуча здатність елемента при осьовому стисканні визначається за формулою:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$

де:  $\chi$  - знижуючий коефіцієнт втрати стійкості для відповідної кривої;  
 $A_{eff}$  - площа ефективного поперечного перерізу;

$f_y$  - границя текучості;

$\gamma_{M1}$  - частковий коефіцієнт надійності із втрати стійкості.

Цей підхід дозволяє врахувати вплив локальних нестабільностей та забезпечити точніший розрахунок несучої здатності тонкостінних елементів.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи, використані в цьому дослідженні, були визначені відповідно до його мети та поставлених завдань.

#### Метод 1. Аналітичний метод.

Оцінка даних про можливі конструктивні вирішення покриття сталевих каркасних будівель, дослідження особливостей та характеру роботи конструкцій кроквяних із гарячекатаних кутників та інших профілів та кроквяних конструкцій із легких сталевих холодногнутих профілів. Оцінка особливостей роботи двох можливих конструктивних вирішення покриття каркасної сталеві будівлі.

#### Метод 2. Метод скінчених елементів

Цей метод є приблизним (апроксимаційним) методом будівельної механіки. Використовується для визначення зусиль, напружень та деформацій у скінчених елементах розрахункової схеми та вузлах цієї схеми відповідно. Наразі цей метод широко використовується для аналізу складних систем, як статично визначуваних, так і статично невизначуваних.

В МСЕ конструкції плоских ферм покриття сталеві каркасної будівлі являють собою розрахункові схеми, створені із стержньових скінчених елементів, які з'єднані між собою у вузлах. Стержньові скінчені елементи мають такі характеристик жорсткості як розміри (габарити) поперечного перерізу, початковий модуль пружності сталі, питома вага сталі та коефіцієнт Пуасона.

Всі елементи скінченоелементної схеми зазнають спільних деформацій від навантаження. Ступінь спільної роботи залежить і від конструктивного вирішення системи і від ступеня зв'язності будівельної системи.

1) Метод 3. Методика підбору перерізів сталевих елементів згідно норм [6]

Методика підбору перерізів сталевих елементів базується на положеннях нормативних документів з проєктування сталевих конструкцій.

Основні принципи підбору перетинів стержнів елементів ферм, в'язей, повинні здійснюватися згідно із вимогами та рекомендаціями нормативів проєктування сталевих конструкцій [6].

**Розтягнуті стержні:**

1. Спочатку визначають необхідну площу поперечного перерізу стержня за відповідною формулою.

$$A_H = \frac{N}{R_y \gamma_c} \quad (3.1)$$

2. Потім, згідно з сортаментом, обирають відповідний переріз і визначають його геометричні характеристики.

**Стиснуті стержні:**

1. Розраховують необхідну площу перерізу для стержня, що зазнає центрального стиску, використовуючи відповідну формулу.

$$A_H = \frac{N}{\varphi R_y \gamma_c} \quad (3.2)$$

Ця нормативна методика закладена в модулі «Метал» програмного комплексу ЛІРА-САПР, що дозволяє автоматизувати процес підбору перерізів елементів. Під час підбору перевіряється відповідність умовам міцності, стійкості та жорсткості, згідно з вимогами розрахунків за першою та другою групами граничних станів.

**4. Аналітична обробка результатів розрахунку**

Аналіз та обробка результатів розрахунків здійснюються за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel. Цей інструмент

дозволяє ефективно опрацьовувати дані, виконувати складні обчислення та візуалізувати результати у вигляді графіків і діаграм. Зокрема, використання надбудови Analysis ToolPak розширює можливості Excel для проведення комплексного аналізу даних.

Верхній пояс Ф-2					Горизонтальні зв'язки				
Профіль	Вага 1м.п	Загальна довжина елементі в, (м)	Вага загальна, (т)	Профіль	Вага 1м.п	Загальна довжина елементі в, (м)	Вага загальна, (т)		
2L25x16x3	0,001821	48	0,0874	C65x32x8x1	0,00108	226,8	0,244944		
					0,00108				
Нижній пояс Ф-2					Прогони				
Профіль	Вага 1м.п	Загальна довжина елементі в, (м)	Вага загальна, (т)	Профіль	Вага 1м.п	Загальна довжина елементі в, (м)	Вага загальна, (т)		
2L25x16x3	0,001821	48	0,0874	C под 120x68x2	0,00401	396	1,58796		
<b>Решітка Ф-2</b>							<b>6.152808</b>		

Рис. 3.1 Скрін із поля ПК Microsoft Excel, де відбувається підрахунок ваги конструктивних груп стержнів моделей покриття сталевої каркасної будівлі

## РОЗДІЛ 4

### ЖОРСТКИЙ ДИСК ПОКРИТТЯ БУДІВЛІ ІЗ ПЕРЕХРЕСНИХ ЛЕГКИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ (ЛІСТК)

Сучасні покриття і перекриття повинні відповідати підвищеним вимогам як до несучої здатності, так і до архітектурної виразності. Великопротітні просторові рішення для громадських, промислових, спортивних споруд, палаців спорту, торгових та логістичних площ, розважальних центрів і концертних майданчиків можуть бути реалізовані із застосуванням наскрізних просторових перехресних систем.

Конструктивні рішення покриття будівлі із застосуванням легких перехресних ферм являють собою сучасне та актуальне рішення. Просторова робота такого покриття забезпечується завдяки зв'язкам,

розташованим у двох напрямках ферм, які переносять зовнішні навантаження. Підвищення жорсткості покриття сприяє зниженню зусиль в окремих його елементах, що дозволяє використовувати тонкостінні сталеві профілі з меншою витратою сталі порівняно із суцільностінчастими прокатними балками.

Загальна стійкість конструкції досягається шляхом формування декількох просторових блоків вздовж периметра покриття. Ретельні розрахунки дозволяють визначити оптимальні розміри та кількість осередків, на які умовно розбивається диск покриття.

При цьому використання легких перехресних ферм передбачає, що ферми з тонкостінних профілів, закріплені горизонтальними зв'язками в нижньому поясі та прогонами в верхньому, утворюють жорсткий диск покриття, що забезпечує його просторову роботу. Таке покриття може мати різну конфігурацію - односхилу, двосхилу або мати чотири схили.

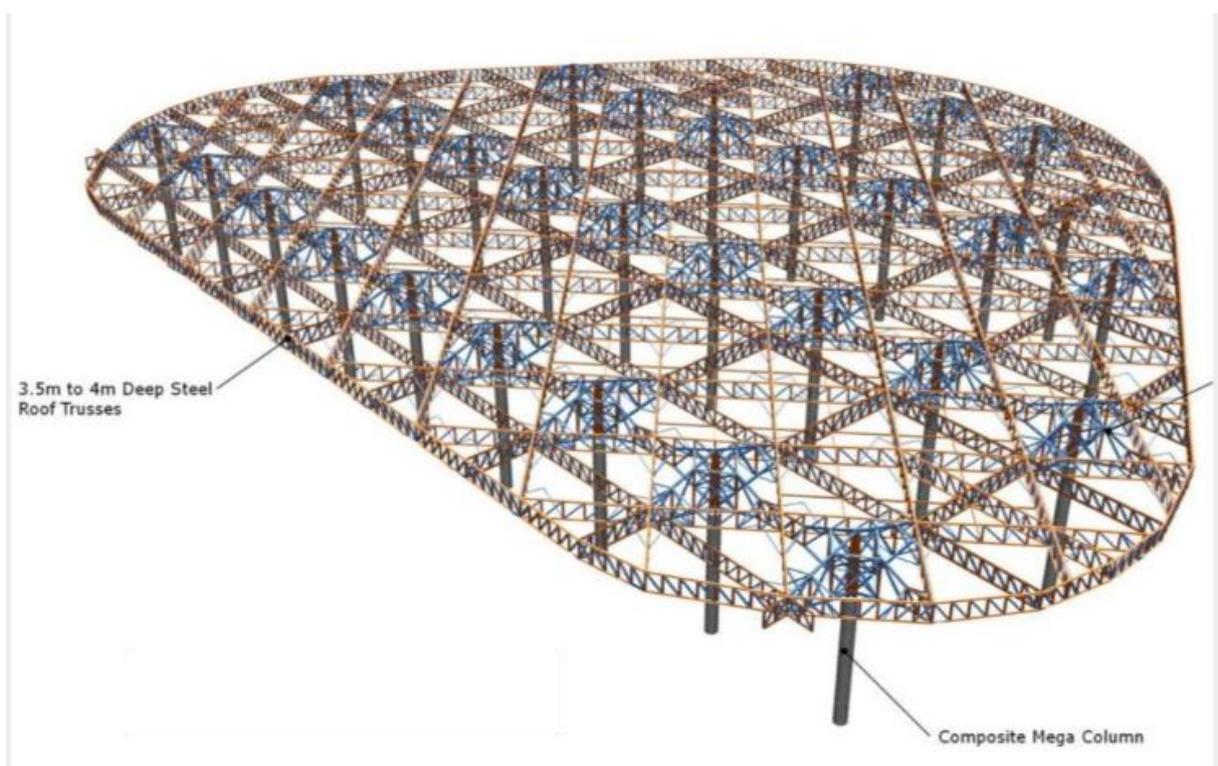


Рис.4.1 Односхиле покриття будівлі із застосуванням перехресних легких ферм (сітка колон 33,9x64 м)

Просторова робота такого покриття забезпечується завдяки зв'язкам та фермам, розташованим у двох напрямках, які приймають зовнішні навантаження. Будь-яке навантаження, прикладене до довільної точки покриття, спричиняє реакцію всієї системи, що підвищує її несучу здатність і жорсткість, а також зменшує матеріаломісткість конструкції. Збільшення жорсткості покриття призводить до зниження зусиль, які діють на окремі його елементи, що дозволяє використовувати тонкостінні сталеві профілі з меншим споживанням сталі у порівнянні із суцільностінчастими прокатними балками.

Ферми, що входять до складу перехресної системи, можуть мати форму трикутника, трапеції або прямокутника.

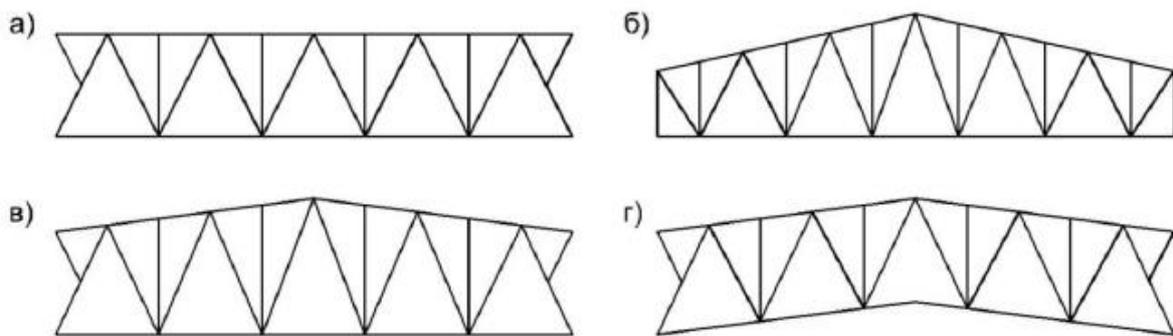


Рис. 4.2 Типи ферм для перехресного перекриття: а - з паралельними поясами, б, в - з висхідним верхнім поясом, г - з висхідним верхнім і нижнім поясом

Решітка таких ферм розглядається як розкісна. Ферми виконані з гнутих тонкостінних профілів, при цьому поперечні перерізи елементів можуть відрізнятися, але найбільш поширеними є [-подібні профілі – окремі для решітки та спарені для поясів ферми.

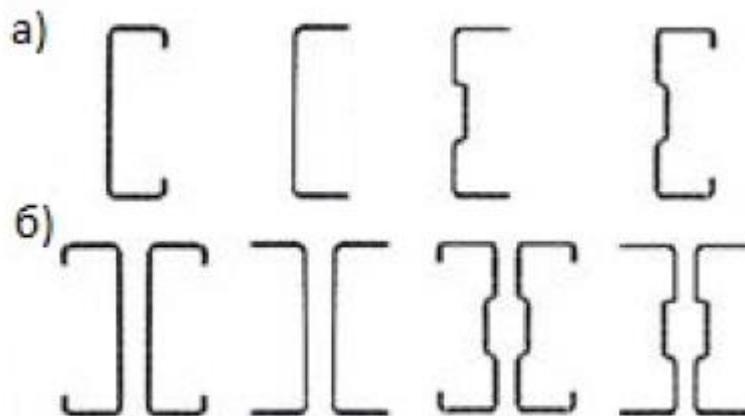


Рис. 4.3 Перетини: а - одиночних і б - спарених профілів

Оскільки ферми реагують лише на навантаження, що діють у межах їхньої площини, їх потрібно фіксувати в цій площині. Верхні пояси ферм закріплюють прогонами, які несуть елементи покрівлі, тоді як для стабілізації нижнього поясу, що відповідає за прийом горизонтальних навантажень і забезпечує спільну роботу каркасних рам, застосовують горизонтальні зв'язки. Це поєднання конструктивних елементів формує просторовий стійкий блок.

Оптимальними розмірами таких блоків вважають просторові одиниці розмірів  $18 \times 18$ ,  $24 \times 24$  та  $24 \times 18$  м.

Грані блоку задаються вертикальними фермами, розташованими за ортогональними напрямками, горизонтальними зв'язками, встановленими на нижніх поясах ферм, та несучими елементами покрівлі на верхніх поясах. Оскільки поперечний переріз цього блоку є замкнутим, він має високу жорсткість при скручуванні та вигині в поперечному напрямку, що запобігає втраті загальної стійкості. Загальна стабільність конструкції забезпечується створенням кількох таких просторових блоків по периметру, до яких кріпляться додаткові ферми, що унеможливають горизонтальне переміщення поясів і гарантують їхню стійкість.

З метою обґрунтування доцільності використання покриття з легких перехресних ферм планується провести розрахунки та порівняння витрат сталі для двох варіантів: класичної конструкції (ферми з гарячекатаних

масивних профілів) і конструкції з перехресними прокатними балками. Очікується, що скінченоелементний аналіз покаже значну економію металу при застосуванні легких ферм.

## РОЗДІЛ 5

### СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНІ СХЕМИ В РАМКАХ ВИКОНАННЯ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

#### - 5.1 Скінченоелементні моделі конструкцій сталевого покриття каркасної будівлі

Розглянемо скінченоелементні розрахункові моделі можливих конструктивних вирішень покриття розміром 18,0x24,0 м для промбудівлі.

##### *Перша модель.*

Перша модель являє собою «класичне» поширене вирішення покриття промислової будівлі. Воно вирішене у вигляді крокв'яних конструкцій ферм Ф-1 прольотом 18,0 м. В торцях диска перекриття 18,0 x24,0 м розташовані зв'язкові ферми Ф-2 довжиною 6,0 м. По нижнім поясам ферм Ф-1 та Ф-2 розташовано горизонтальні зв'язки жорсткості (рис.5.1).

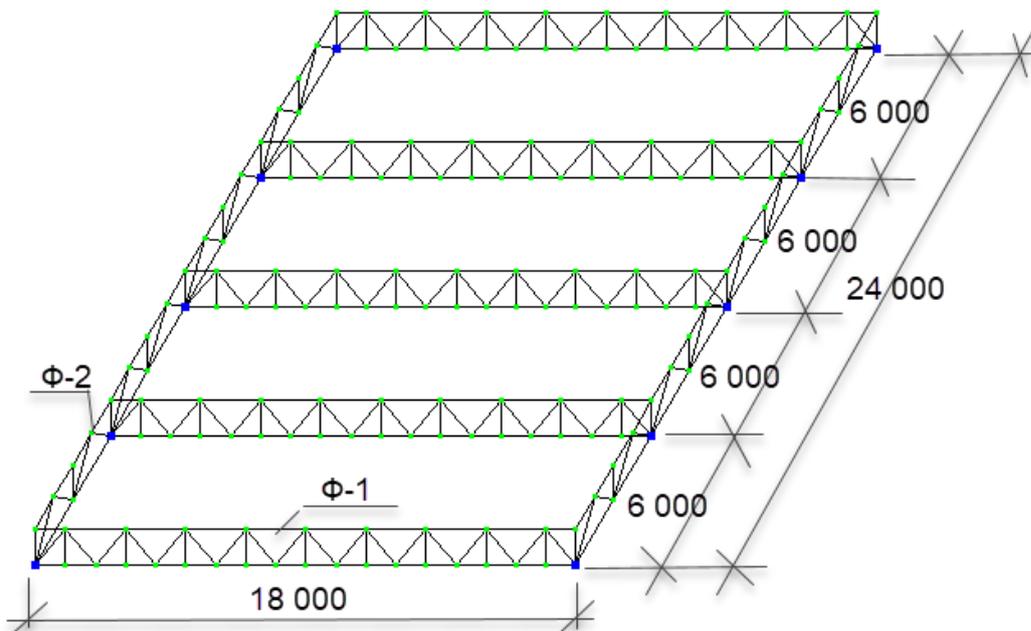


Рис.5.1 Фрагмент скінченоелементної моделі №1 - схема розташування крокв'яних Ф-1 та зв'язкових ферм Ф-2

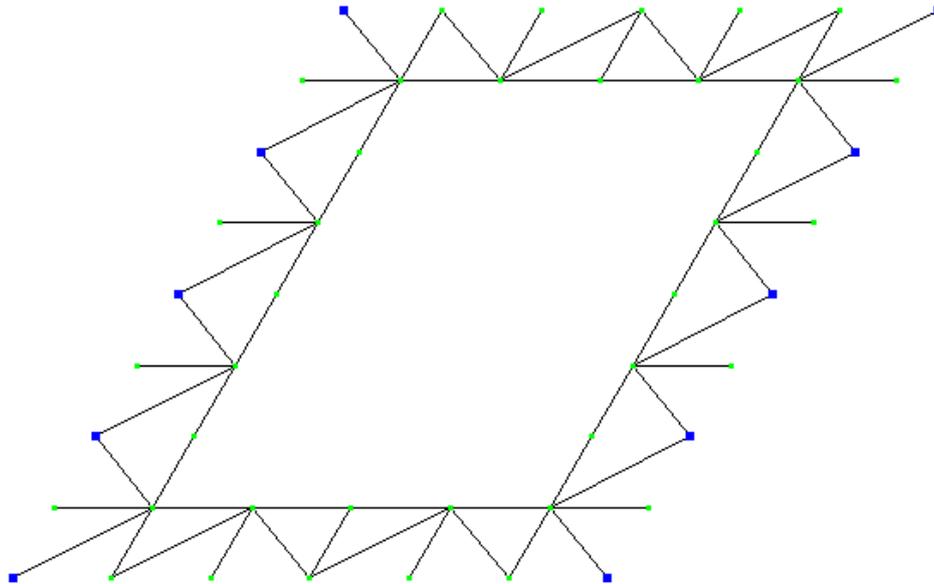


Рис.5.2 Горизонтальні зв'язки жорсткості по нижньому поясу ферм

По верхнім поясам крокв'яних ферм Ф-1 розташовані прогони покриття. Ці елементи теж є елементами жорсткості всієї конструкції (див. рис.5.3).

Всі елементи такої моделі покриття виконані із гарячекатаних сталевих профілів за сортаментами (табл. 5.1).

Схема розташування ферм за моделлю №1 обумовлює роботу покриття в площині крокв'яних ферм Ф-1 та являє собою так звану схему перекриття, що працює в одному напрямку (однонаправлене перекриття). Зусилля  $N$  максимальні виникають в крокв'яних фермах Ф-1.

На рис.5.3 наведено скінченоелементну та просторову розрахункові схеми покриття за моделлю №1.

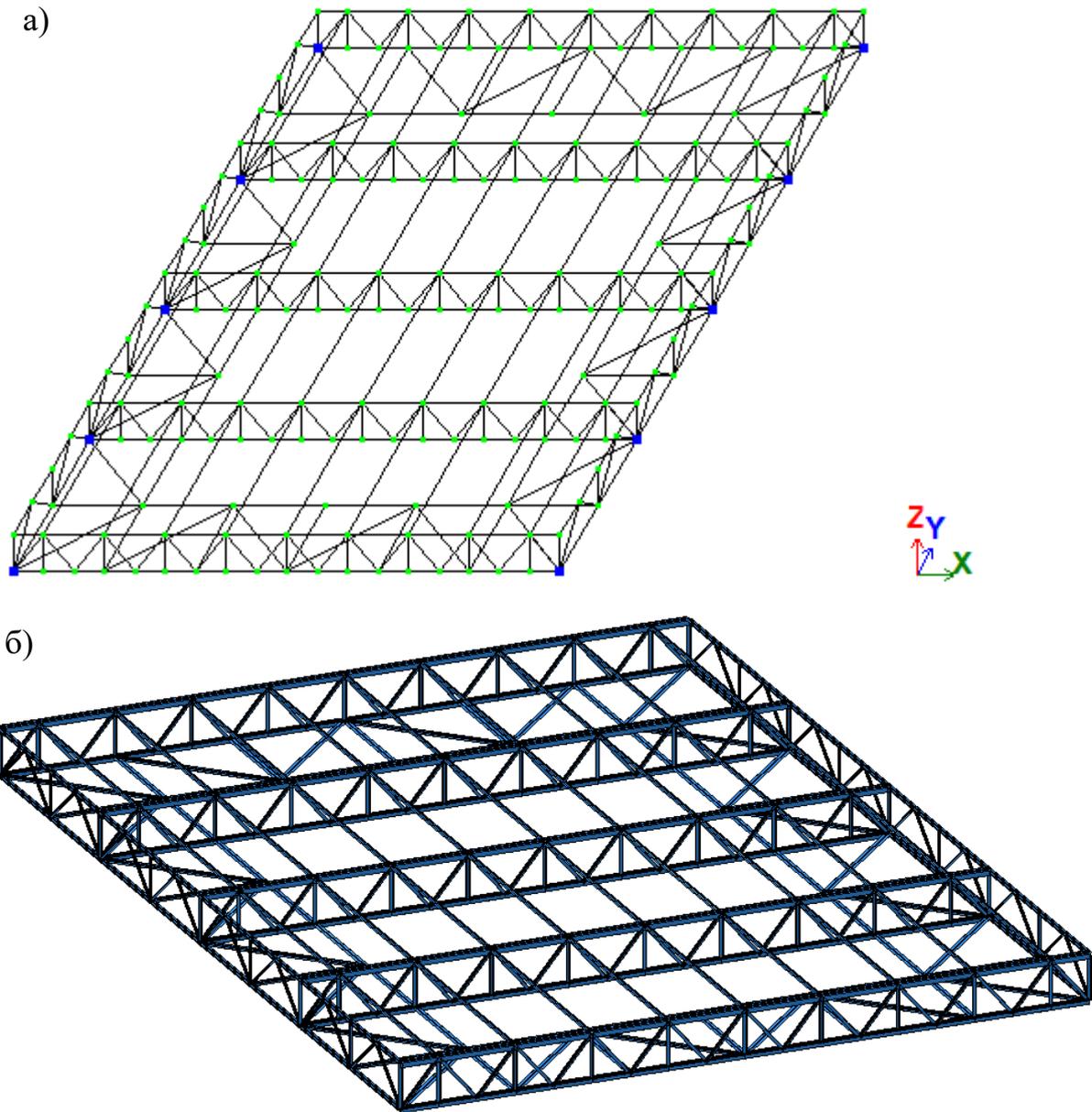


Рис. 5.3 Модель покриття №1, виконана із гарячекатаних сталевих профілів: скінченоелементна схема-а; просторова модель покриття-б  
*Друга модель.*

Друга модель являє собою ефективне перекриття із легких тонкостінних сталевих профілів. Профілі ЛСТК мають відкриту форму та виготовляються способом холодного формування. Їх особливістю є зазвичай мала товщина стінки профілю, яка знаходиться в межах від 1,5 до 4 мм.

Конструкція покриття за схемою №2 складається з легких перехресних ферм, що являють собою жорсткі прямокутні замкнені блоки

6x12м. Загальна стійкість конструкції досягається шляхом формування декількох просторових блоків вздовж периметра покриття.

Ідея роботи такого покриття полягає в тому, що ферми із ЛСТК, які закріплені із площини по нижньому поясу горизонтальними зв'язками, а по верхньому прогонами утворюють жорсткий диск покриття. Жорсткий диск покриття гарним чином забезпечує просторову роботу каркасу будівлі. Профілі, прийняті для елементів ферм є тонкостінним та мають профіль типу [ та ]]. Жорсткості перерізів для елементів покриття за схемою №2 наведено в табл. 5.2.

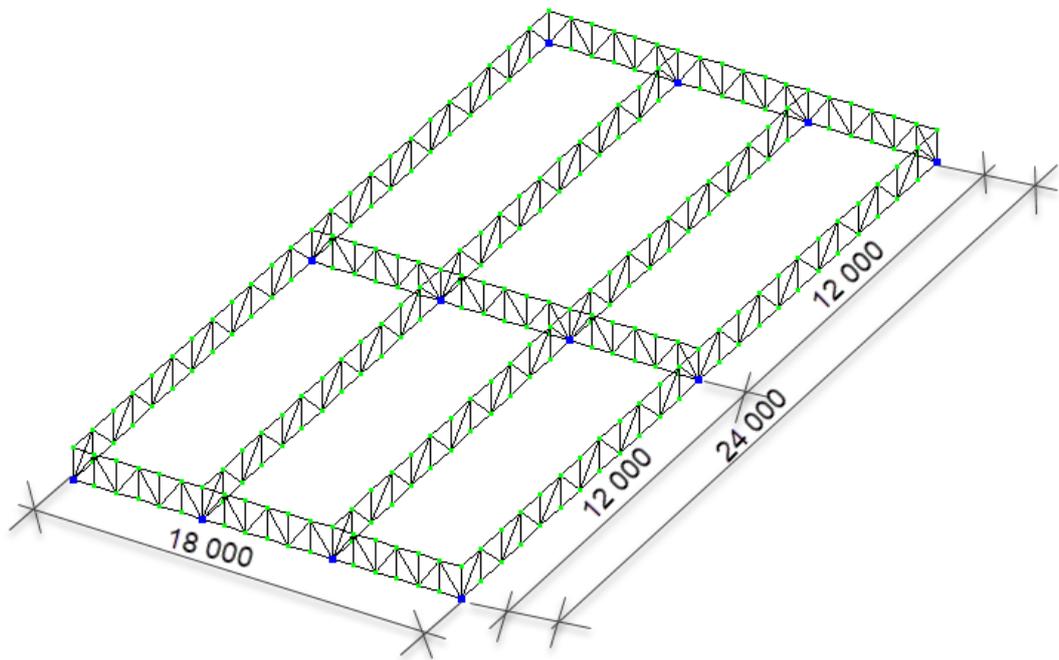


Рис. 5.4 Ферми із ЛСТК формують жорсткий диск покриття (за схемою №2)

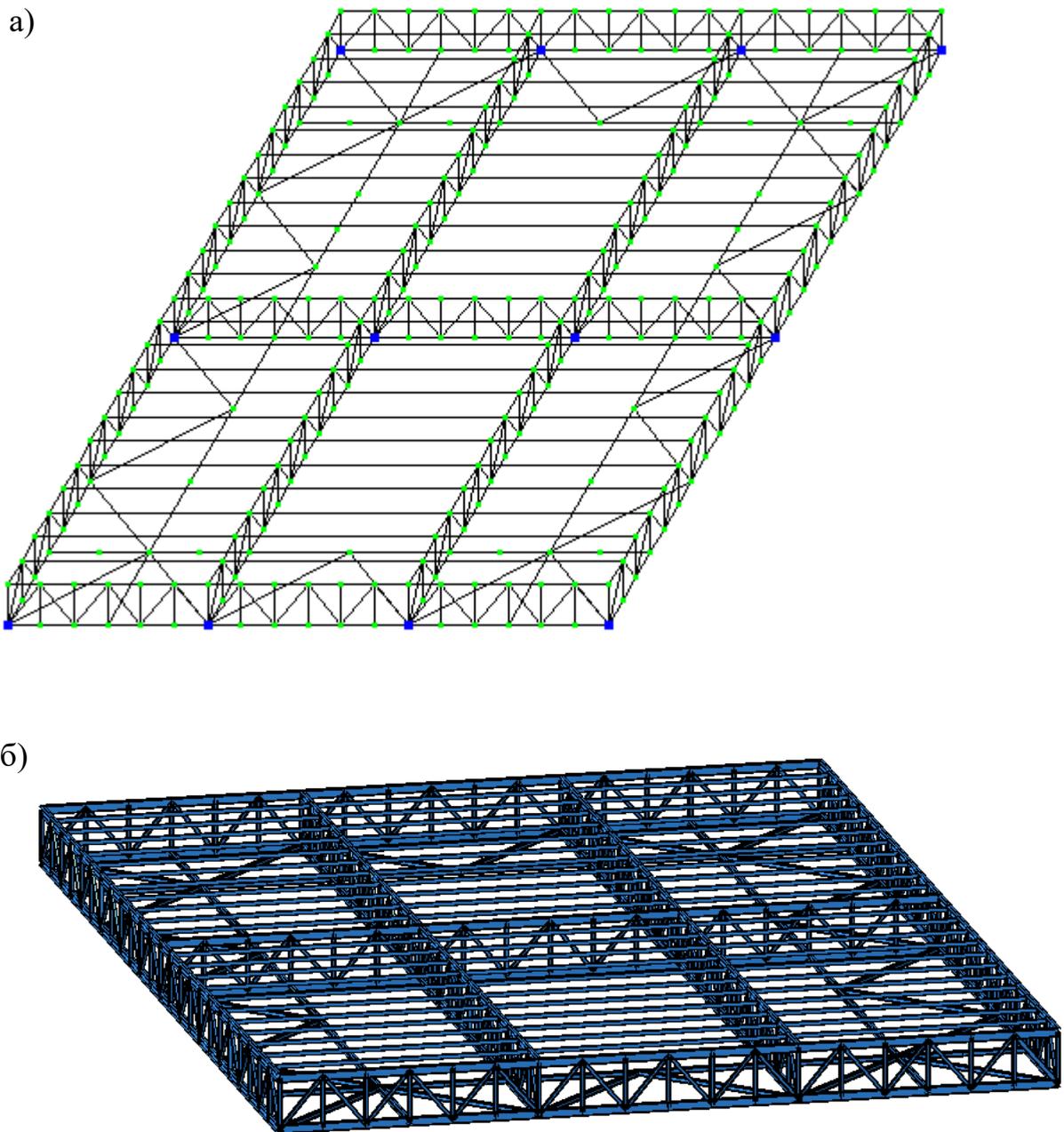
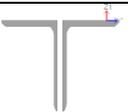
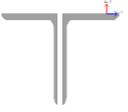
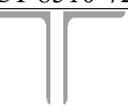


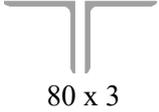
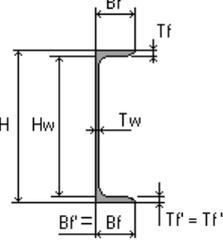
Рис. 5.5 Модель покриття №2, виконана із профілів ЛСТК:  
скінченоелементна схема-а; просторова модель покриття-б

## 5.2 Параметри жорсткості моделей, що досліджуються

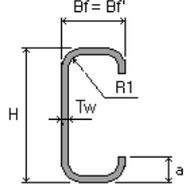
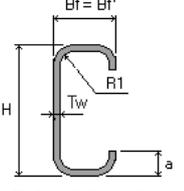
Попередньо, перед першою виконанням статичного розрахунку та при створенні моделей покриття приймемо характеристики жорсткості для конструктивних груп стержнів сталевих кроквяних ферм для обох моделей, що досліджуються. Характеристики жорсткості наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристики жорсткостей конструктивних елементів  
покриття за схемою №1

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м <sup>2</sup>	R, т/м <sup>3</sup>	$\mu$	Сталь С235	q, т/м
1. Верхній пояс ферми Ф-1	 180x110x12 Сталь прокатна кутова нерівнополична (ГОСТ 8510-72)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.053
2. Нижній пояс ферми Ф-1	 140 x 90 x 8 Сталь прокатна кутова нерівнополична (ГОСТ 8510-72)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.028
3. Елементи решітки ферми Ф-1	 75 x 50 x 5 Сталь прокатна кутова нерівнополична кутова (ГОСТ 8510-72)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.0096
4. Верхній пояс ферми Ф-2	 100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополична кутова (ГОСТ 8510-72)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.018
5. Нижній пояс ферми Ф-2	 100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополична кутова (ГОСТ 8510-72)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.028

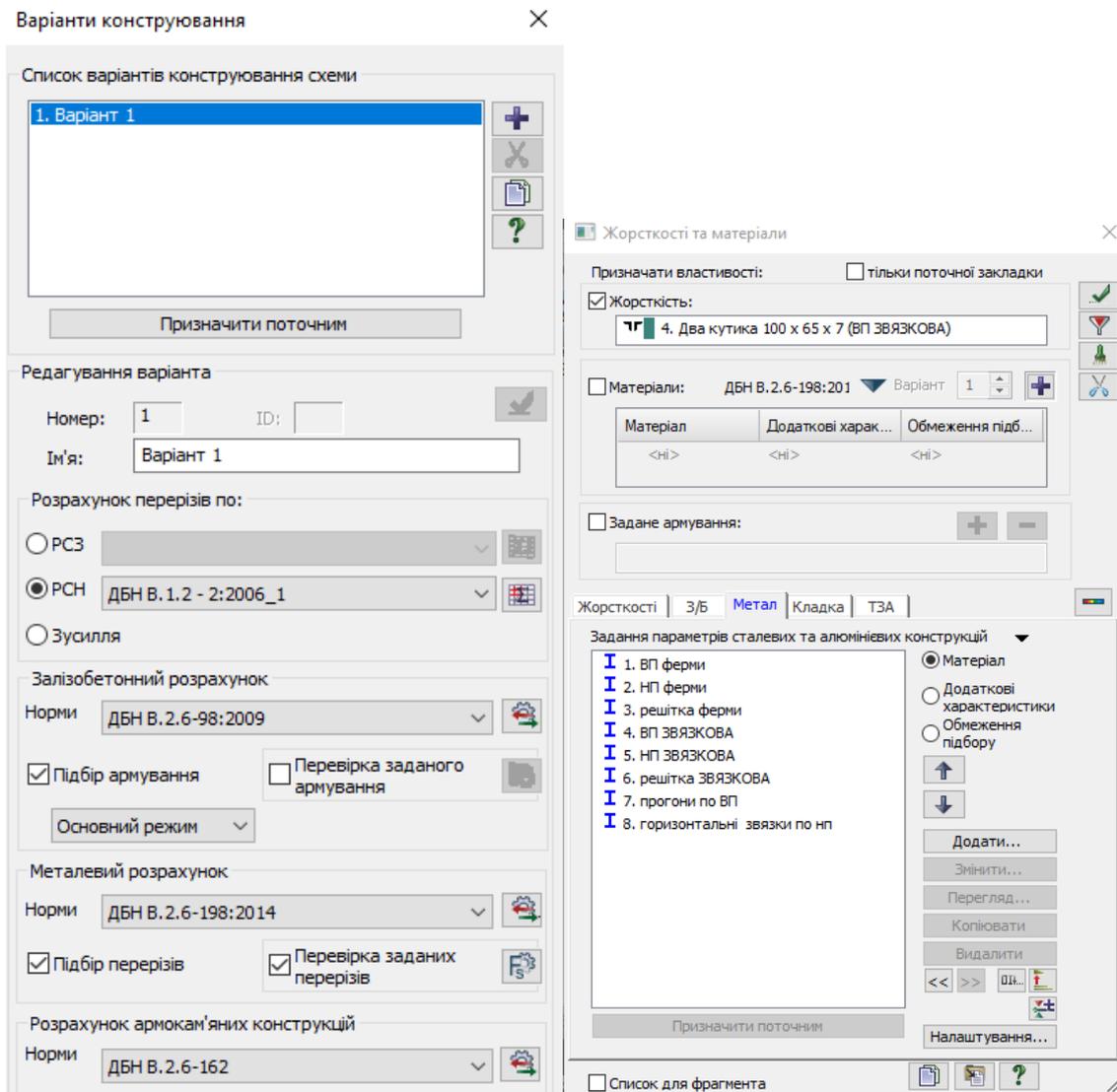
6.Елементи решітки ферми Ф-2	 <p>50 x 32 x 3 Сталь прокатна кутова нерівнополична кутова (ГОСТ 8510-72</p>	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.0096
7. Горизонтальні зв'язки по нижнім поясам ферм	 <p>80 x 3 Куточки сталеві гнуті рівнополичні (Таблиця 1: Ru &lt;= 460 МПа) (ГОСТ 19771-93)</p>	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.00728
8. Прогони	 <p>40x2.5 Швелери сталеві гарячекатані з ухилом внутрішніх граней полиць (ДСТУ 3634:96). Скорочений сортамент Україна Профілі відповідають нормам: ДСТУ 3634:96</p>	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.0086

Таблиця 5.2 – Характеристики жорсткостей конструктивних елементів  
покриття за схемою №2

Назва елемента	Поперечний переріз, см	$E, \text{т/м}^2$	$R, \text{т/м}^3$	$\mu$	Сталь	$q, \text{т/м}$
1. Верхній пояс ферми Ф-1	 200x68x1,5 Профіль [- подібний «Акfabuid» (СТО 02494680- 073-2020)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	350	0.00844
2. Нижній пояс ферми Ф-1	 200x68x1,5 Профіль [- подібний «Акfabuid» (СТО 02494680- 073-2020)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	350	0.00844
3. Елементи решітки ферми Ф-1	 РС 100 х 68 х 3 Профіль [- подібний «Акfabuid» (СТО 02494680- 073-2020)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	350	0.00601
4. Горизонтальні зв'язки по нижнім поясам ферм	 РС 120 х 68 х 3 Профіль [- подібний «Акfabuid» (СТО 02494680- 073-2020)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	350	0.01298
5. Прогони	 РС 100 х 68 х 2	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	350	0.00401

	Профіль С-подібний «Akfabuid» (СТО 02494680-073-2020)					
--	---	--	--	--	--	--

Для автоматизації підбору перерізів у модулі «Метал» кожному елементу розрахункових схем було присвоєно конструктивні параметри згідно з вимогами норм проектування [6] (див. рис. 5.6, б).



а)

б)

Рис.5.6 Вікно варіантів конструювання-а; вікно призначення параметрів металевих конструкцій -б

Під час визначення матеріалів для конструктивних груп стержнів кроквяних ферм моделей для стрижнів верхнього та нижнього поясів застосували тип «елемент поясу ферми», а для елементів решітки – тип «елемент решітки ферми». Розрахунок сталевих конструкцій проводилися в їхній пружній стадії роботи.

### 5.3 Навантаження, що призначається

Основними навантаженнями, що враховуються при розрахунку оболонки, є власна вага стержньової оболонки, конструкції покрівлі та снігове навантаження. За даними дослідження [4], вплив вітрових навантажень можна знехтувати, оскільки їхній вклад становить лише близько 1%, що незначно впливає на напружено-деформований стан оболонки. Оскільки будівля зводиться в місті Суми, нормативне значення снігового навантаження за нормами [7] складає 0,164 т/м<sup>2</sup>. У розрахунку передбачено три типи завантаження (див. табл. 5.3).

Таблиця 5.3 Завантаження, що прийнято до розрахунку

№ завантаження	Характеристика
№ 1	- Тип - постійне, власна вага плити, що задавалася автоматично ПК Ліра-САПР й зазнавала змін на кожній ітерації підбору перетинів груп конструктивних елементів
№ 2	Тип - постійне та являє собою власну вага конструктивних шарів покрівлі
№ 3	Тип – тимчасове, снігове для м. Суми

Таблиця 5.4 Збір навантажень на 1м<sup>2</sup> покриття

Назва	Характеристичне значення навантаження, (кН/м <sup>2</sup> )	Коеф. надійності за навантаженням	Розрахункове навантаження

		$\gamma_f$	ння кН/м <sup>2</sup>
<b>I. Постійні навантаження</b>			
Власна вага конструкції (згідно призначених жорсткостей)	Автоматично визначається в ПК «Ліра-САПР»		
Сендвіч-панель з утеплювачем мінватою товщиною 150 мм	0,115	1.05	0,121
<b>ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ:</b>	0,115		0,121
<b>II. Тимчасове навантаження</b>			
Снігове навантаження (за ДБН В.1.2-2:2006, додаток Е) для м. Суми (1640 Па=1,64 кН/м <sup>2</sup> )	1,64	1.14	1,87
<b>Повне навантаження</b>	2,755		1,991

На рис. 5.7 наведено діалогове вікно призначення навантажень на структурну плиту.

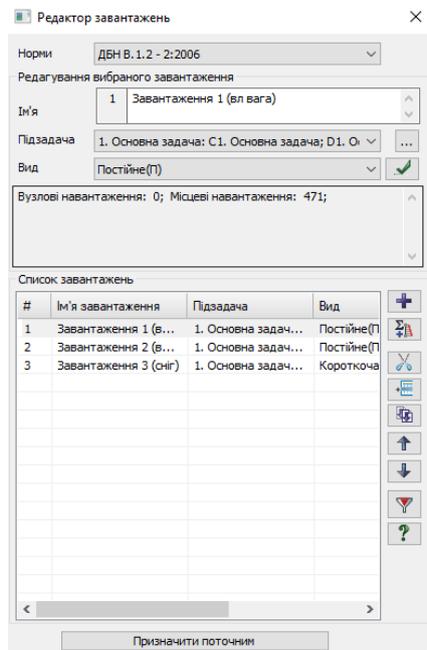
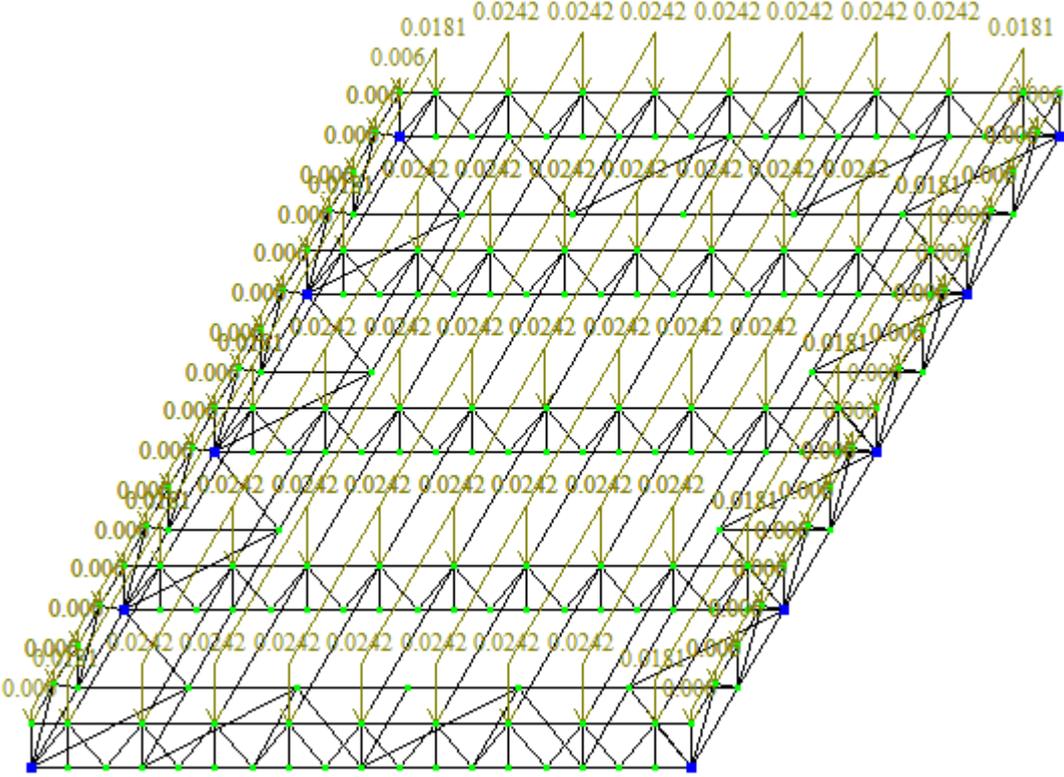
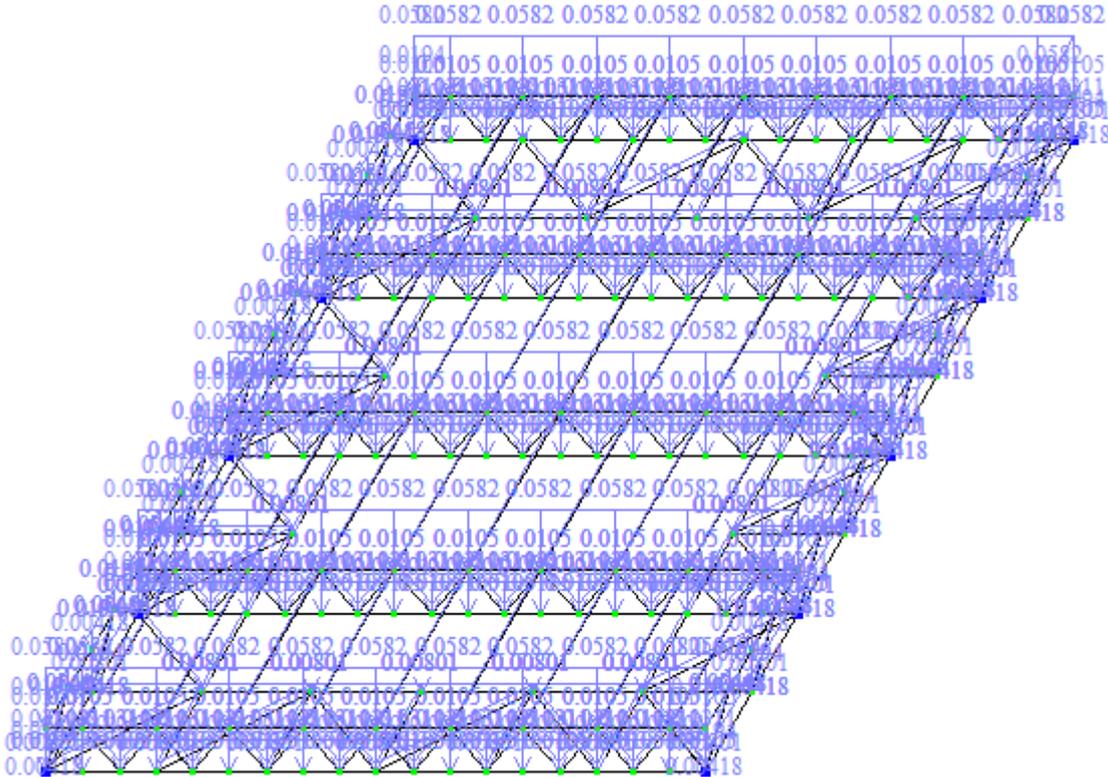


Рис. 5.7 Вікно призначення навантажень на структурну плиту

У навантаженнях №2 та №3 рівномірно розподілене по площі навантаження перетворюється на погонні навантаження для кожного прогону покриття, виходячи з ширини відповідної вантажної площі. На рис.

5.8 представлені всі типи навантажень, що застосовуються до прогонів у розрахункових моделях.



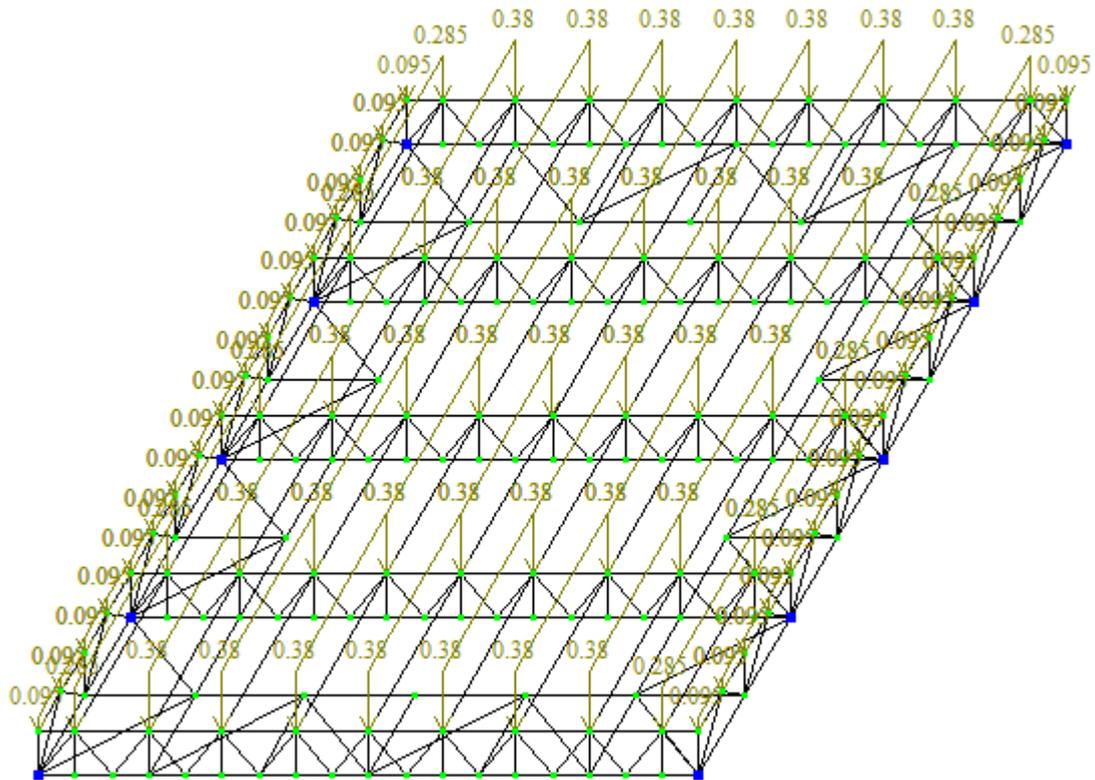


Рис.5.8 Завантаження, що діє на модель покриття за схемою №1: власна вага конструкції -а; вага конструкції покрівлі -б; снігове навантаження - в

## РОЗДІЛ 6

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Порівняння результатів розрахунків, виконаних у модулі ЛПР-Візор, дає можливість обрати оптимальнішу модель серед двох досліджуваних, виходячи з величини осьових зусиль  $N$  та максимальних вертикальних деформацій структури  $f_z$ .

#### 6.1 Деформативність розрахункових моделей

При прийнятих показниках жорсткостей профілів елементів, згідно табл. 5.1 та 5.2, розрахуємо дві розрахункові моделі. Оцінювання параметрів напружено-деформованого стану моделей здійснюється за методикою

розрахункового сполучення навантажень (рис.6.1), тобто від найбільш несприятливої їх комбінації.

На рис. 6.1 зображено мозаїку переміщень вузлів вздовж осі Z від РСН2 для моделей, що досліджуються.

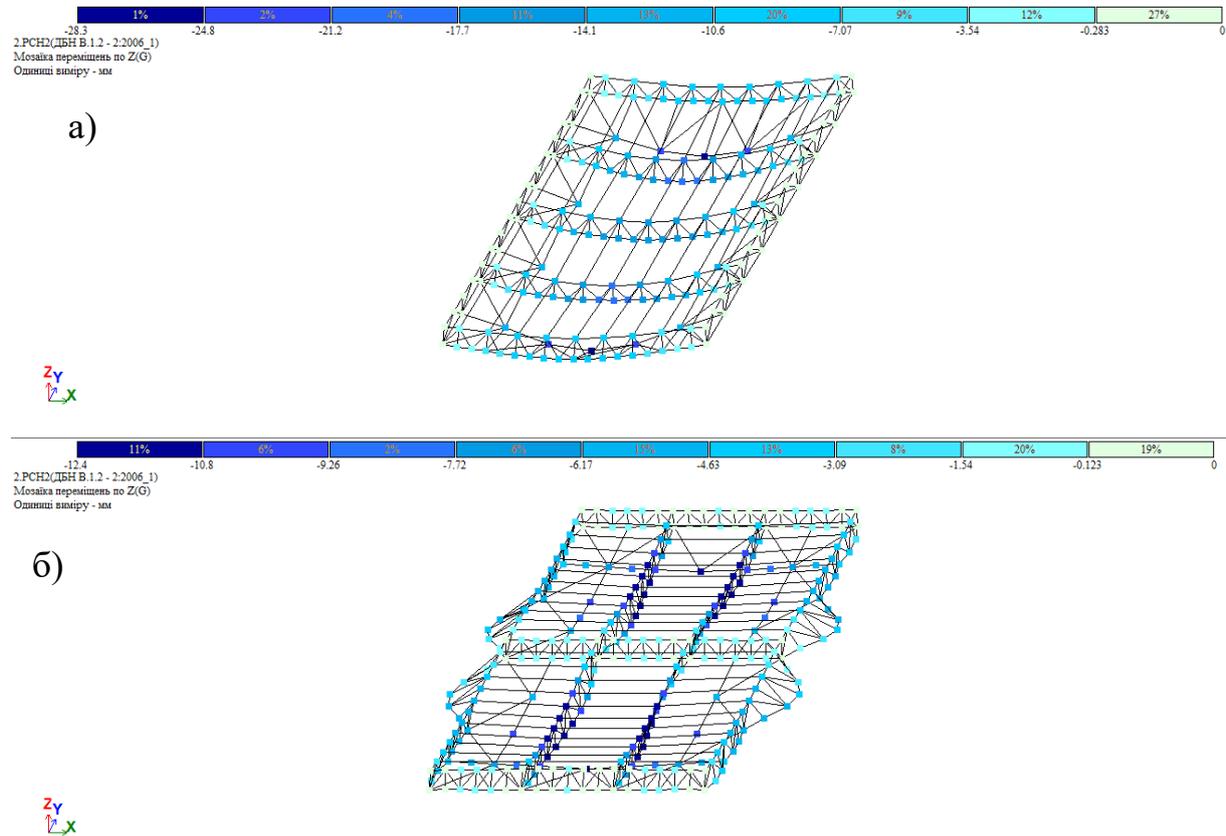


Рис.6.1 Мозаїка переміщень вузлів  $f_z$  від РСН 2 для : схеми №1 -а; схеми №2-б

В таблиці 6.1 наведено максимальні переміщення  $f_z$  вузлів скінченоелементних схем.

Таблиця 6.1. Максимальні переміщення  $f_z$  вузлів скінченоелементної схеми від РСН2

№ сполучення навантаження	Схема №1	Схема №2
РСН 1	-33,2	-6,62
РСН2	-28,3	-12,4
РСН3	-28,8	-11,3

На рис. 6.2 наведено максимальні переміщення вузлів  $f_z$  в СЕ моделях конструктивів покриття від РСН2.

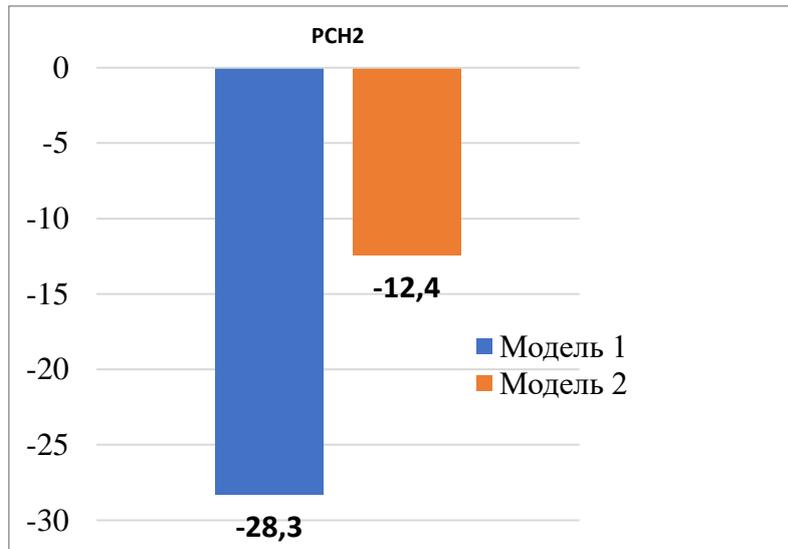


Рис. 6.2 Максимальні переміщення вузлів  $f_z$  в скінченоелементних моделях конструкцій покриття від РСН2

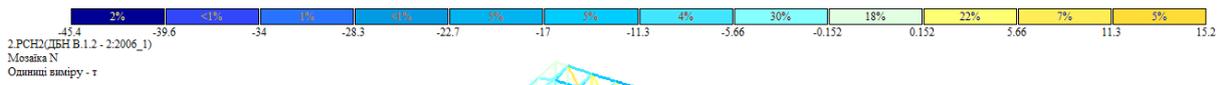
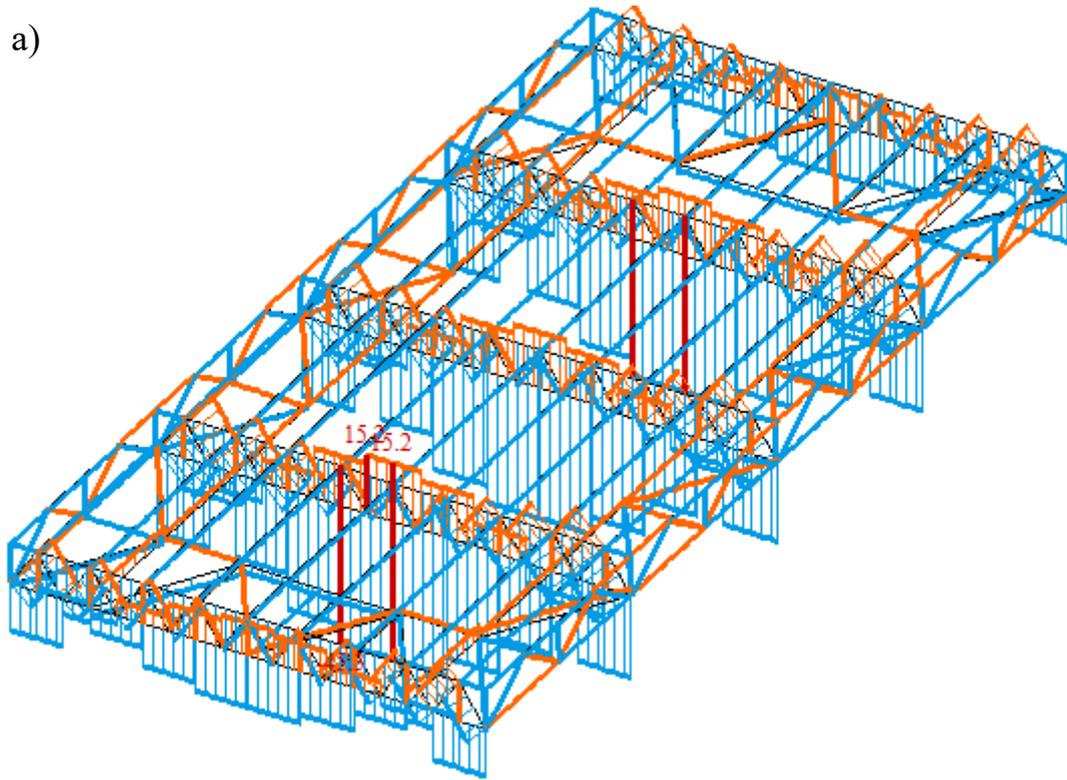
Максимальний вертикальний прогин є найменшим для моделі №2. Усі максимальні вертикальні прогини для усіх розрахункових схем знаходяться в допустимих межах.

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

## 6.2 Напружений стан моделей, що досліджуються

На рис.6.3 наведено епюри зусиль в стержнях та мозаїку осьових зусиль  $N$  в стержньових елементах конструкції від РСН 2. Так, верхній пояс кроквяної ферми працює на стиск, нижній – на розтяг, а стержні решітки характеризуються знакозмінним значенням.

а)



б)

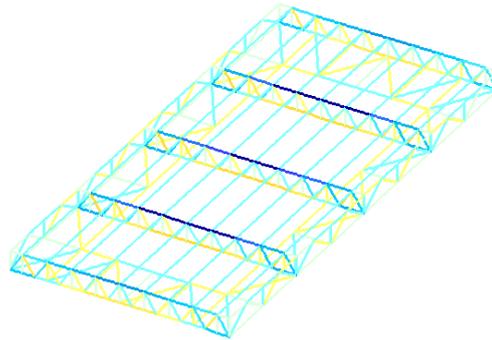
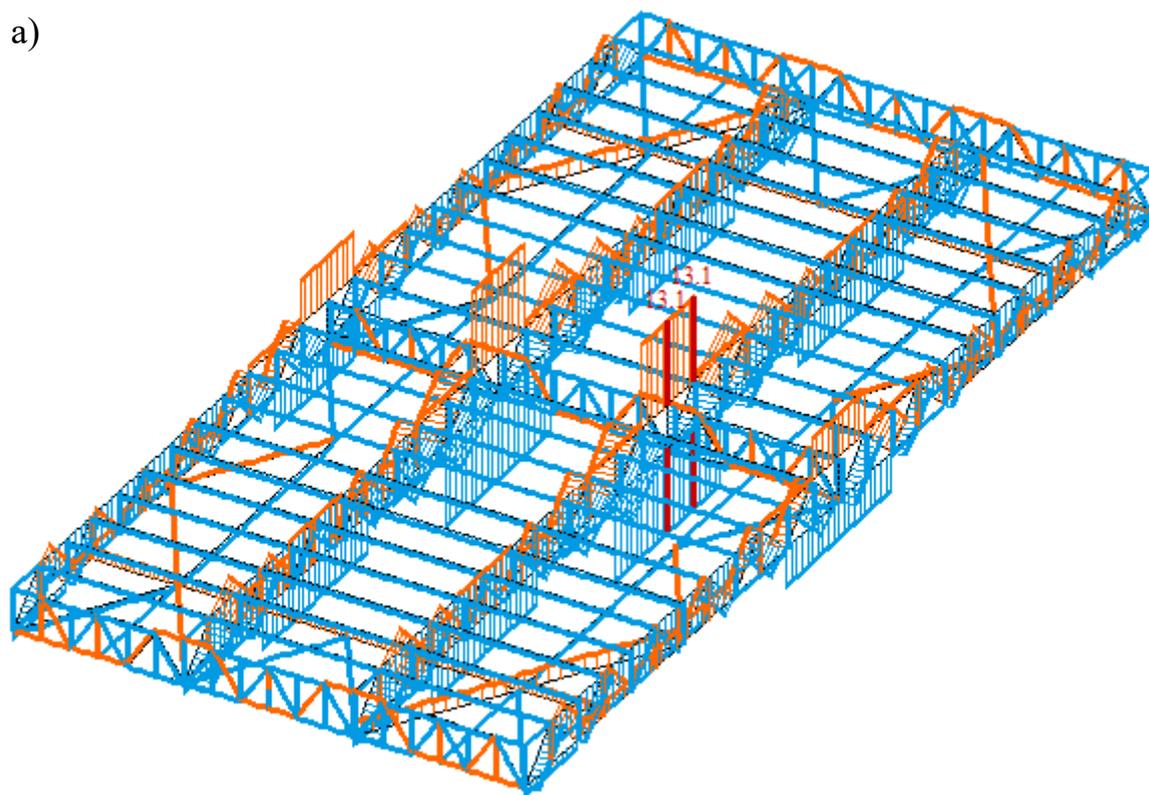


Рис.6.3 Епюри осьових сил  $N$  в елементах схеми №1-а; мозаїка осьових зусиль  $N$  в елементах схеми №1-б

a)



2.PCH2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Мозаїка N  
Оптимізація - r

б)

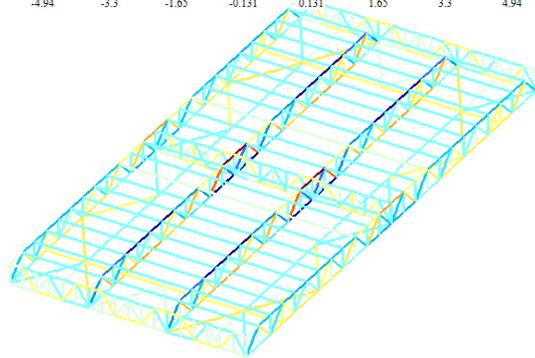


Рис.6.4 Епюри осьових сил N в елементах схеми №2-а; мозаїка осьових зусиль N в елементах схеми №2-б

На рис. 6.5 наведено епюри зусиль N для елементів конструктивних груп – верхнього поясу, нижнього поясу, елементів решітки) для двох розрахункових схем, що досліджуються.

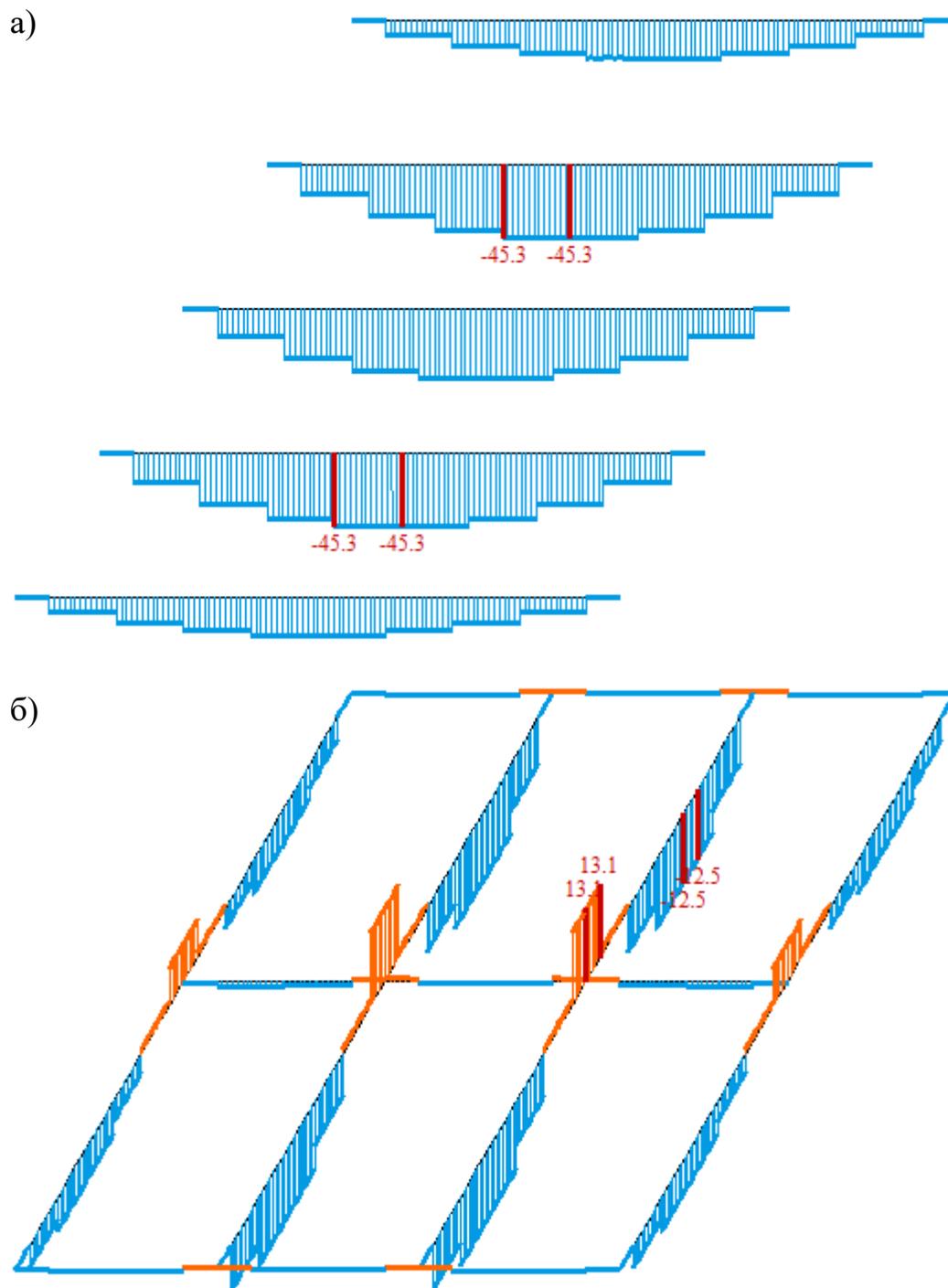


Рис. 6.5 Епюри зусилля  $N$  у верхньому поясі ферм Ф-1: для моделі №1-а;  
для моделі №2-б

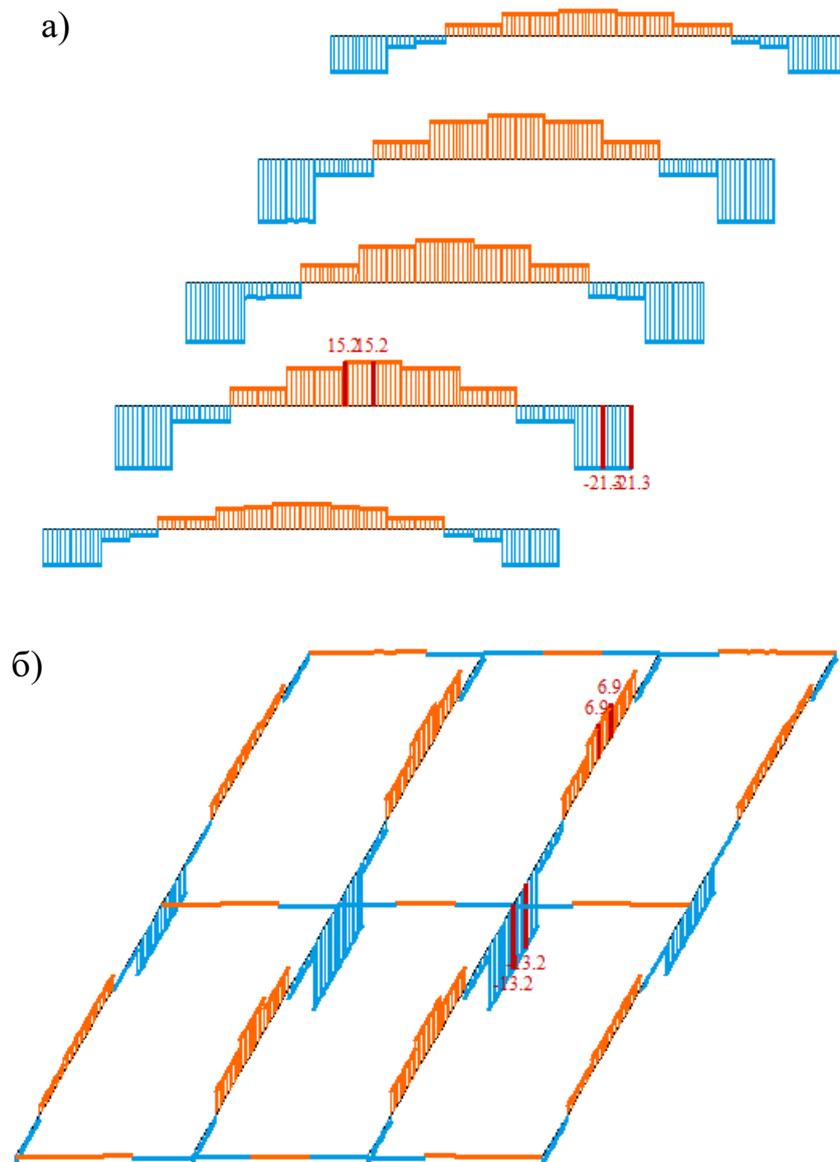


Рис.6.6 Епюри зусилля N у нижньому поясі ферм Ф-1: для моделі №1-а;  
для моделі №2-б

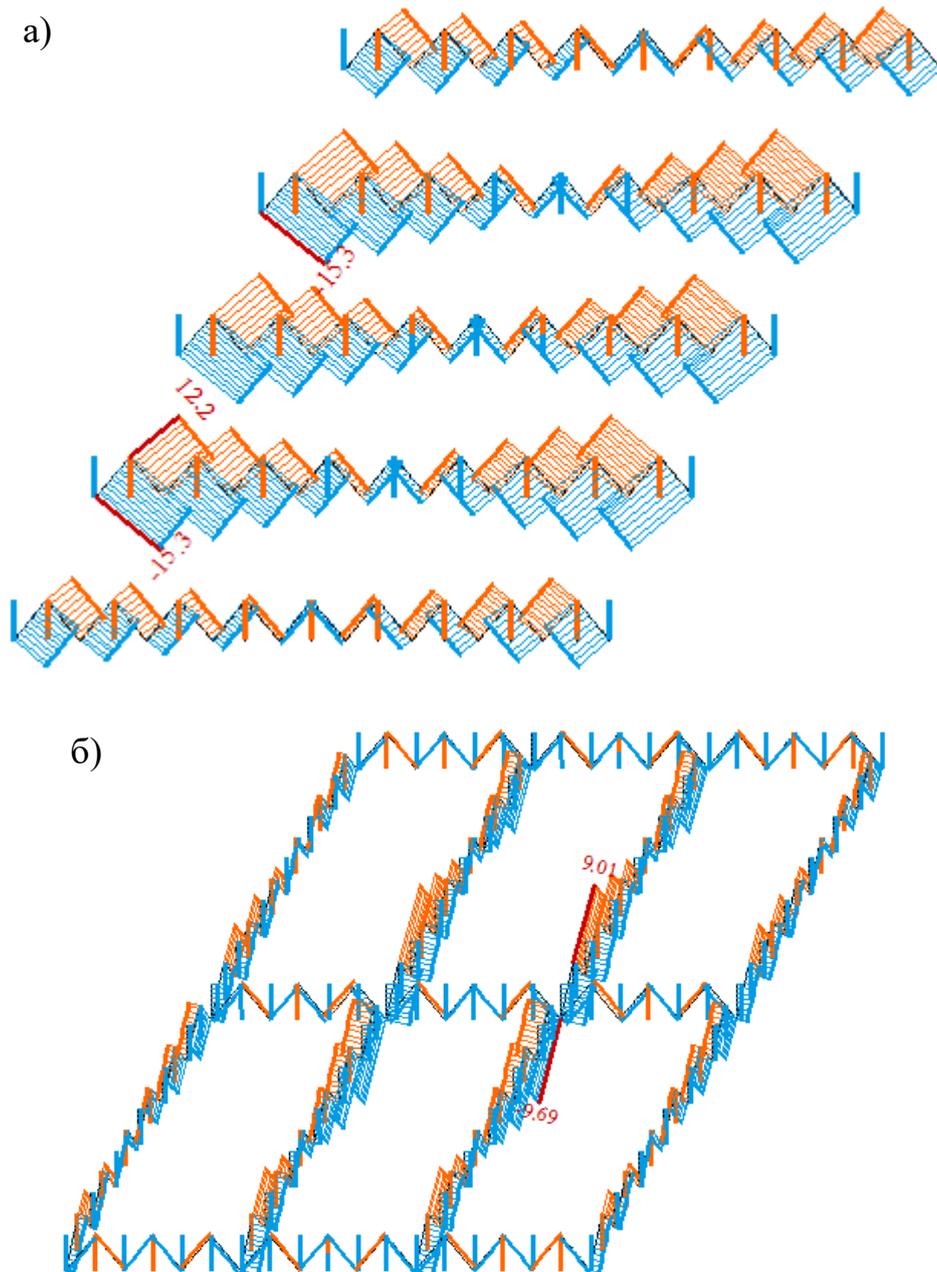
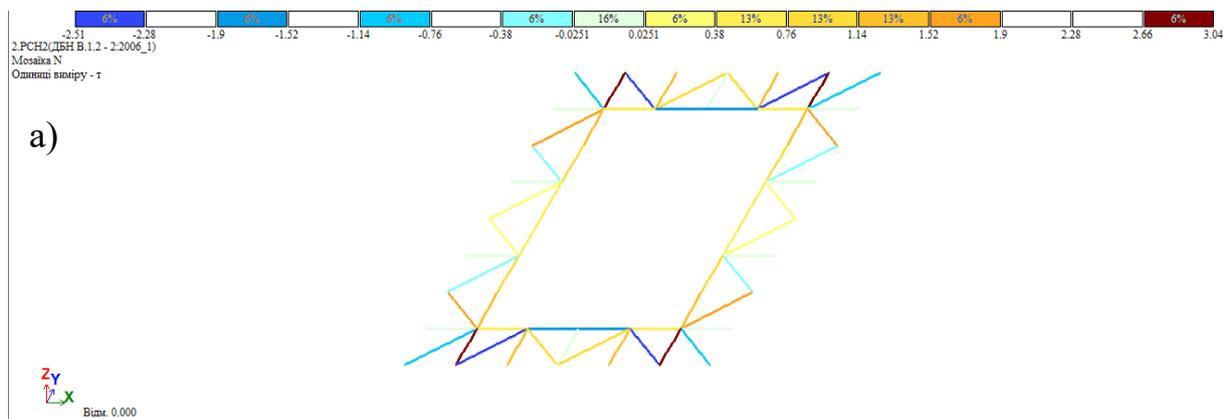


Рис.6.7 Епюри зусилля N в стержнях решітки Ф-1: для моделі №1-а; для моделі №2-б



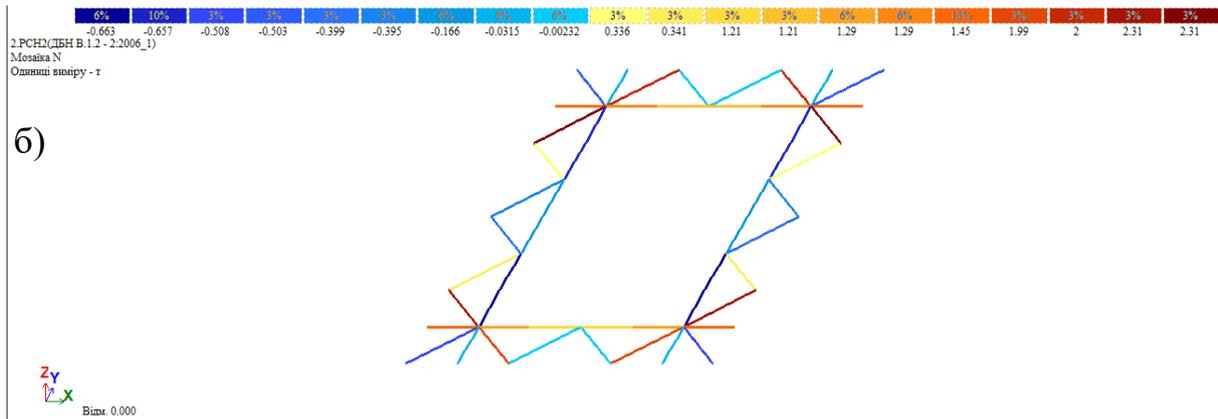


Рис.6.8 Мозаїка зусилля  $N$  в стержнях горизонтальних зв'язків по нижнім поясам ферм: для моделі №1-а; для моделі №2-б

В таблицях 6.2-6.8 наведено максимальні величини осевих сил  $N$  від РСН2 для стержнів верхнього, нижнього поясу та розкосів.

Таблиця 6.2. Максимальні зусилля  $N$  (т) в стержнях верхнього поясу ферми Ф-1

№ РСН	Схема №1		Схема №2	
РСН 1	-6,75	-0,03	-1,55	1,46
РСН 2	-45,3	0	-12,5	13,08
РСН 3	-41,5	-0,07	-11,4	11,9

Таблиця 6.3. Максимальні зусилля  $N$  (т) в стержнях нижнього поясу ферми Ф-1

№ РСН	Схема №1		Схема №2	
РСН 1	-3,14	2,19	-1,55	0,802
РСН 2	-21,3	15,2	-13,2	6,91
РСН 3	-19,5	13,9	-12	6,3

Таблиця 6.4 Максимальні зусилля  $N$  (т) в стержнях решітки ферми Ф-1

№ РСН	Схема №1		Схема №2	
РСН 1	-2,37	1,88	-1,07	0,999
РСН 2	-15,3	12,3	-9,7	9,02
РСН 3	-14	11,2	-8,84	8,21

Таблиця 6.5. Максимальні зусилля N (т) в стержнях верхнього поясу ферми Ф-2

№ РСН	Схема №1		Схема №2	
РСН 1	-0,208	0,09	-0,33	0,139
РСН 2	-0,509	0,212	-0,991	0,491
РСН 3	-0,479	0,2	-0,925	0,456

Таблиця 6.6. Максимальні зусилля N (т) в стержнях нижнього поясу ферми Ф-2

№ РСН	Схема №1		Схема №2	
РСН 1	-0,035	0,035	-0,164	0,156
РСН 2	-0,09	0,09	-0,484	0,371
РСН 3	-0,08	0,08	-0,452	0,349

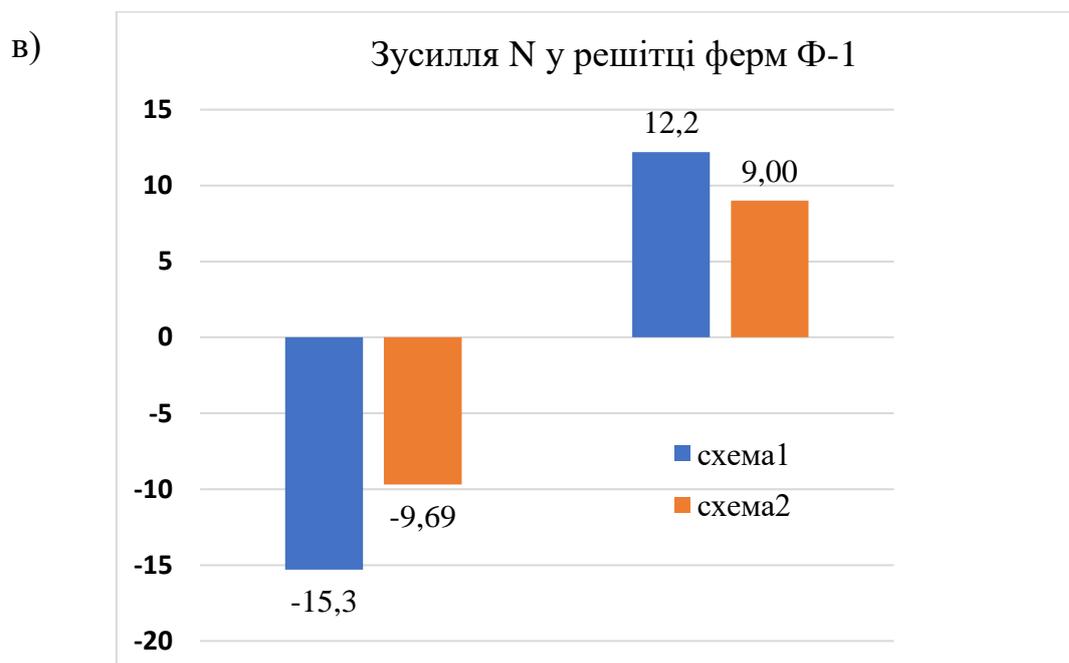
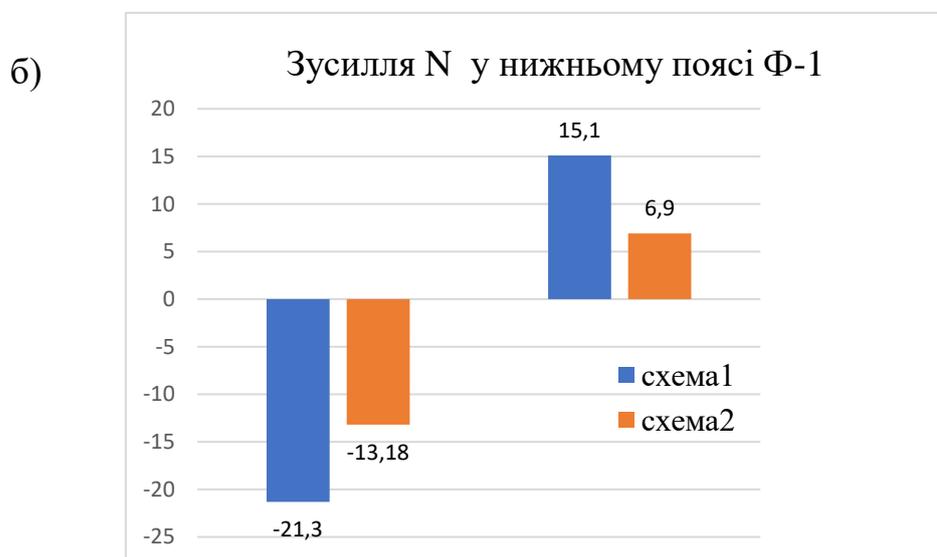
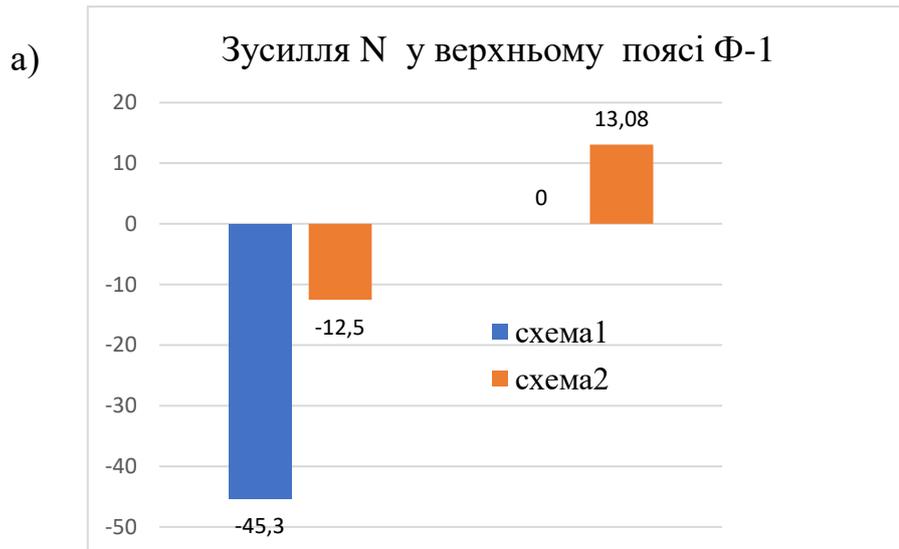
Таблиця 6.7 Максимальні зусилля N (т) в стержнях решітки ферми Ф-2

№ РСН	Схема №1		Схема №2	
РСН 1	-0,211	0,145	-0,318	0,272
РСН 2	-0,589	0,299	-1,47	0,723
РСН 3	-0,552	0,284	-1,34	0,678

Таблиця 6.8 Максимальні зусилля N (т) в стержнях горизонтальних зав'язків по нижньому поясу ферм

№ РСН	Схема №1		Схема №2	
РСН 1	-0,366	0,419	-0,074	0,323
РСН 2	-2,51	3,04	-0,663	2,31
РСН 3	-2,3	2,78	-0,604	2,12

На рис. 6.9- 6.12 приведено епюри діаграми, що відображають дані із таблиць 6.2-6.8.



г)

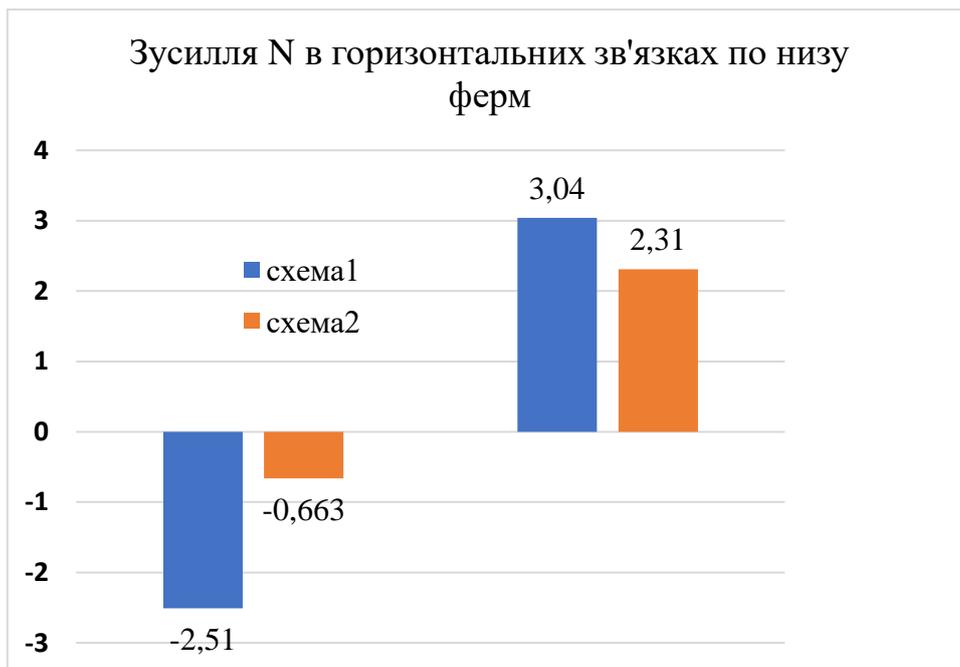
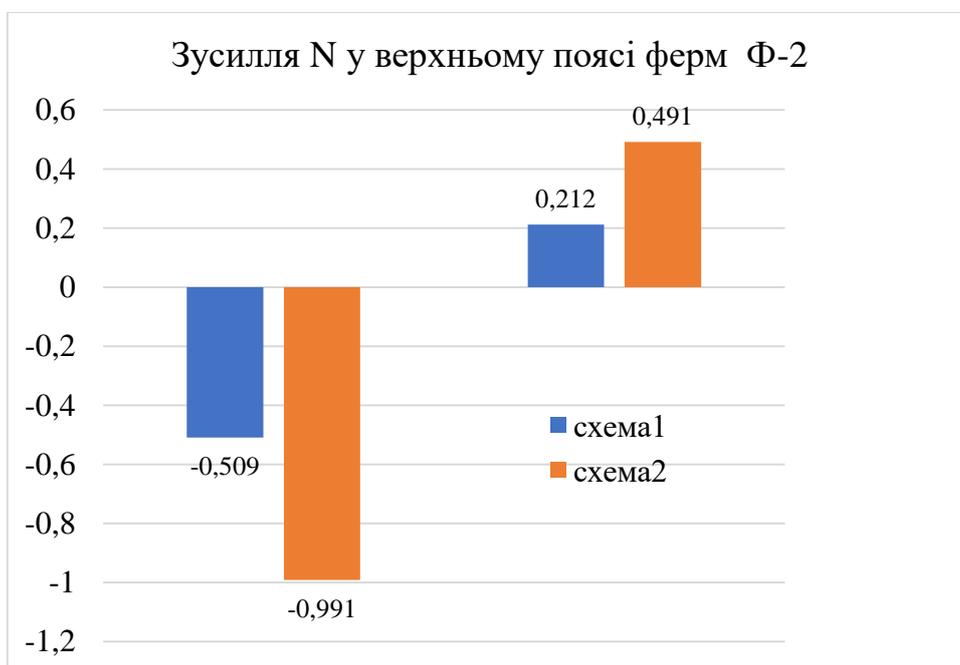
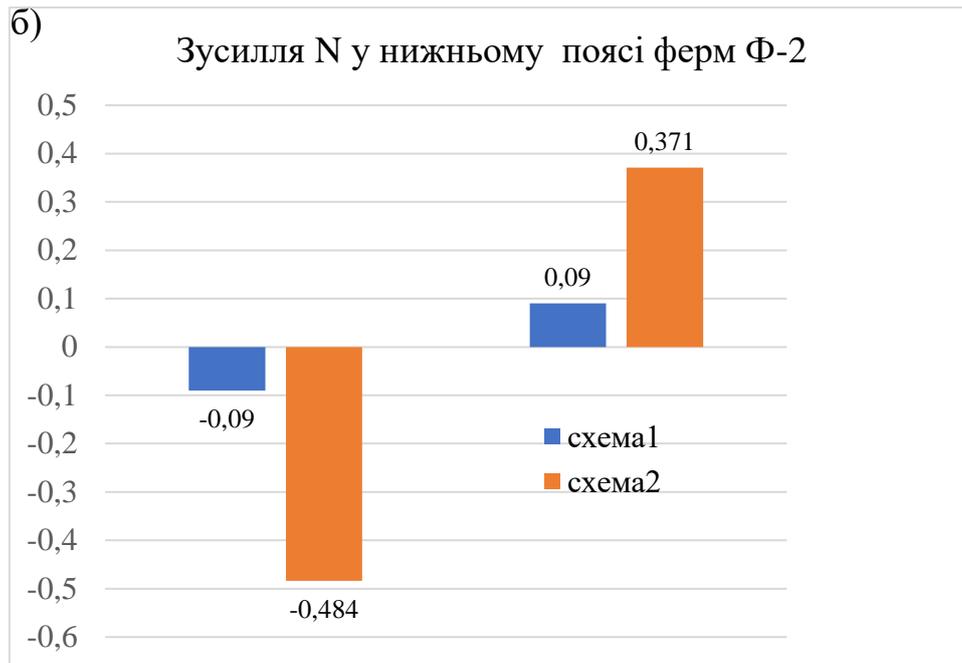


Рис.6.9 Максимальні осьові зусилля N в групах конструктивних елементів розрахункових схем: в елементах верхнього поясу ферм Ф-1 -а; в елементах нижнього поясу ферм Ф-1 -б; в елементах решітки ферм Ф-1 -в; в елементах горизонтальних зв'язків по нижніх поясах ферм Ф-1-г

а)





в)

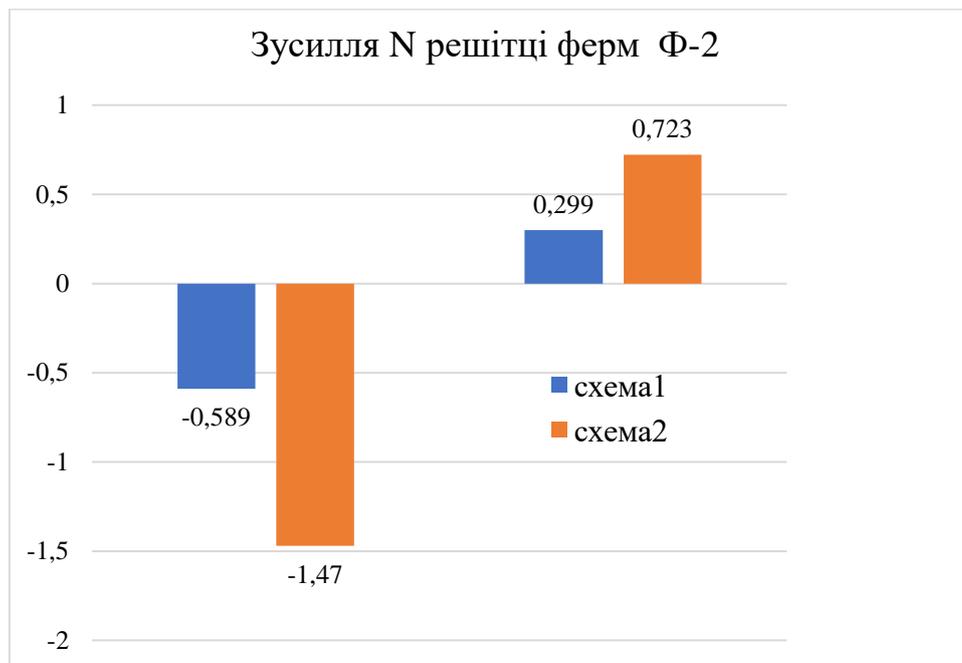


Рис. 6.10 Максимальні осьові зусилля N в групах конструктивних елементів розрахункових схем: в елементах верхнього поясу ферм Ф-2 -а; в елементах нижнього поясу ферм Ф-2 -б; в елементах решітки ферм Ф-2 -в

### 6.3 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються

Коефіцієнт стійкості відображає, наскільки система стійка до зовнішніх збурень або змін умов. Він може бути як позитивним, так і негативним; у випадку від'ємного значення система вважається нестійкою і потребує додаткового статичного аналізу та перегляду конструктивних рішень. Ціла частина цього числа вказує, у скільки разів можна збільшити навантаження на систему, перш ніж вона втратить свою стійкість. На рисунках 6.11–6.13 зображено форми втрати стійкості для двох моделей, а таблиця 6.11 містить їхні коефіцієнти стійкості.

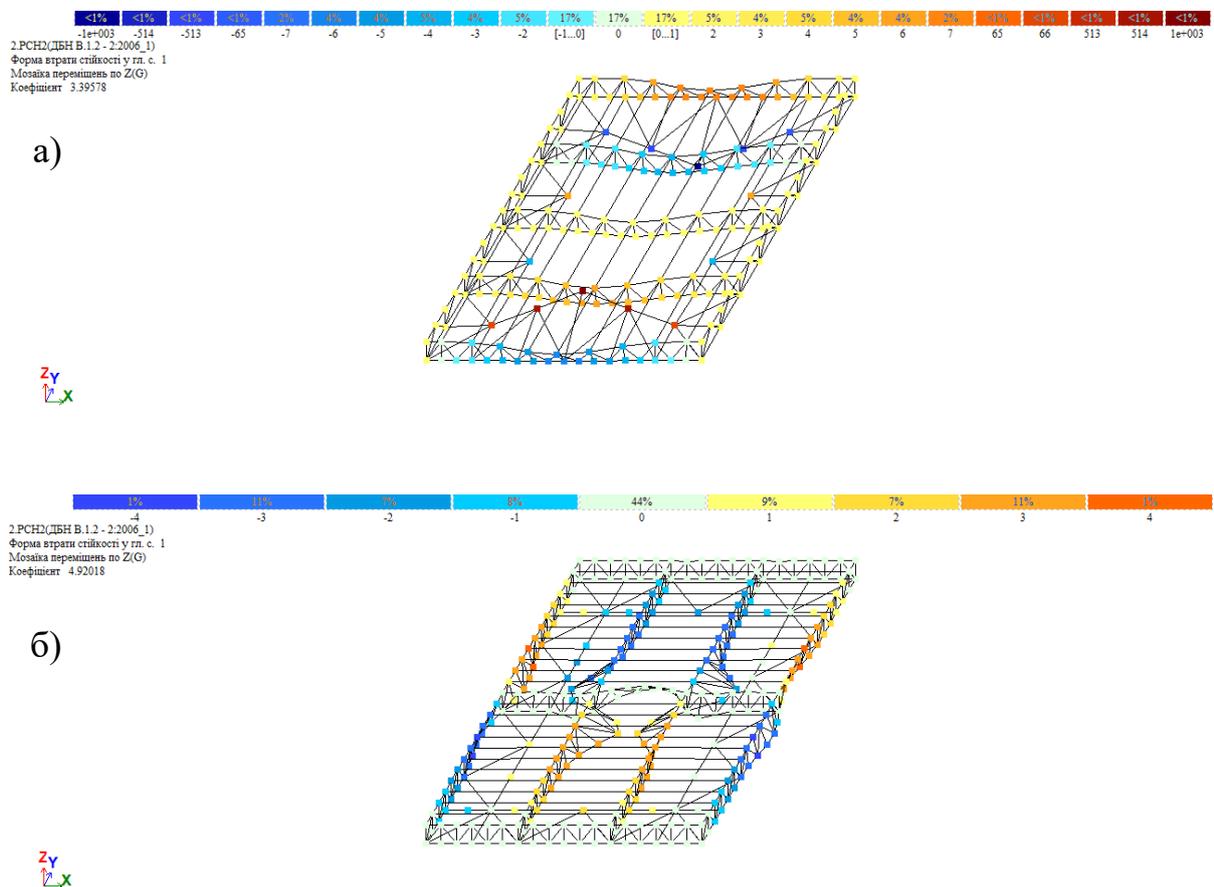


Рис.6.11 Форма втрати стійкості від РСН2: схеми №1 (n= 3,4) -а; схеми №2 (n=4,92) -б

В таблиці 6.11 наведено значення коефіцієнтів запасу стійкості для моделей конструктивів сталевого покриття, що досліджується.

Таблиця. 6.11 Коефіцієнти стійкості для моделей покриття, що досліджуються

№ моделі	РСН 1	РСН 2	РСН 3
Модель №1	19,6	3,4	3,7
Модель №2	21,9	4,92	5,40

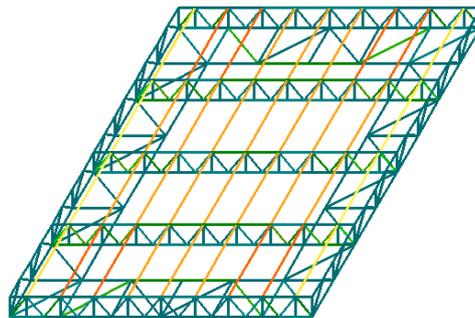
#### 6.4 Аналіз ступеня використання несучої здатності перетину трубчастих стержнів

На рисунках 6.15–6.16 зображено мозаїки використання несучої здатності перерізів (у відсотках) для конструктивних груп стержнів згідно з першою групою граничних станів для металевих елементів з поперечними перетинами, як це визначено у вихідних даних.



Варіант конструювання: Варіант 1  
Розрахунок по РСН, ДБН В.1.2.-2:2006\_1 (ДБН В.2.6-198:2014)

а)

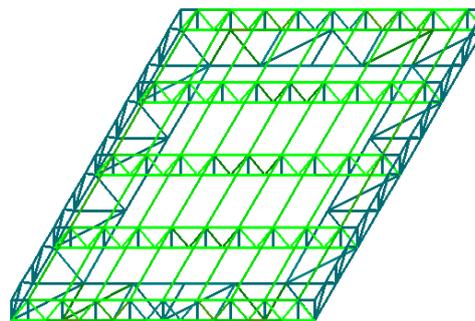


Мозаїка результатів перевірки призначених перерізів за 1 граничним станом



Варіант конструювання: Варіант 1  
Розрахунок по РСН, ДБН В.1.2.-2:2006\_1 (ДБН В.2.6-198:2014)

б)



Мозаїка результатів перевірки підібраних перерізів за 1 граничним станом

Рис. 6.15 Мозаїка результатів для схеми №1: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за 1ГС

металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі  
«Метал»-б

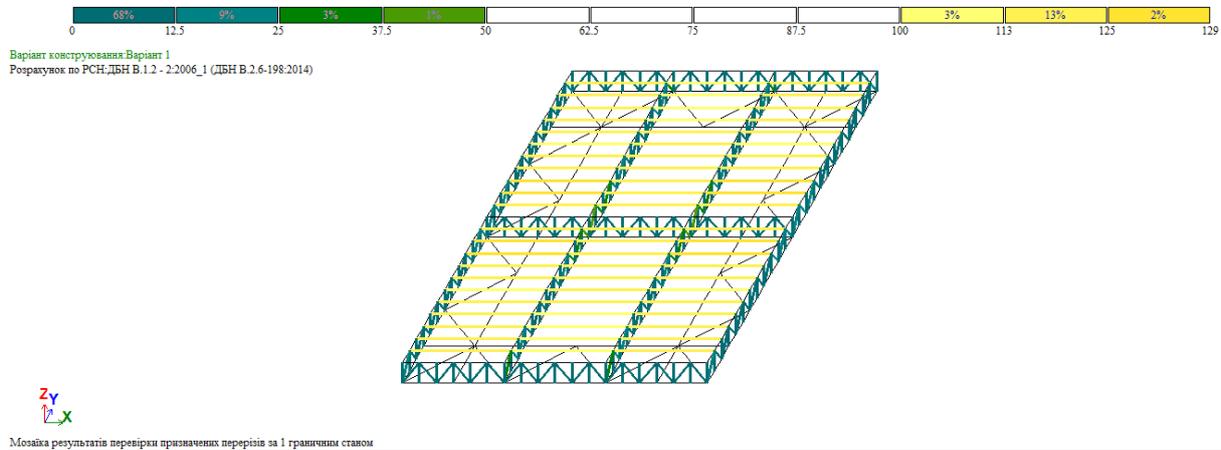


Рис. 6.16 Мозаїка результатів для схеми №2: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності

У таблиці 6.12 наведено максимальне значення відсотка використання перетину елемента стержньового під час статичного розрахунку.

Таблиця 6.12 – Максимальне використання, ( %) перерізу після 1-ї ітерації, що призначені у вихідних даних

Назва конструктивної групи стержнів	Згідно перевірки за умовами 1ГС	
	Схема №1 Максимальне використання, ( % )/ % стержнів, що належать до відсоткової групи використання	Схема №2 Максимальне використання, ( % )/ % стержнів, що належать до відсоткової групи використання
Верхній пояс Ф-1	28,7 (8%)	35,4 (11%)
Нижній пояс Ф-1	25,2 (13%)	30,4 (9%)
Решітка Ф-1	65,7 (4%)	74 (18%)
Верхній пояс Ф-2	1 (25%)	4,7 (16%)
Нижній пояс Ф-2	3,2 (31%)	3,6 (18%)
Решітка Ф-2	8,3 (15%)	12,6 (4%)

Горизонтальні зв'язки по нижньому поясу ферм	51,1 (6%)	68 (10%)
Прогони	166 (11%)	129 (12%)

Із табл. 6.12 очевидно, що більший відсоток (повнота використання) площі перерізу несучого елемента спостерігається в елементах моделі №2.

### 6.5 Підбір нових перерізів конструкцій покриття після 1-го ітераційного розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР

В таблицях 6.13-6.20 наведено дані автоматизованого підбору елементів обох моделей після першої ітерації згідно із результатами статичного розрахунку.

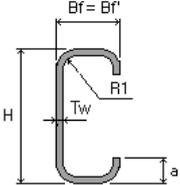
Таблиця 6.13 Підбір елементів **верхнього поясу ферми Ф-1** поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Загальна вага, т
1	180x110x12 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	80x60x8		0,0167394	90	1,506546
2	200x68x1,5 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	200x68x2,5		0,014	150	2,1

Таблиця 6.14 Підбір елементів **нижнього поясу ферми Ф-1** поясу після ітераційного розрахунку №1

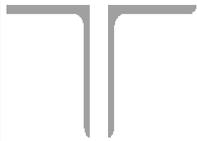
№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Загальна вага, т
1	140 x 90 x 8 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	63x40x5		0,00782	90	0,703773
2	200x68x1,5 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	100 x 50 x 10 x 2		0,00644	150	0,966

Таблиця 6.15 Підбір елементів **решітки ферми Ф-1** поясу після ітераційного розрахунку №1

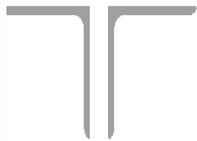
№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів в поясу, м	Загальна вага, т
1	75 x 50 x 5 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	50x32x4		0,004977	206,58	1,028093
2	РС 100 x 68 x 3 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО	100x68x1,5		0,00302	415,2	1,253904

	02494680-073-2020)					
--	--------------------	--	--	--	--	--

Таблиця 6.16 Підбір елементів **верхнього поясу Ф-2** поясу після ітераційного розрахунку №1

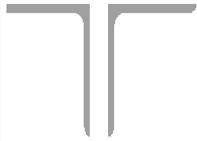
№ схем и	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів в поясу, м	Загальна вага, т
1	100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	25x16x3		0,001821	48	0,0874

Таблиця 6.17 Підбір елементів **нижнього поясу Ф-2** поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Загальна вага, т
1	100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	25x16x3		0,001821	48	0,0874

Таблиця 6.18 Підбір елементів **решітки Ф-2** поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Поперед-	Профіль після 1-ї ітерації	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Загальна вага, т

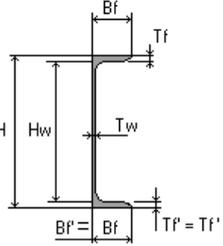
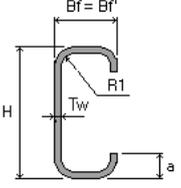
	НБ прийнятий переріз					
1	50 x 32 x 3 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	25x16x3		0,001821	71,04	0,129352

Таблиця 6.19 Підбір елементів горизонтальних зав'язків по нижнім поясам ферм поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1 м.п. профілю , т	Довжина а стержні в поясу, м	Загальна вага, т
1	80 x 3 Куточки сталеві гнуті рівнополічні (Таблиця 1: Ru <= 460 МПа) (ГОСТ 19771- 93)	40x2.5		0,00296	226,8	0,671328
2	РС 120 x 68 x 3 Профіль [- подібний «Акfabuid» (СТО 02494680- 073-2020)	65x32x8x 1		0,00108	226,8	0,244944

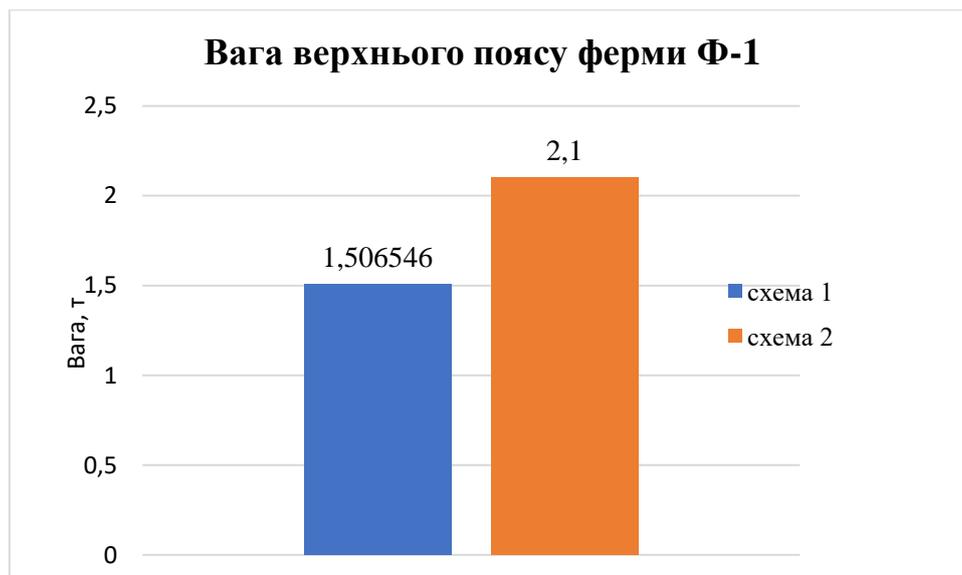
Таблиця 6.20 Підбір прогонів після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1 м.п. профілю , т	Довжина а стержні в поясу, м	Загальна вага, т
------------	------------------------------------	-------------------------------	--	----------------------------------	--	---------------------

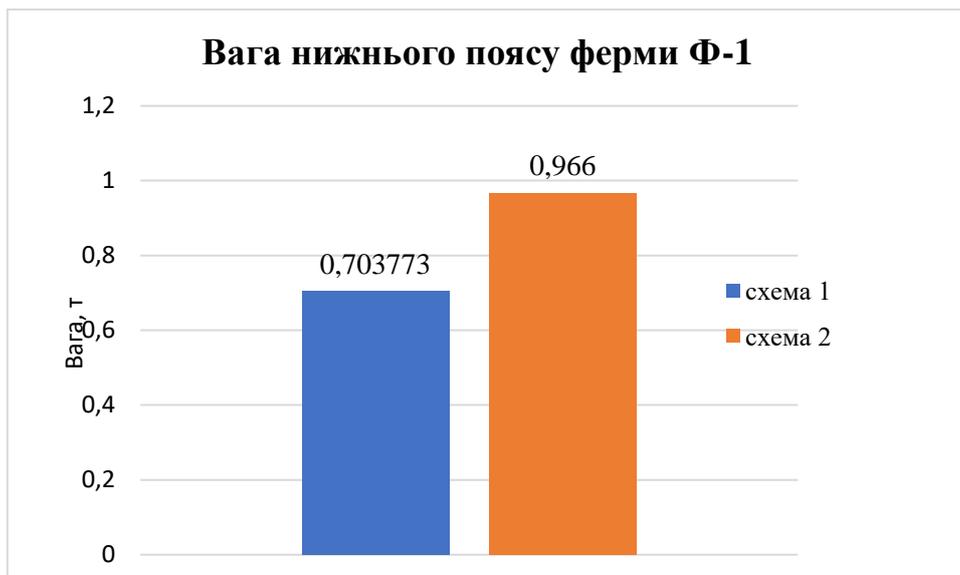
1	<p>40x2.5</p> <p>Швелери сталеві гарячекатані з ухилом внутрішніх граней полиць (ДСТУ 3634:96). Скорочений сортament Україна</p> <p>Профілі відповідають нормам: ДСТУ 3634:96</p>	14У		0,0123	216	2,6568
2	<p>РС 100 х 68 х 2</p> <p>Профіль С-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)</p>	120x68x2		0,00401	396	1,58796

Дані із таблиць 6.13-6.20 проілюстровано на рис. 6.17 та 6.18 у вигляді стовбчатих діаграм.

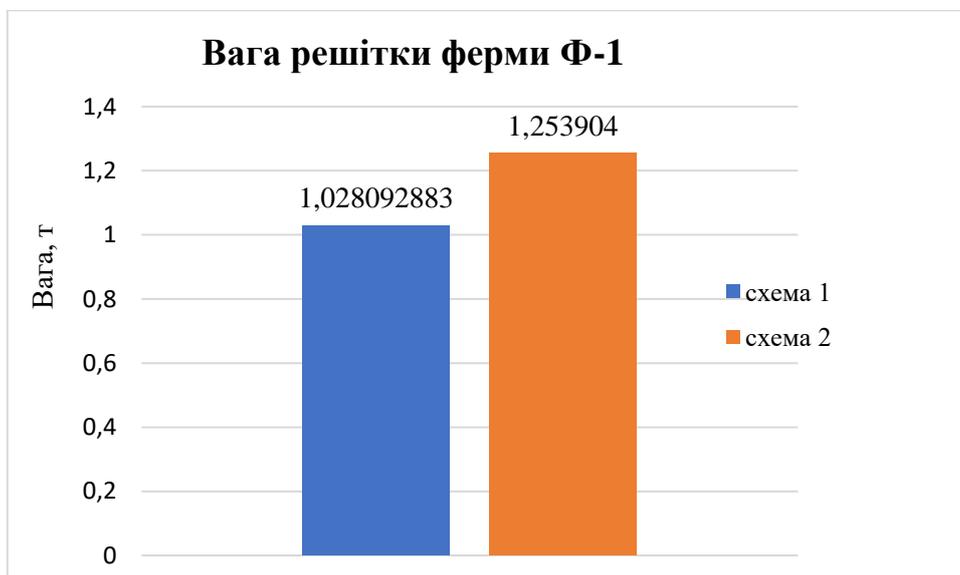
а)



б)



в)



г)



д)

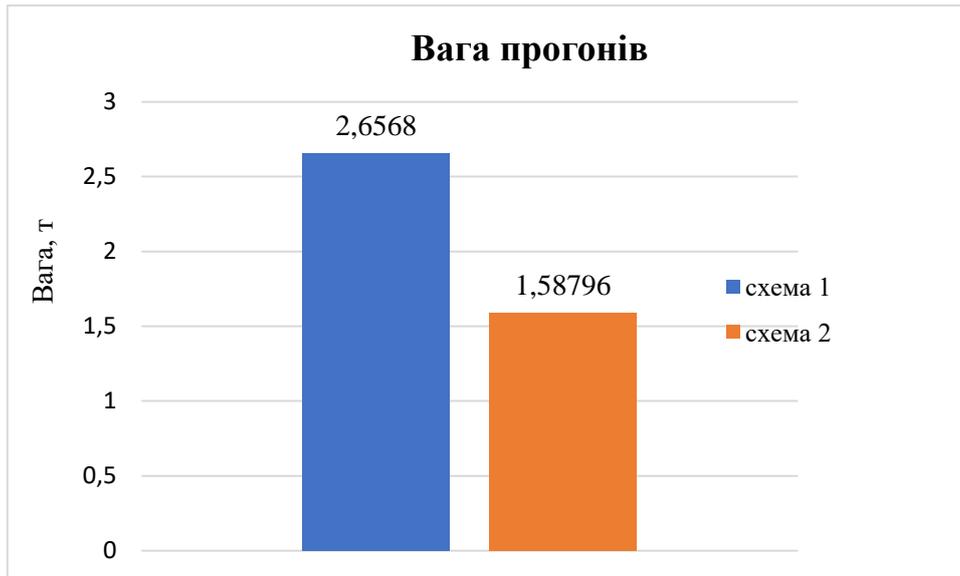


Рис. 6.17 Вага окремих груп конструктивних елементів: елементів ферм Ф-1 верхнього поясу -а; елементів ферм Ф-1 нижнього поясу -б; елементів решітки ферм Ф- -в; вага горизонтальних зав'язків по нижньому поясу ферм-г; вага прогонів -д

Загальна вага моделей покриття, які досліджуються, становить для схеми №1- 6,9 т, а для моделі №2-6,1 т (див. рис. ). Різниця у вазі моделей становить 11,9%.

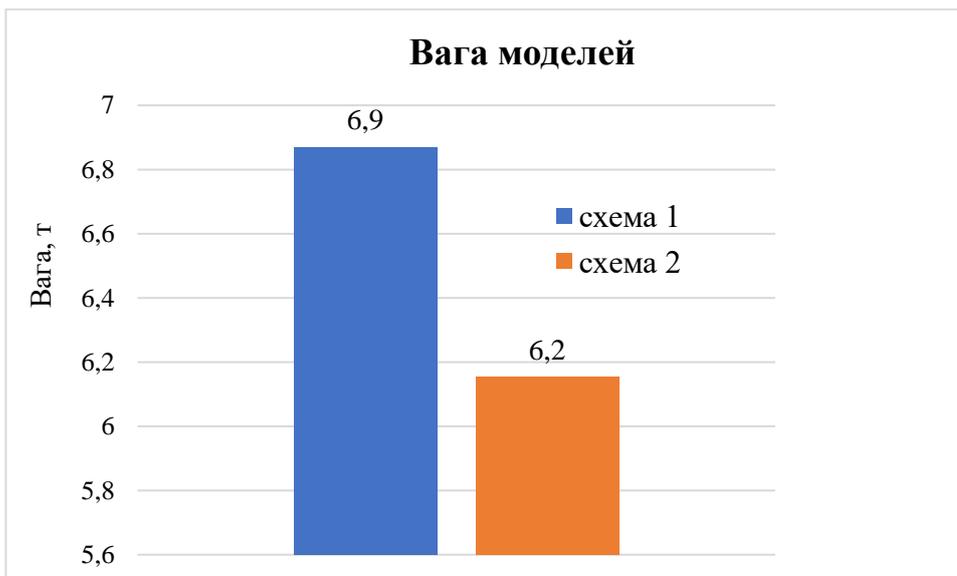


Рис. 6.18 Загальна вага моделей, що розраховуються

## РОЗДІЛ 7

### ЛОКАЛЬНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПОКРИТТЯ

Навантаження, прикладене в довільному (будь-якому) місці покриття, викликає протидію всієї системи загалом, завдяки чому підвищується несуча здатність і жорсткість конструкції та зменшується його матеріаломісткість.

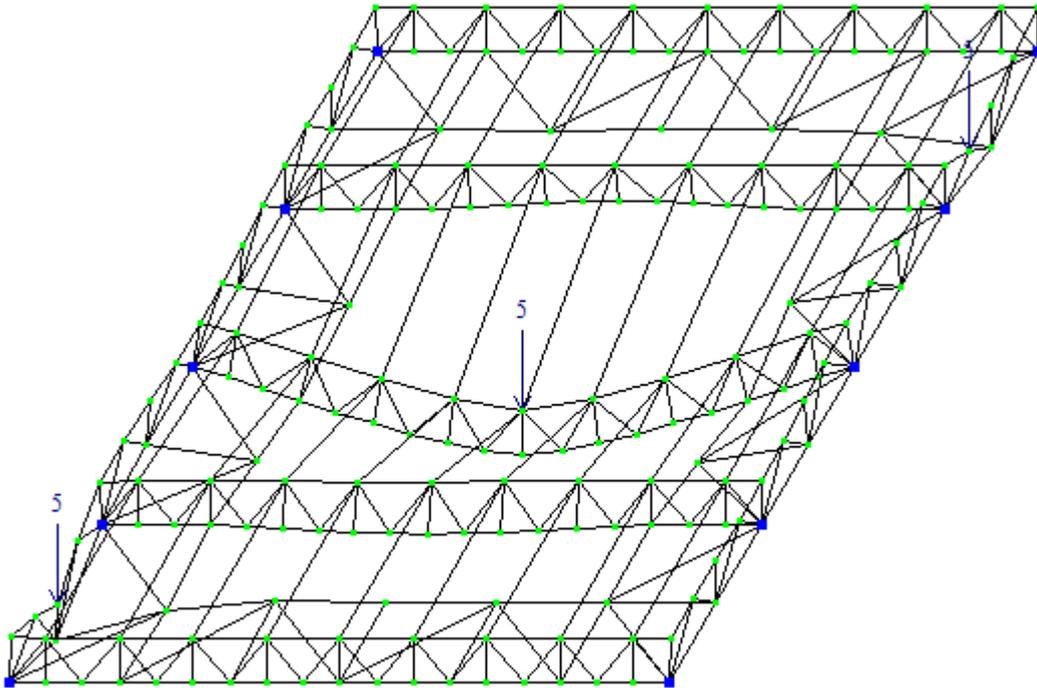


Рис.7.1 Деформована схема покриття із гарячекатаного сортаменту профілів (модель №1) при завантаженні системи локальним вузловим навантаженням

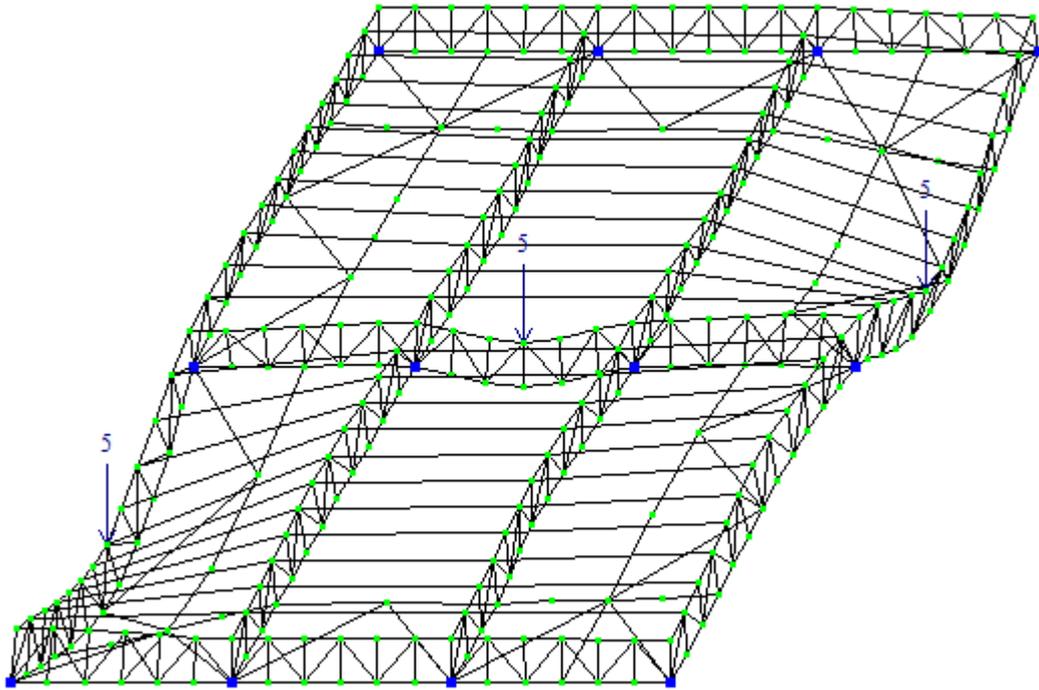


Рис.7.2 Деформована схема покриття із ЛСТК (модель №2) при завантаженні системи локальним вузловим навантаженням

Як видно з рис. 7.2 локальне вузлове завантаження лівої нижньої ферми крайнього ряду та правої ферми крайнього ряду, а також завантаження ферми середнього ряду точковим завантаженням викликає картину деформування системи, яка показує, що в спільну роботу (до спільних деформацій) включаються елементи, сусідні із завантаженими.

При аналогічному завантаженні покриття із сталевих прокатних профілів слід відмітити локальний характер деформацій елементів ферм поряд (зону поряд з точкою прикладення навантаження).

Рис. 7.1 підтверджує тезу, що завантаження, прикладене до будь-якої точки покриття із ЛСТК у вигляді замкнутих жорстких блоків викликає спротив протидію), а значить й включає до спільної роботи всі елементи загалом.

## ВИСНОВКИ

1. Змодельовано скінченоелементні схеми конструкцій покриття 18x24 м сталевій каркасній будівлі в двох варіантах:

- несучими елементами покриття є крокв'яні ферми з паралельними поясами. Ферми виконані із масивних гарячекатаних сталевих елементів. Ферми прольотом 18,0 м розташовані з кроком 6м; просторова робота такого покриття забезпечується горизонтальними зв'язками по нижнім поясам ферм та прогонами що вкладені по верхнім поясам ферм;

- несучими елементами покриття є просторові жорсткі блоки 6,0x12,0 м з ферм, що виконані із легких сталевих елементів (профілів) холодного формування. Просторова робота такого покриття забезпечується завдяки зв'язкам та фермам, розташованим у двох напрямках, які приймають зовнішні навантаження.

Тобто характер та принцип роботи ферм покриттях 1-го та 2-го типу є різним.

2. Максимальні переміщення  $f_z$  вузлів скінченоелементної схеми від РСН2 для моделі №2 (із ЛСТК) є на 128,% (або в 2,3 рази) меншими, ніж максимальні переміщення вузлів скінченоелементної моделі №1, що свідчить про значну жорсткість й набагатоменшу деформативність моделі покриття, де застосований принцип просторових замкнених жорстких блоків.

3. Осьові зусилля стиску (максимальні) в елементах верхнього поясу для моделі №1 становлять 45,3 т, а для моделі №2 ці ж зусилля складають 12,5 т й в 3,5 рази вони є меншими. Цей факт свідчить про більш ефективну роботу на особовий стиск елементів моделі №2. Зусилля розтягу в елементах нижнього поясу становлять: для моделі №1 15,2т, а для моделі №2 6,91. Тобто і максимальні зусилля розтягу в 2,2 рази є меншими для моделі,

побудованої за принципом жорстких замкнутих дисків. Подібна картина спостерігається у величинах зусиль решітки ферм моделей.

4. Розрахунок на стійкість скінченоелементних моделей виявив, що коефіцієнт запасу стійкості при найнебезпечнішому сполученні навантажень становить  $n_1=3,4$  для моделі №1, а для моделі №2 такий коефіцієнт становить  $n_1=4,92$ . Тобто в 1,45 разів модель №2 є більш стійкою ніж модель №1 без замкнутих жорстких контурів.

5. Після першого ітераційного розрахунку було виконано в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР підбір нових перерізів для елементів моделей згідно вимог розрахунку за 1 ГС та 2ГС.

6. Обчислено вагу кожної моделі згідно нових підібраних перерізів. Так вага моделі №1 становить 6,9 т, а вага моделі №2 6,2 т. Тобто вага моделі №2 на 11,2% є меншою, ніж вага моделі №1.

Проведено числовий експеримент з метою виявити спільну роботу моделей під навантаженням. Включення сусідніх елементів у спільну роботу найбільш чітко виявляється не при симетричному (рівномірному) завантаженні будівельної системи, а саме при прикладенні локального навантаження. Тому до вузлів верхніх поясів двох моделей було прикладене вертикальне локальне завантаження. Були проаналізовані деформовані схеми моделей. Рис. 7.1 підтверджує тезу, що завантаження, прикладене до будь-якої точки покриття за моделлю №2 (із замкнутих жорстких блоків ЛСТК) викликає спротив протидію), а значить й включає до спільної роботи всі елементи загалом.

## Література

- 1 ЛСТК конструкції - що це? <https://zmk.org.ua/article/lstk-konstrukcii-cto-eto>
- 2 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3 Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій.
- 3 Roll Forming Steel Framing Machines  
[Steel Framing Machine | High-Speed Roll Forming Equipment | FRAMECAD](#)
- 4 [Labout LGSF / LGSF Design & Detailing | AllaboutLGSF](#)
- 5 Introduction to Light Gauge Steel Frame Construction 2025/ [Introduction to Light Gauge Steel Frame Construction 2025](#)
- 6 ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 15 с. (Національний стандарт України)
- 7 ДБН В.1.2-2:2006 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування»
- 8 ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини та переміщення
- 9 Український центр сталевих будівництва. ЛСТК. Режим доступу: <https://uscc.ua/lstk>
- 10 Методи зниження вартості сталевих каркасів. Режим доступу: <https://uscc.ua/metody-znizhennya-vartosti-stalevogo-karkasu>
- 11 ДБН А.1.1-94:2010 Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами
- 12 ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд
- 13 ДСТУ 2251:2018 Кутики сталеві гарячекатані рівнополічні. Сортамент
- 14 Pan, Futing & Wang, Ying & Huang, Chunxiao. (2021). Design and bearing capacity analysis of cold-formed thin-walled steel-timber composite

members. E3S Web of Conferences. 248. 03047.  
10.1051/e3sconf/202124803047.

<sup>1</sup>  
<sub>5</sub> · Nožica, Tanja & Jovanović, Đorđe & Žarković, Drago. (2021).  
· SOFTWARE IMPLEMENTATION OF STABILITY DESIGN OF STEEL  
FRAMES. Access mode:

[https://www.researchgate.net/publication/358396636\\_SOFTWARE\\_IMPL  
EMENTATION\\_OF\\_STABILITY\\_DESIGN\\_OF\\_STEEL\\_FRAMES](https://www.researchgate.net/publication/358396636_SOFTWARE_IMPL<br/>EMENTATION_OF_STABILITY_DESIGN_OF_STEEL_FRAMES)

<sup>1</sup>  
<sub>6</sub> · Semko, Volodymyr & S.F., Pichugin & Leshchenko, Maryna. (2017).  
· PROBABILISTIC ANALYSIS OF THERMAL PERFORMANCE OF  
THE WALL FROM LIGHT-GAUGE THIN-WALLED STEEL  
STRUCTURES. Academic Journal. Series: Industrial Machine Building,  
Civil Engineering. 48. 144-155. 10.26906/znp.2017.48.788.

<sup>1</sup>  
<sub>7</sub> · Lightweight Steel Structure Building Materials: A Modern Construction  
· Revolution. Access mode: [Lightweight Steel Structure Building Materials:  
A Modern Construction Revolution | Modern Building](#)

<sup>1</sup>  
<sub>8</sub> · LIGHT GAUGE STEEL CONSTRUCTION. Access mode: [Light Gauge  
Steel Construction | Light Gauge Metal Framing | Steel Home - Understand  
Building Construction](#)

<sup>1</sup>  
<sub>9</sub> · Light Gauge Steel Frame House Erection. Access mode:  
[https://support.google.com/youtube/?p=report\\_playback](https://support.google.com/youtube/?p=report_playback)

## **ДОДАТКИ**

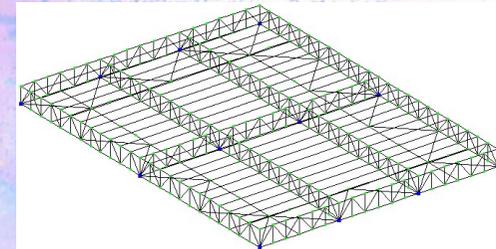
Сумський національний аграрний університет

Факультет будівництва та транспорту

# Дослідження конструкцій диску перекриття з легких ферм

Студент: здобувач 2м курсу, Безсонов Кирило Сергійович

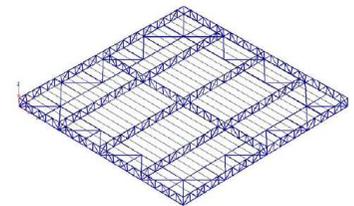
Керівник: к.т.н., доцент Срібняк Н.М.



Суми, 2025

# Актуальність теми

- Конструктивні рішення покриття будівлі із застосуванням **легких перехресних ферм** являють собою сучасне та актуальне рішення. Просторова робота такого покриття забезпечується завдяки зв'язкам, розташованим у двох напрямках ферм, які переносять зовнішні навантаження. Підвищення жорсткості покриття сприяє зниженню зусиль в окремих його елементах, що дозволяє використовувати тонкостінні сталеві профілі з меншою витратою сталі порівняно із суцільностінчастими прокатними балками. Загальна стійкість конструкції досягається шляхом формування декількох просторових блоків вздовж периметра покриття.
- Використання легких перехресних ферм передбачає, що ферми з тонкостінних профілів, закріплені горизонтальними зв'язками в нижньому поясі та прогонами в верхньому, утворюють **жорсткий диск покриття**, що забезпечує його **просторову роботу**.
- Просторова робота такого покриття забезпечується завдяки зв'язкам та фермам, розташованим у двох напрямках, які приймають зовнішні навантаження. Будь-яке навантаження, прикладене до довільної точки покриття, спричиняє реакцію всієї системи, що підвищує її несучу здатність і жорсткість, а також зменшує матеріаломісткість конструкції.



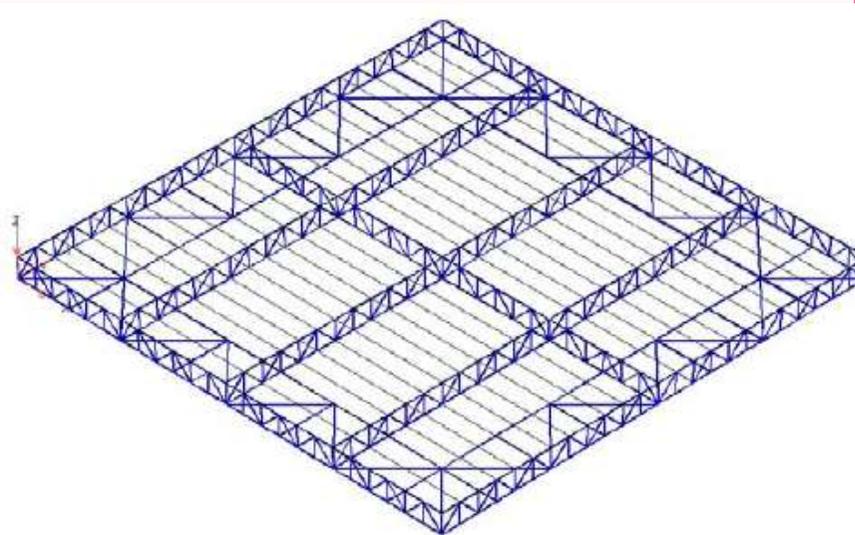
Грані блоку задаються вертикальними фермами, розташованими за ортогональними напрямками, горизонтальними зв'язками, встановленими на нижніх поясах ферм, та несучими елементами покрівлі на верхніх поясах.

**Оскільки поперечний переріз цього блоку є замкнутим, він має високу жорсткість при скручуванні та вигині в поперечному напрямку, що запобігає втраті загальної стійкості.**

Загальна стабільність конструкції забезпечується створенням кількох таких просторових блоків по периметру, до яких кріпляться додаткові ферми, що унеможливають горизонтальне переміщення поясів і гарантують їхню стійкість.

**З метою обґрунтування доцільності використання покриття з легких перехресних ферм планується провести розрахунки та порівняння витрат сталі для двох варіантів: класичної конструкції (ферми з гарячекатаних масивних профілів) і конструкції з перехресними прокатними балками.**

**Очікується, що скінченоелементний аналіз покаже значну економію металу при застосуванні легких ферм.**



- **Метою** метою числових розрахунків є виявлення напружено-деформованого стану скінченоелементних моделей покриття із гарячекатаних профілів та ЛСТК-профілів. Також необхідно встановити параметри стійкості двох моделей та оцінити та проаналізувати їх деформований стан при локальному завантаженні. Згідно напружено-деформованого стану виконати конструювання перерізів елементів скінченоелементних схем. Оцінити матеріалоємність варіантів.

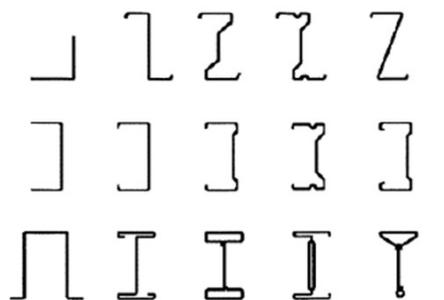
**Об'єкт дослідження** – дві скінченоелементні моделі конструкції покриття каркасної будівлі, що виконані із гарячекатаних профілів та профілів ЛСТК.

**Предметом дослідження** є напружено-деформований стан моделей моделі конструкції покриття каркасної будівлі, що виконані із гарячекатаних профілів та профілів ЛСТК, конструктивне рішення таких моделей й їх матеріалоємність.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати числового експерименту дозволяють визначити з-поміж двох моделей конструкцій покриттів, що досліджуються, найбільш ефективну за декількома критеріями, в тому числі й критерієм матеріалоємності.

# Задачі дослідження

- 1) З'ясувати особливості та принципи конструювання типових покриттів сталевих каркасних будівель покриттів із крокв'яних конструкцій, що виконані із гарачекатаних профілів та покриттів каркасних будівель із легких ферм та в'язей, що виконані із профілів ЛСТК;
- 2) Змоделювати використовуючи метод скінчених елементів дві розрахункові моделі покриття для будівлі прольотом 18x24 м. Перша модель являє собою класичне вирішення із кроквяних гарчечкатаних сталевих ферм прольотом 18,0 м та розташованих з кроком 6, м. Друга модель являє собою систему жорстких і стійких замкнених дисків із ферменних конструкцій ЛСТК;
- 3) Задати всі необхідні параметри моделей, виконати статичний розрахунок та оцінити результати статичного розрахунку (напружений стан елементів, деформований стан елементів, стійкість);
- 4) Виконати одну із задач числового експерименту, що являє собою завантаження системи точковим локальним навантаженням. Оцінити характер деформування та параметри деформування двох систем, що локально завантажені;
- 5) Виконати конструювання згідно вимог 1ГС та 2ГМ для елементів двох скінченоелементних моделей.
- 6) Оцінити матеріалоємність моделей, сформулювати загальні висновки з дослідження.



a – одиночні профілі відкритого перерізу  
a) Single open sections



b – складені профілі відкритого перерізу  
b) Open built-up sections



c – складені профілі замкнуті  
c) Closed built-up sections



Приклади каркасів будівлі із ЛСТК

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

- **метод синтезу та аналізу інформації**- пошук та аналіз відомостей – літературних джерел, публікацій в рамках окресленої проблеми – розрахунків залізобетонних конструкцій перекриття в пластичній стадії роботи ( з урахуванням тріщиноутворення); аналіз досліджень та публікацій щодо способів моделювання ребристих плит;
- **метод скінчених елементів** - один із математичних методів. В МСЕ конструкції плоских ферм покриття сталевोї каркасної будівлі являють собою розрахункові схеми, створені із стержньових скінчених елементів, які з'єднані між собою у вузлах. Стержньові скінчені елементи мають такі характеристик жорсткості як розміри (габарити) поперечного перерізу, початковий модуль пружності сталі, питома вага сталі та коефіцієнт Пуасона.

- ***Методика підбору перерізів сталевих елементів згідно норм***
- Методика підбору перерізів сталевих елементів базується на положеннях нормативних документів з проектування сталевих конструкцій.
- Основні принципи підбору перетинів стержнів елементів ферм, в'язей, повинні здійснюватися згідно із вимогами та рекомендаціями нормативів проектування сталевих конструкцій.
- ***Аналітичний метод обробки результатів*** статичного розрахунку розрахунків за допомогою ПК Microsoft Excel.

# СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНІ СХЕМИ В РАМКАХ ВИКОНАННЯ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

## Перша модель.

Перша модель являє собою «класичне» поширене вирішення покриття промислової будівлі.

Воно вирішене у вигляді крокв'яних конструкцій ферм  $\Phi-1$  прольотом 18,0 м. В торцях диска перекриття 18,0 x 24,0 м розташовані зв'язкові ферми  $\Phi-2$  довжиною 6,0 м. По нижнім поясам ферм  $\Phi-1$  та  $\Phi-2$  розташовано горизонтальні зв'язки жорсткості

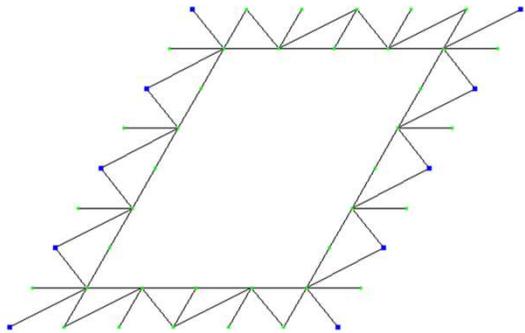


Рис.2 Горизонтальні зв'язки жорсткості по нижньому поясу ферм

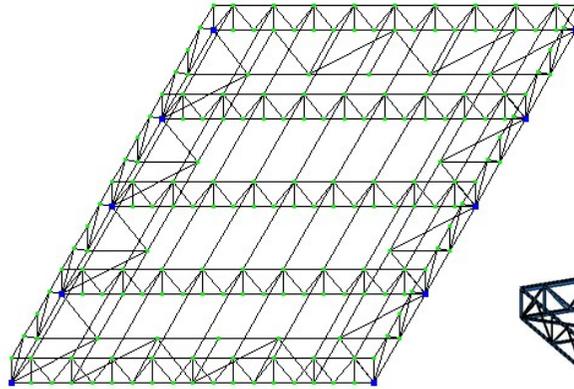


Рис. 3 Модель покриття №1, виконана із гарячекатаних сталевих профілів: **скінченоелементна схема-а**

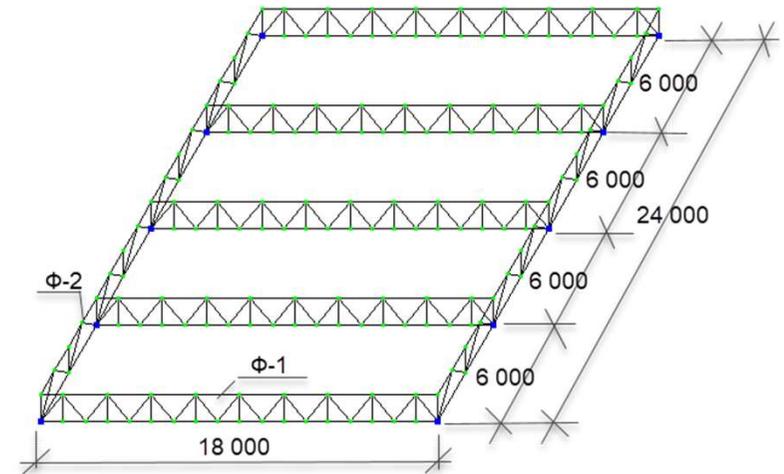


Рис. 1 Фрагмент скінченоелементної моделі №1- **схема розташування крокв'яних  $\Phi-1$  та зв'язкових ферм  $\Phi-2$**

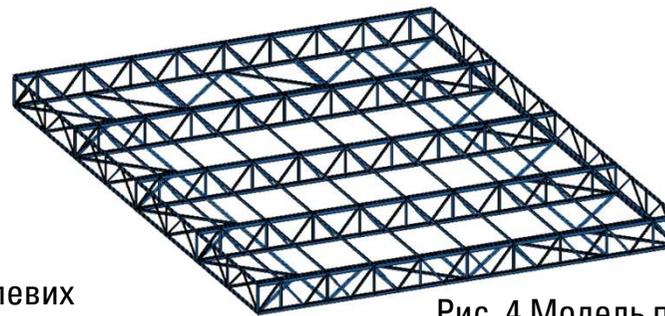


Рис. 4 Модель покриття №1 виконана із гарячекатаних сталевих профілів: **просторова схема**

## СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНІ СХЕМИ В РАМКАХ ВИКОНАННЯ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

**Друга модель** являє собою ефективне перекриття із легких тонкостінних сталевих профілів. Профілі ЛСТК мають відкриту форму та виготовляються способом холодного формування. Їх особливістю є зазвичай мала товщина стінки профілю, яка знаходиться в межах від 1,5 до 4 мм. Конструкція покриття за схемою №2 складається з легких перехресних ферм, що являють собою жорсткі прямокутні замкнені блоки 6х12м. Загальна стійкість конструкції досягається шляхом формування декількох просторових блоків вздовж периметра покриття.

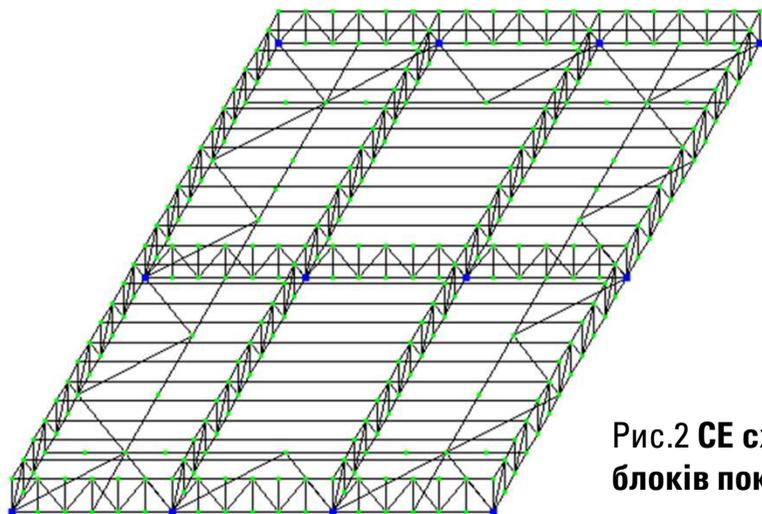


Рис.2 СЕ схема жорстких блоків покриття із ЛСТК

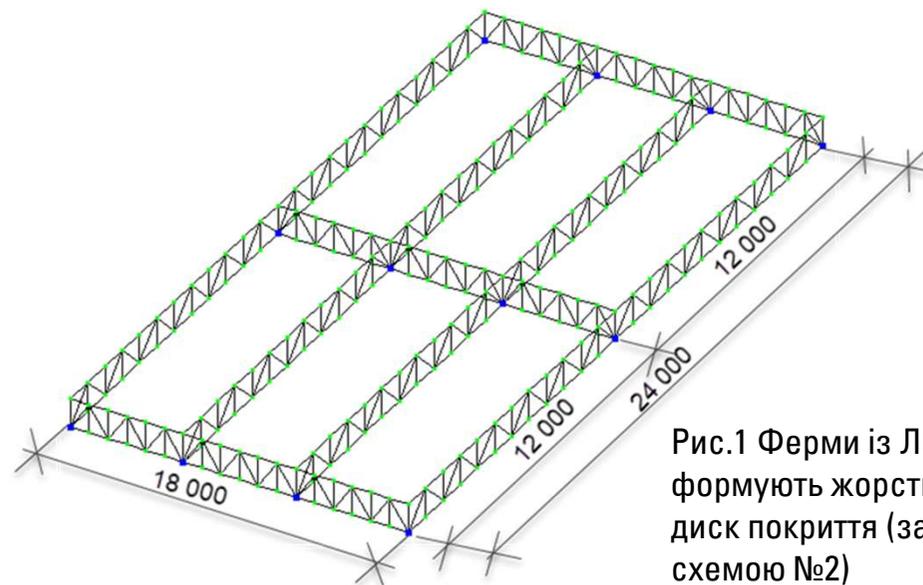


Рис.1 Ферми із ЛСТК формують жорсткий диск покриття (за схемою №2)

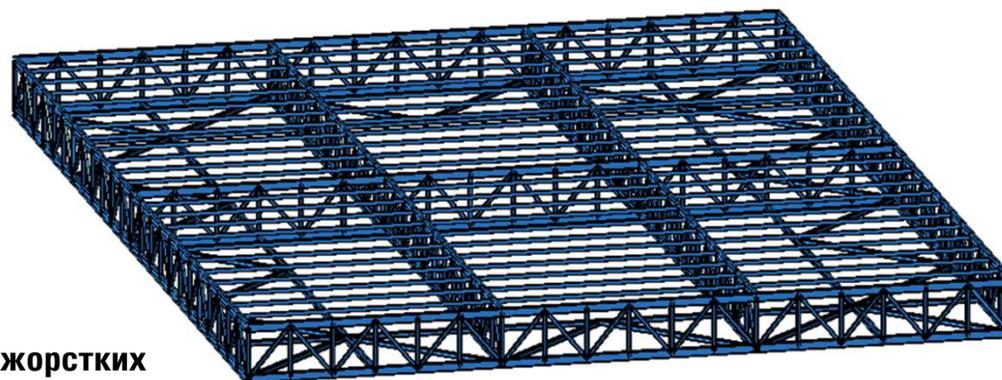
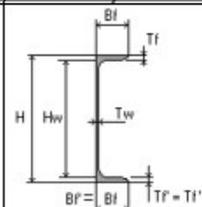


Рис.3 Прострова схема жорстких блоків покриття із ЛСТК

## Параметри жорсткості моделей, що досліджуються

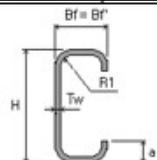
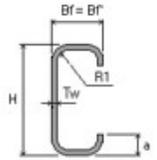
Таблиця 1 – Характеристики жорсткостей конструктивних елементів покриття за схемою №1

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м <sup>2</sup>	R, т/м <sup>3</sup>	μ	Сталь С235	q, т/м
1. Верхній пояс ферми Ф-1	 180x110x12 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.053
2. Нижній пояс ферми Ф-1	 140 x 90 x 8 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.028
3. Елементи решітки ферми Ф-1	 75 x 50 x 5 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.0096
4. Верхній пояс ферми Ф-2	 100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.018

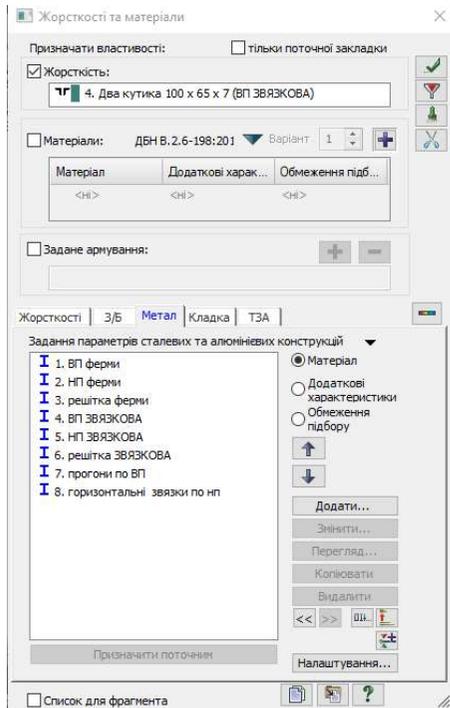
5. Нижній пояс ферми Ф-2	 100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.028
6. Елементи решітки ферми Ф-2	 50 x 32 x 3 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.0096
7. Горизонтальні зв'язки по нижнім поясам ферм	 80 x 3 Куточки сталеві гнуті рівнополічні (Таблиця 1: Ru ≤ 460 МПа) (ГОСТ 19771-93)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.00728
8. Прогони	 40x2.5 Швелери сталеві гарячекатані з ухилом	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	С235	0.0086

## Параметри жорсткості моделей, що досліджуються

Таблиця 2– Характеристики жорсткостей конструктивних елементів покриття за схемою №2

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м <sup>2</sup>	R, т/м <sup>3</sup>	μ	Сталь	q, т/м
1. Верхній пояс ферми Ф-1	 200x68x1,5 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	350	0.00844
2. Нижній пояс ферми Ф-1	 200x68x1,5 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	350	0.00844
3. Елементи решітки ферми Ф-1	 РС 100 x 68 x 3 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	350	0.00601
4. Горизонтальні зв'язки по нижнім поясам ферм	 РС 120 x 68 x 3 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	350	0.01298
5. Прогони	 РС 100 x 68 x 2 Профіль С-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	350	0.00401

Для автоматизації підбору перерізів у модулі «Метал» кожному елементу розрахункових схем було присвоєно **конструктивні параметри згідно з вимогами норм проєктування ДБН Сталеві конструкції**



Під час визначення матеріалів для конструктивних груп стержнів кроквяних ферм моделей для стрижнів верхнього та нижнього поясів застосували тип «елемент поясу ферми», а для елементів решітки – тип «елемент решітки ферми». Розрахунок сталевих конструкцій проводилися в їхній пружній стадії роботи.

**Таблиця 3 Завантаження, що прийнято до розрахунку**

№ завантаження	Характеристика
№ 1	- Тип - постійне, власна вага плити, що задавалася автоматично ПК Ліра-САПР й зазнавала змін на кожній ітерації підбору перетинів груп конструктивних елементів
№ 2	Тип - постійне та являє собою власну вага конструктивних шарів покрівлі
№ 3	Тип – тимчасове, снігове для м. Суми

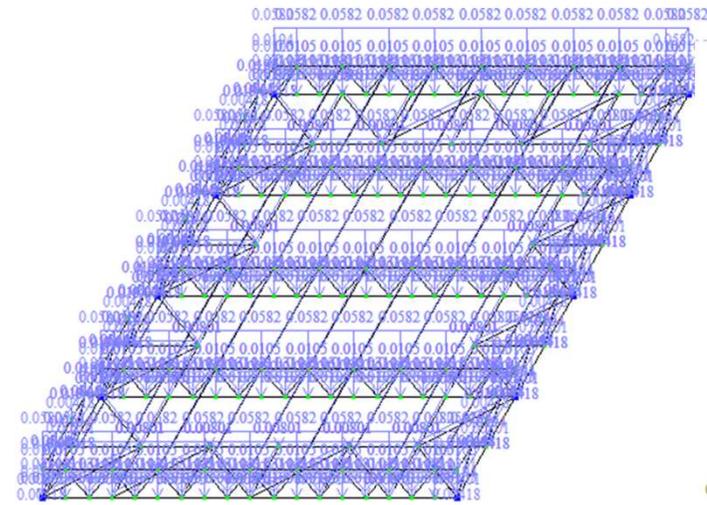
**Таблиця 4 Збір навантажень на 1м2 покриття**

Назва	Характеристичне значення навантаження, (кН/м <sup>2</sup> )	Коеф. надійності за навантаженням $\gamma_f$	Розрахункове навантєння кН/м
<b>I. Постійні навантаження</b>			
Власна вага конструкції (згідно призначених жорсткостей)	Автоматично визначається в ПК «Ліра-САПР»		
Сендвіч-панель з утеплювачем мінватаю товщиною 150 мм	0,115	1.05	0,121
<b>ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ:</b>	0,115		0,121
<b>II. Тимчасове навантаження</b>			
Снігове навантаження (за ДБН В.1.2-2:2006, додаток Е) для м. Суми (1640 Па=1,64 кН/м <sup>2</sup> )	1,64	1.14	1,87
<b>Повне навантаження</b>	2,755		1,991

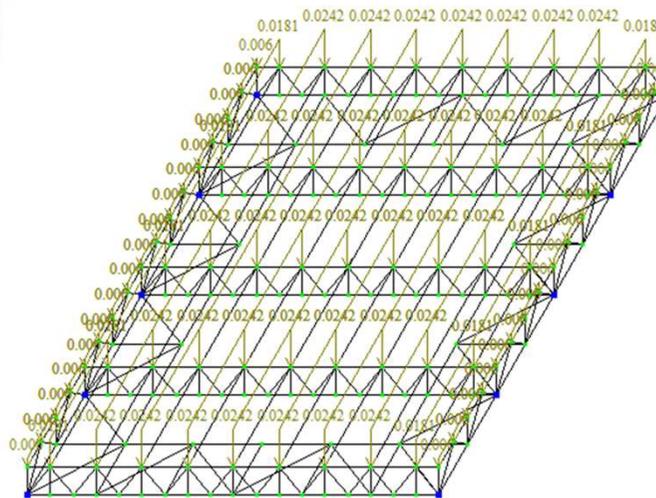
13

# Завантаження, що діє на модель покриття за схемою №1:

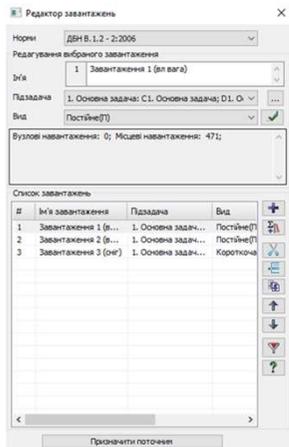
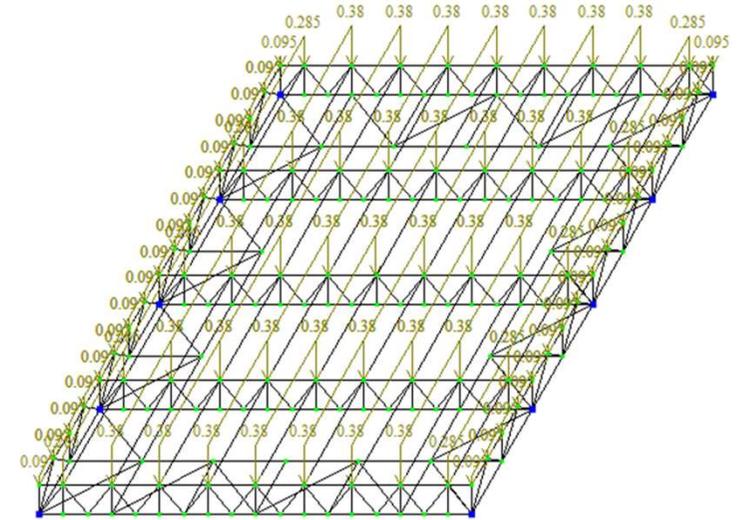
1) власна вага конструкції



2) вага конструкції покрівлі



3) снігове навантаження

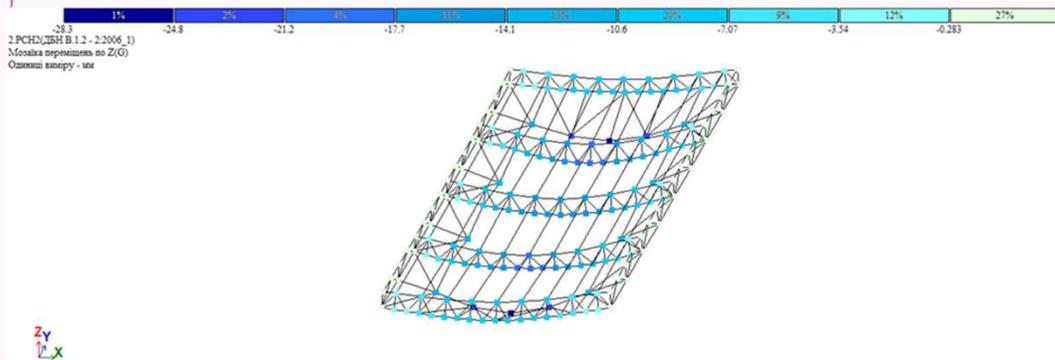


У навантаженнях №2 та №3 рівномірно розподілене по площі навантаження перетворюється на погонні навантаження для кожного прогону покриття, виходячи з ширини відповідної вантажної площі. На рис. 5.8 представлені всі типи навантажень, що застосовуються до прогонів у розрахункових моделях.

Рис. Вікно призначення навантажень на структурну плиту

# РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Мозаїка переміщень вузлів fz від РСН 2 для : **схеми №1**



Мозаїка переміщень вузлів fz від РСН 2 для : **схеми №2**

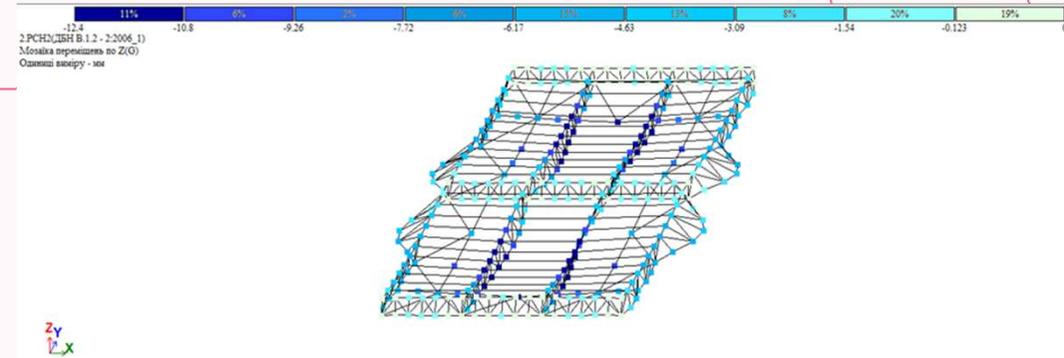
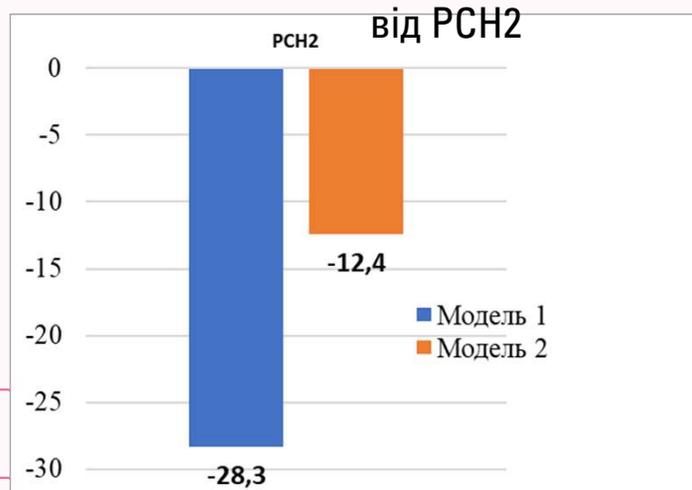


Рис. Максимальні переміщення вузлів fz в скінченоелементних моделях конструкцій покриття

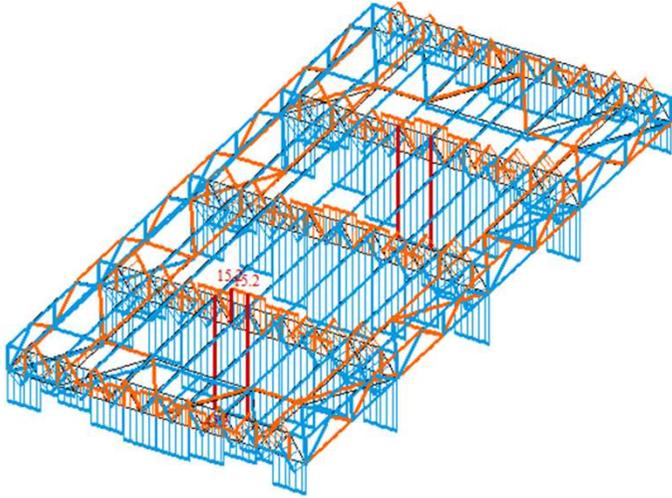


Максимальний вертикальний прогин **є найменшим для моделі №2**. Усі максимальні вертикальні прогини для усіх розрахункових схем знаходяться в допустимих межах.

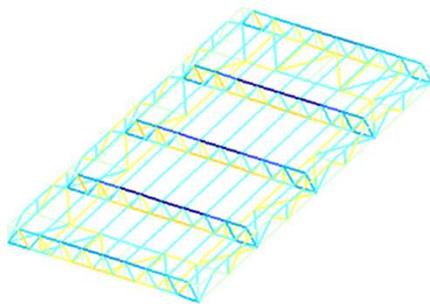
$$f_u = \frac{L}{250} = \frac{2400}{250} = 9,6 \text{ см}$$

## Модель №1

Епюри осьових сил N в елементах схеми №1

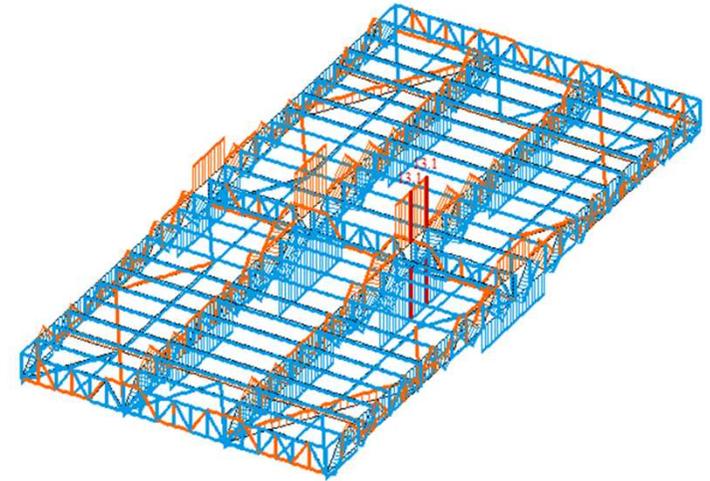


Мозаїка осьових зусиль N в елементах схеми №1

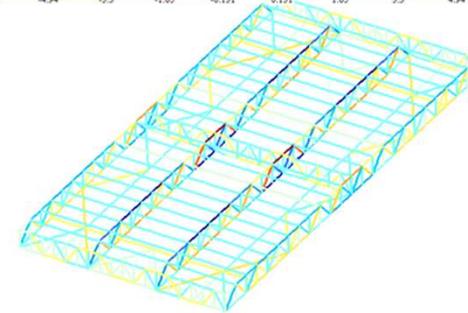


## Модель №2

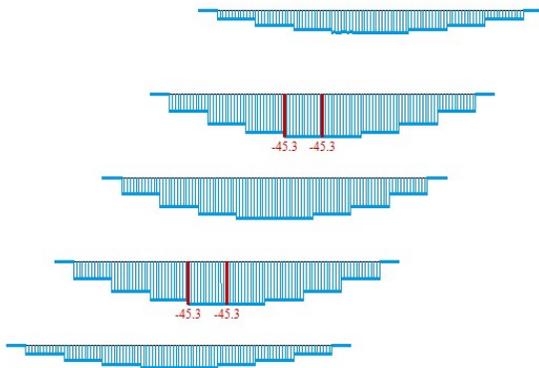
Епюри осьових сил N в елементах схеми №2



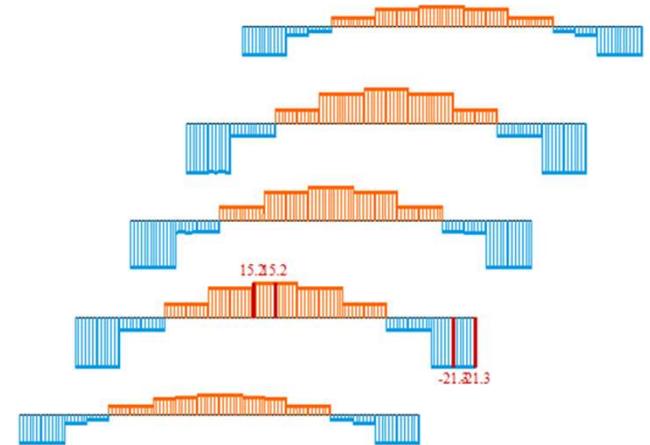
Мозаїка осьових зусиль N в елементах схеми №2



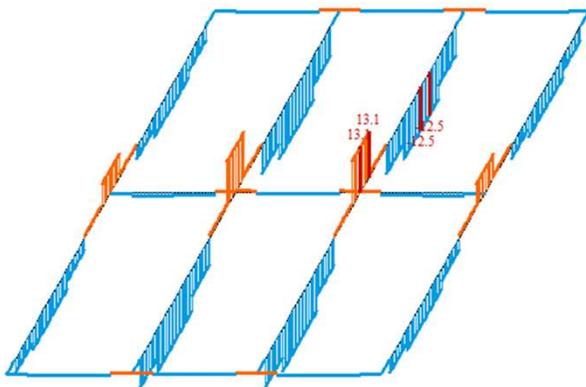
Епюри зусилля N у **верхньому** поясі ферм Ф-1: для моделі №1



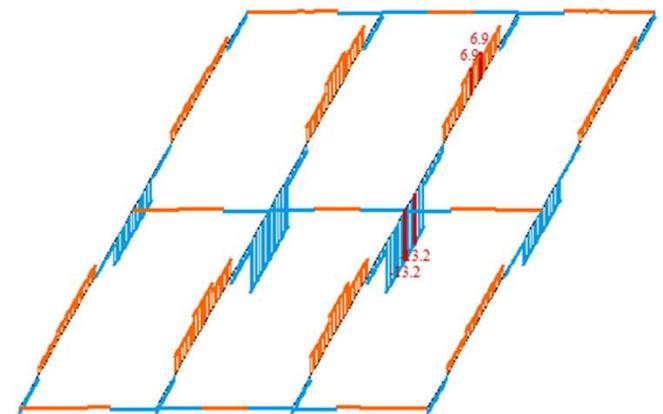
Епюри зусилля N у **нижньому** поясі ферм Ф-1: для моделі №1



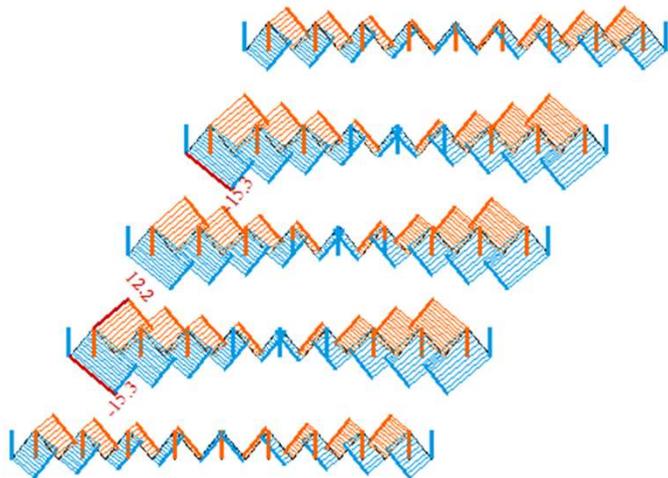
Епюри зусилля N у **верхньому** поясі ферм Ф-1: для моделі №2



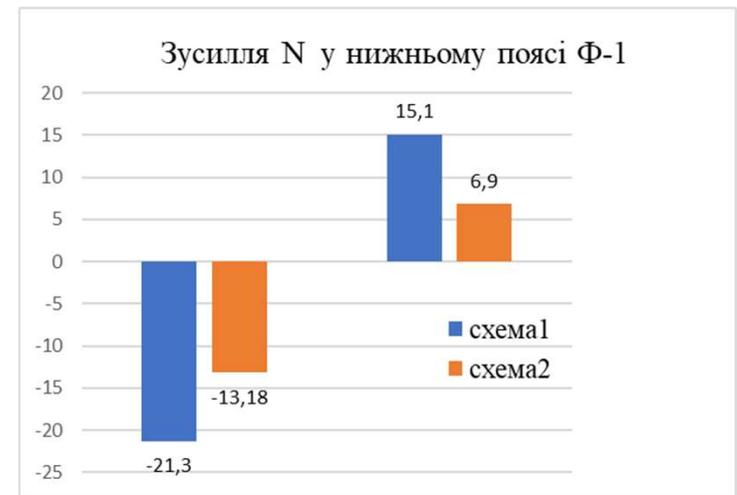
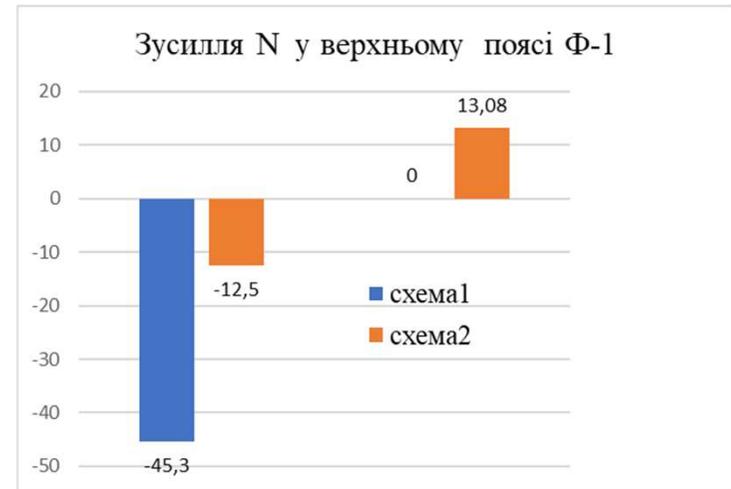
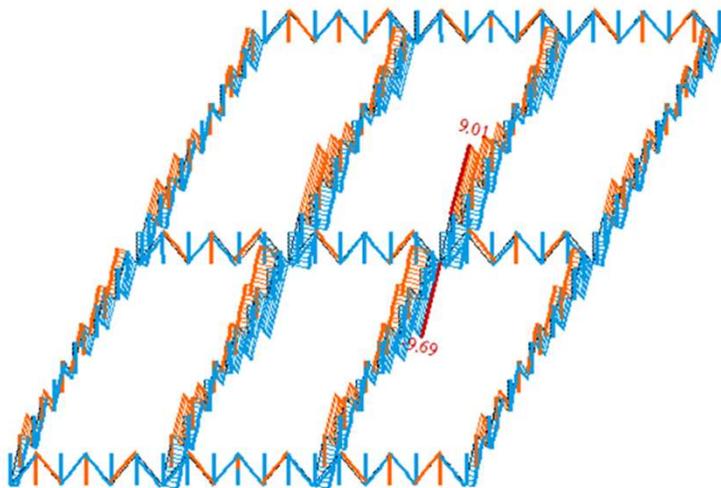
Епюри зусилля N у **нижньому** поясі ферм Ф-1: для моделі №2



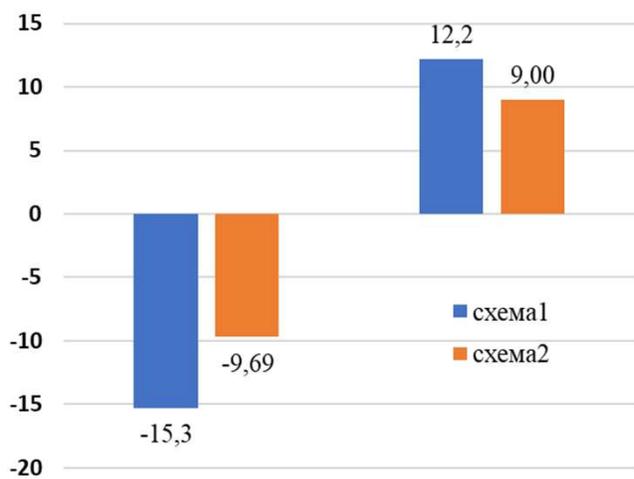
## Епюри зусилля N в решітці ферм Ф-1 для моделі №1



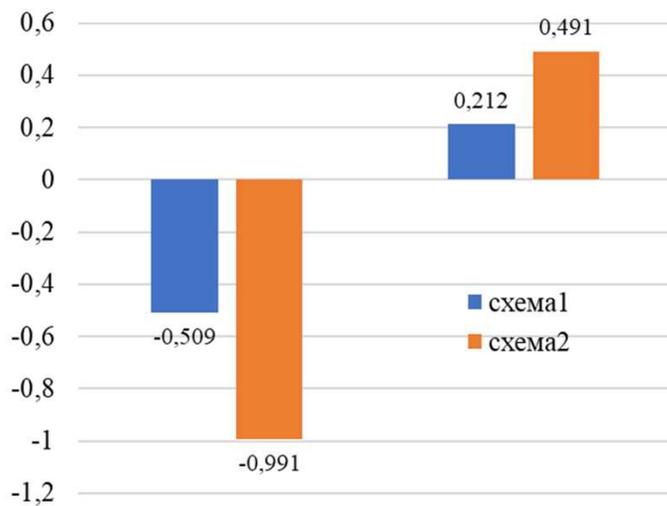
## Епюри зусилля N в решітці ферм Ф-1 для моделі №2



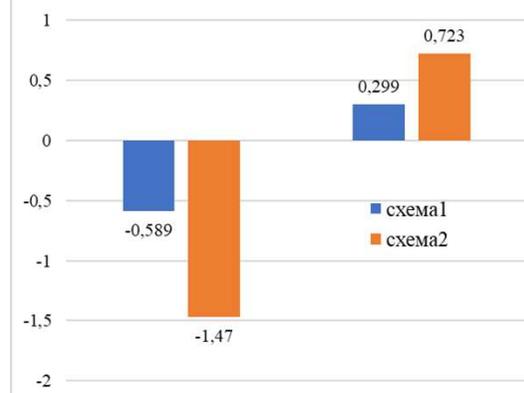
Зусилля N у решітці ферм Ф-1



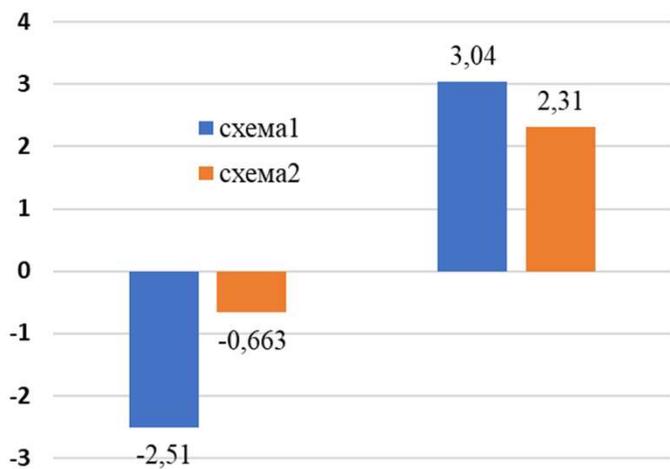
Зусилля N у верхньому поясі ферм Ф-2



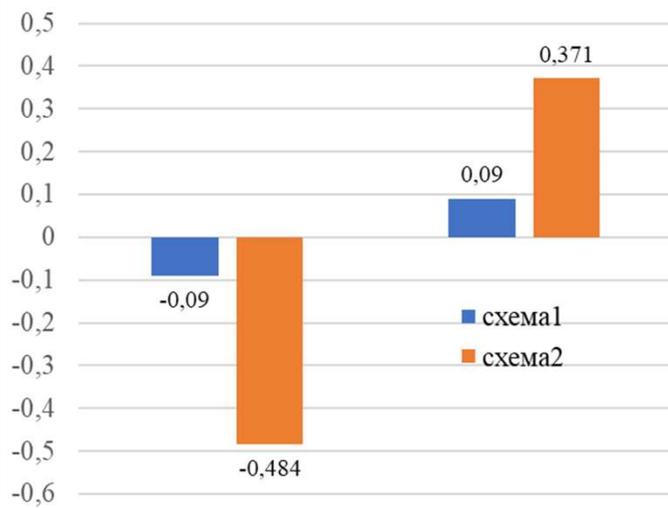
Зусилля N решітці ферм Ф-2



Зусилля N в горизонтальних зв'язках по низу ферм



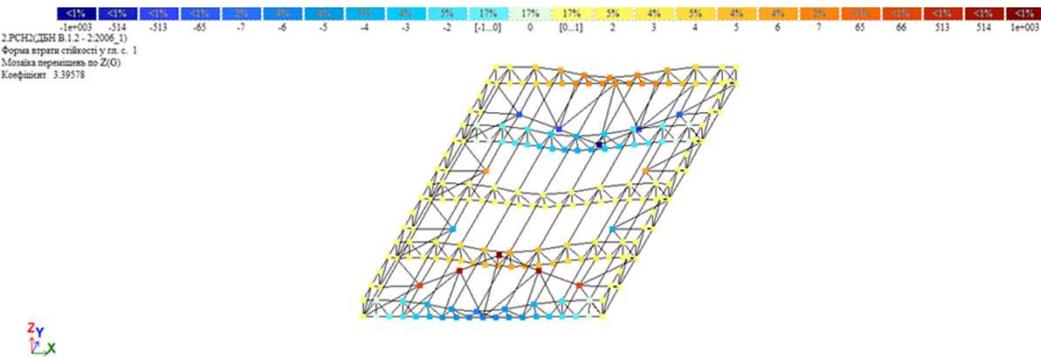
Зусилля N у нижньому поясі ферм Ф-2



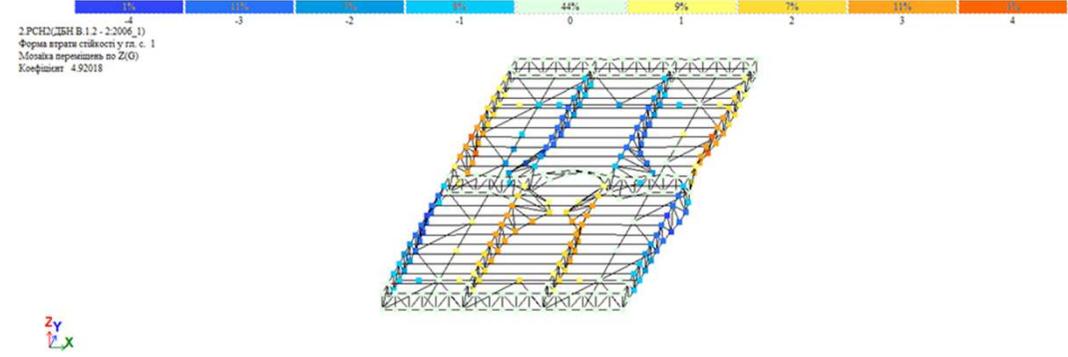
## Аналіз стійкості моделей, що досліджуються

Коефіцієнт стійкості відображає, наскільки система стійка до зовнішніх збурень або змін умов. Він може бути як позитивним, так і негативним; у випадку від'ємного значення система вважається нестійкою і потребує додаткового статичного аналізу та перегляду конструктивних рішень. Ціла частина цього числа вказує, у скільки разів можна збільшити навантаження на систему, перш ніж вона втратить свою стійкість.

Форма втрати стійкості від РСН2: схеми №1 (n= 3,4)



Форма втрати стійкості від РСН2: схеми №2 (n= 4,92)



## Підбір нових перерізів оболонки після 1-го ітераційного розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР

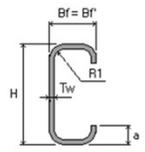
Таблиця 1. Підбір елементів верхнього поясу ферми Ф-1 поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага І.м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Загальна вага, т
1	180x110x12 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	80x60x8		0,0167394	90	1,506546
2	200x68x1,5 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	200x68x2,5		0,014	150	2,1

Таблиця 2. Підбір елементів нижнього поясу ферми Ф-1 поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага І.м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Загальна вага, т
1	140 x 90 x 8 Сталь прокатна кутова нерівнополічна (ГОСТ 8510-72)	63x40x5		0,00782	90	0,703773
2	200x68x1,5 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	100 x 50 x 10 x 2		0,00644	150	0,966

Таблиця 3. Підбір елементів решітки ферми Ф-1 поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Поперед-но прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжин а стержні в поясу, м	Загальна вага, т
1	75 x 50 x 5 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	50x32x4		0,004977	206,58	1,028093
2	РС 100 x 68 x 3 Профіль [- подібний «Akfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	100x68x1,5		0,00302	415,2	1,253904

Таблиця 4. Підбір елементів верхнього поясу Ф-2 поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Поперед-но прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжин а стержні в поясу, м	Загальна вага, т
1	100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	25x16x3		0,001821	48	0,0874

Таблиця 5. Підбір елементів нижнього поясу Ф-2 поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Поперед-но прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжин а стержнів поясу, м	Загальна вага, т
1	100 x 65 x 7 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	25x16x3		0,001821	48	0,0874

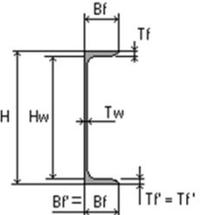
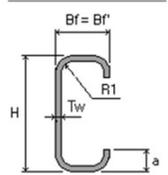
Таблиця 6. Підбір елементів решітки Ф-2 поясу після ітераційного розрахунку №1

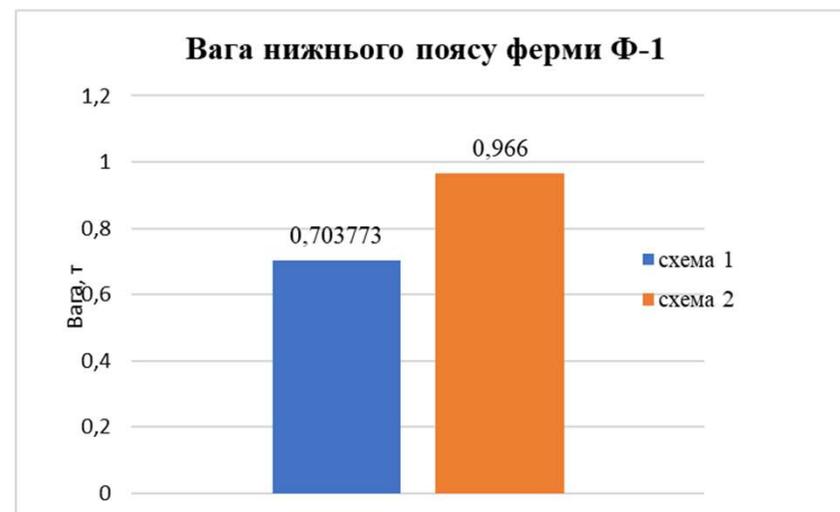
№ схем и	Поперед-но прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжин а стержнів поясу, м	Загальна вага, т
1	50 x 32 x 3 Сталь прокатна кутова нерівнополічна кутова (ГОСТ 8510-72)	25x16x3		0,001821	71,04	0,129352

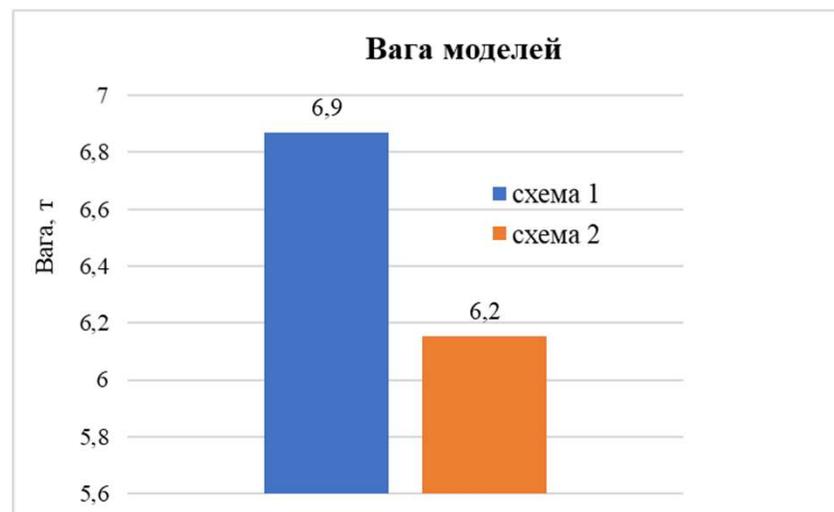
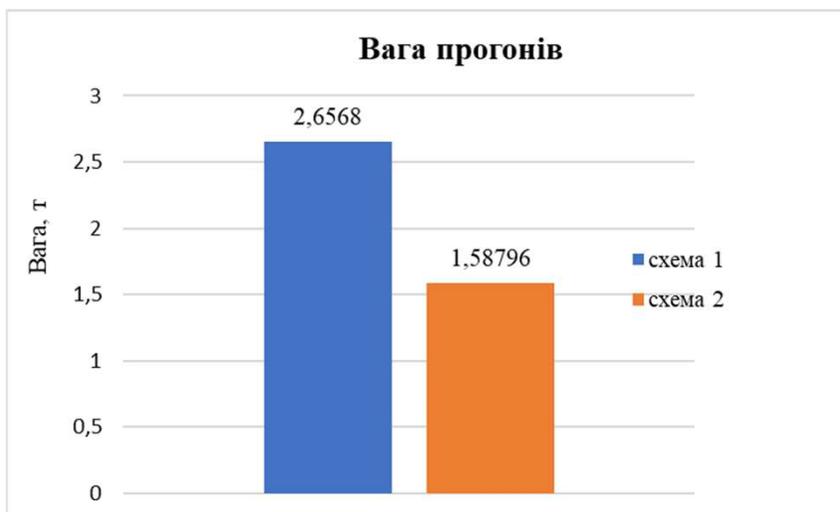
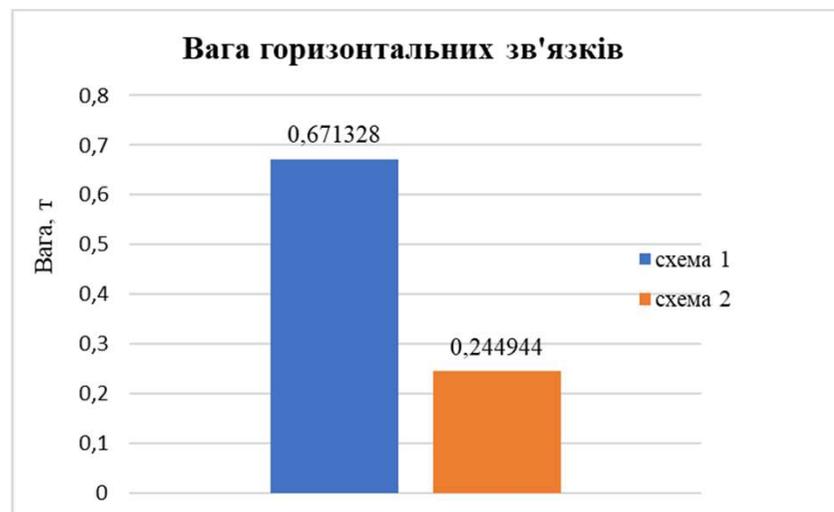
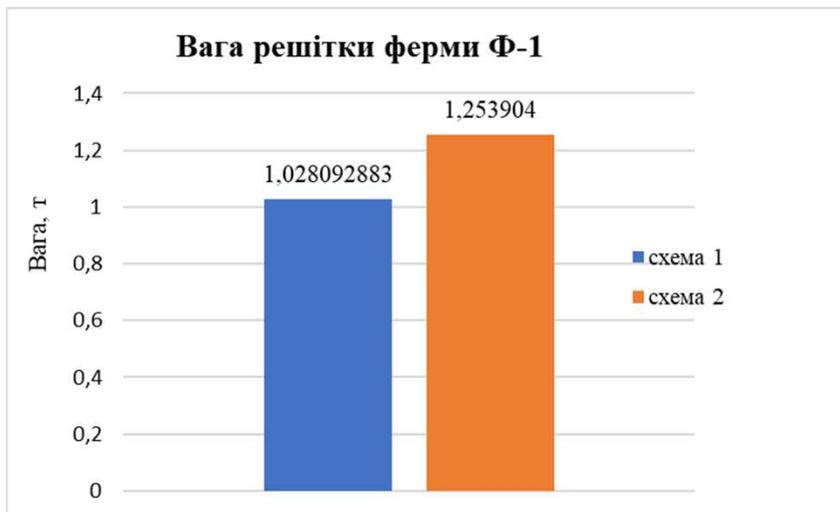
Таблиця 7. Підбір елементів горизонтальних зав'язків по нижнім поясам ферм поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Поперед-но прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага 1м.п. профілю, т	Довжин а стержні в поясу, м	Загальна вага, т
1	80 x 3 Куточки сталеві гнуті рівнополічні (Таблиця 1: R <sub>u</sub> ≤ 460 МПа) (ГОСТ 19771-93)	40x2.5		0,00296	226,8	0,671328
2	РС 120 x 68 x 3 Профіль [-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	65x32x8x1		0,00108	226,8	0,244944

Таблиця 8. Підбір прогонів після ітераційного розрахунку №1

№ схем и	Поперед-но прийнятий переріз	Профіль після 1-ї ітерації		Вага Ім.п. профілю, Т	Довжин а стержні в поясу, м	Загальна вага, Т
1	40x2.5 Швелери сталеві гарячекатані з ухилом внутрішніх граней полиць (ДСТУ 3634:96). Скорочений сортамент Україна  Профілі відповідають нормам: ДСТУ 3634:96	14У		0,0123	216	2,6568
2	РС 100 х 68 х 2 Профіль С-подібний «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020)	120x68x2		0,00401	396	1,58796

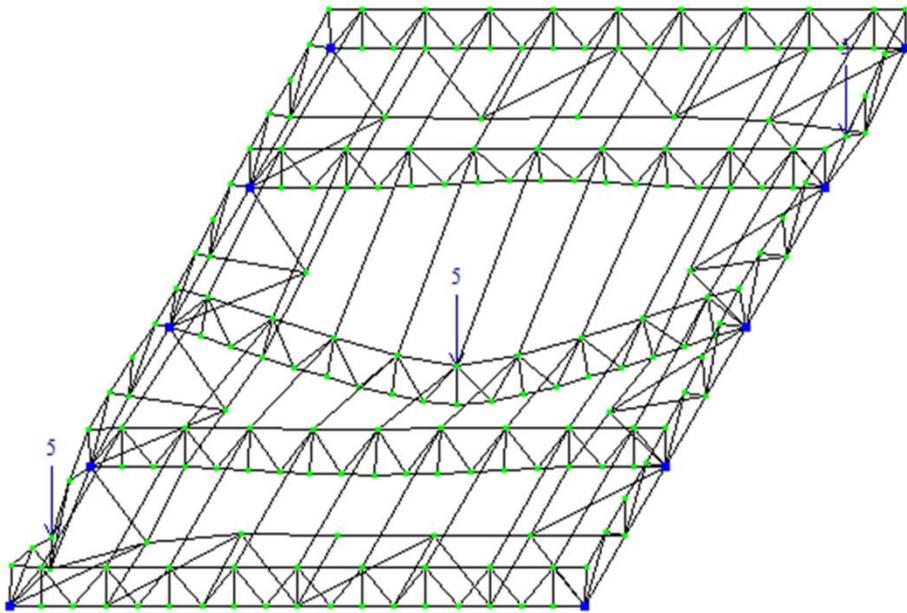




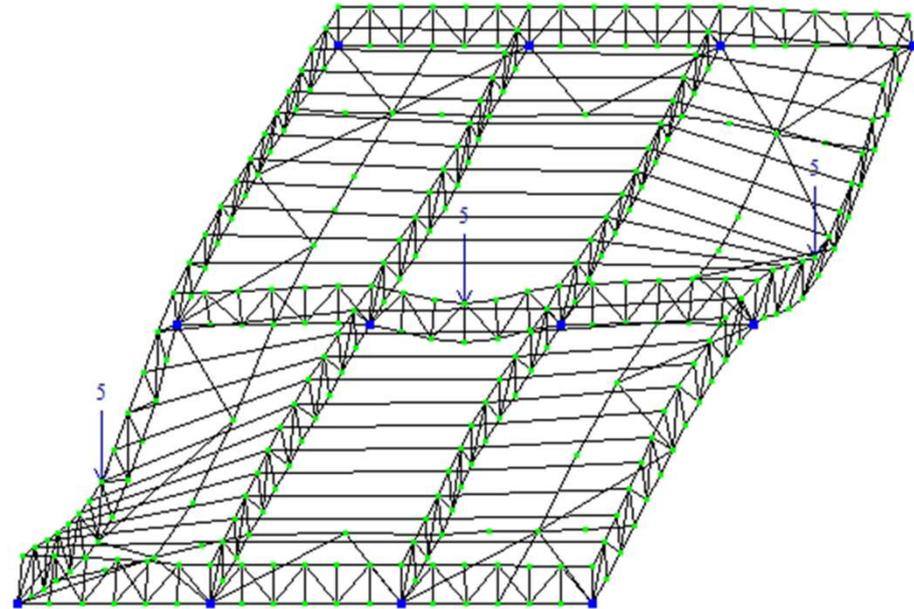
## ЛОКАЛЬНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПОКРИТТЯ

Навантаження, прикладене в довільному (будь-якому) місці покриття, викликає протидію всієї системи загалом, завдяки чому підвищується несуча здатність і жорсткість конструкції та зменшується його матеріаломісткість.

**Рис. 1 Деформована схема покриття із гарячекатаного сортаменту профілів (модель №1) при завантаженні системи локальним вузловим навантаженням**



**Рис.2 Деформована схема покриття із ЛСТК (модель №2) при завантаженні системи локальним вузловим навантаженням**



## ЛОКАЛЬНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПОКРИТТЯ

Локальне вузлове завантаження лівої нижньої ферми крайнього ряду та правої ферми крайнього ряду, а також завантаження ферми середнього ряду точковим завантаженням викликає картину деформування системи, яка показує, що в спільну роботу (до спільних деформацій) включаються елементи, сусідні із завантаженими.

При аналогічному завантаженні покриття із сталених прокатних профілів слід відмітити локальний характер деформацій елементів ферм поряд (зону поряд з точкою прикладення навантаження).

Рис. 1 підтверджує тезу, що завантаження, прикладене до будь-якої точки покриття із ЛСТК у вигляді замкнутих жорстких блоків викликає спротив протидію), а значить й включає до спільної роботи всі елементи загалом.

# ВИСНОВКИ

- **1. Змодельовано скінченоелементні схеми конструкцій покриття 18x24 м сталеві каркасної будівлі в двох варіантах:**
  - - несучими елементами покриття є крокв'яні ферми з паралельними поясами. Ферми виконані із масивних гарячекатаних сталевих елементів. Ферми прольотом 18,0 м розташовані з кроком 6м; просторова робота такого покриття забезпечується горизонтальними зв'язками по нижнім поясам ферм та прогонами що вкладені по верхнім поясам ферм;
  - - несучими елементами покриття є просторові жорсткі блоки 6,0x12,0 м з ферм, що виконані із легкх сталевих елементів (профілів) холодного формування. Просторова робота такого покриття забезпечується завдяки зв'язкам та фермам, розташованим у двох напрямках, які приймають зовнішні навантаження.
  - Тобто характер та принцип роботи фермв покриттях 1-го та 2-го типу є різним.
- **2. Максимальні переміщення  $f_z$  вузлів скінченоелементної схеми від РСН2 для моделі №2 (із ЛСТК) є на 128,% (або в 2,3 рази) меншими, ніж максимальні переміщення вузлів скінченоелементної моделі №1, що свідчить про значну жорсткість й набагатоменшу деформативність моделі покриття, де застосований принцип просторових замкнений жорстких блоків.**

- 3. Осьові зусилля стиску (максимальні) в елементах верхнього поясу для моделі №1 становлять 45,3 т, а для моделі №2 ці ж зусилля складають 12,5 т й в 3,5 рази вони є меншими. Цей факт свідчить про більш ефективну роботу на особовий стиск елементів моделі №2. Зусилля розтягу в елементах нижнього поясу становлять: для моделі №1 15,2т, а для моделі №2 6,91. Тобто і максимальні зусилля розтягу в 2,2 рази є меншими для моделі, побудованої за принципом жорстких замкнутих дисків. Подібна картина спостерігається у величинах зусиль решітки ферм моделей.**
- 4. Розрахунок на стійкість скінченоелементних моделей виявив, що коефіцієнт запасу стійкості при найнебезпечнішому сполученні навантажень становить  $n_1=3,4$  для моделі №1, а для моделі №2 такий коефіцієнт становить  $n_1 =4,92$ . Тобто в 1,45 разів модель №2 є більш стійкою ніж модель №1 без замкнутих жорстких контурів.**
- 5. Після першого ітераційного розрахунку було виконано в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР підбір нових перерізів для елементів моделей згідно вимог розрахунку за 1 ГС та 2ГС.**

**6.** Обчислено вагу кожної моделі згідно нових підібраних перерізів. Так вага моделі №1 становить 6,9 т, а вага моделі №2 6,2 т. Тобто вага моделі №2 на 11,2% є меншою, ніж вага моделі №1.

**7.** Проведено числовий експеримент з метою виявити спільну роботу моделей під навантаженням. Включення сусідніх елементів у спільну роботу найбільш чітко виявляється не при симетричному (рівномірному) завантаженні будівельної системи, а саме при прикладенні локального навантаження. Тому до вузлів верхніх поясів двох моделей було прикладене вертикальне локальне завантаження. Були проаналізовані деформовані схеми моделей. Рис. 7.1 підтверджує тезу, що завантаження, прикладене до будь-якої точки покриття за моделлю №2 (із замкнутих жорстких блоків ЛСТК) викликає спротив протидію), а значить й включає до спільної роботи всі елементи загалом.