

# Скінченно-елементне двоетапне моделювання параметрів напружено-деформівного стану плоскої ферми з паралельними поясами

М. А. Омелян<sup>1</sup>

Received: 20 November 2024 / Revised: 9 December 2024 / Accepted: 24 December 2024

**Анотація.** У даній роботі досліджується плоска ферма з паралельними поясами, виготовлена зі сталі ВСт3пс. За допомогою двоетапної методики чисельного моделювання, що базується на застосуванні програмних комплексів ЛІРА-САПР 2016 R5 та ANSYS Workbench 14.5, вивчено напружено-деформівний стан (НДС) такої ферми.

Основною проблемою є підвищення точності визначення параметрів НДС плоских ферм, що дозволить знизити їх матеріалоемність і трудомісткість проектування. Це сприятиме оптимізації виробничих процесів у будівництві та інженерії.

У роботі запропоновано двоетапну методику моделювання, яка передбачає використання двох програмних комплексів. На першому етапі створено скінченно-елементну модель в ЛІРА-САПР, де визначено попередні параметри НДС. На другому етапі цю модель деталізовано в ANSYS Workbench. Виявлено критичні зони у вузлах ферми, де напруження максимальні, що має ключове значення для подальшого проектування.

Ефективність моделювання пояснюється інтеграцією даних з обох програмних комплексів. Це дозволяє компенсувати обмеження кожного з них окремо, зокрема у моделюванні вузлів з концентрацією напружень. Методика забезпечує наочність параметрів НДС, що сприяє ефективному аналізу отриманих даних.

Робота демонструє ефективність двоетапного підходу до моделювання НДС, що дозволило досягти ефективності при визначенні параметрів напружено-деформівного стану ферми. Поєднання ЛІРА-САПР та ANSYS дозволяє ефективно враховувати як загальні міцнісні характеристики конструкції, так і локальні деформації та зони концентрацій напружень.

Результати дослідження можуть бути застосовані в будівництві промислових і громадських споруд, мостів, а також в інших галузях, зокрема в машинобудуванні, де використовуються ферми з паралельними поясами. Методика забезпечує оптимізацію матеріальних витрат і трудозатрат під час проектування, що є критично важливим для масштабних інженерних проєктів.

**Ключові слова:** плоска ферма, скінченні елементи, напружено-деформівний стан, ANSYS Workbench, LIRA-SAPR 2016 R5.

## Вступ

Плоскі ферми стали надзвичайно популярними у багатьох галузях народного господарства завдяки своїй універсальності та ефективності. Найбільш широко вони застосовуються в будівництві промислових та громадських споруд, а також у зведенні мостових переходів. Крім того, такі конструкції активно використовуються в транспортній галузі, сільськогосподарському машинобудуванні та інших сферах. Їхнє широ-

ке впровадження пояснюється різноманіттям доступних геометричних форм та високим рівнем автоматизації у процесі виготовлення. У зв'язку з цим, актуальним залишаються питання зниження трудомісткості проектування таких ферм і зменшення їх металоємності, що є важливими для оптимізації виробничих процесів та зниження витрат.

Метод скінченних елементів (МСЕ) є широко застосовуваним інструментом при проектуванні та аналізі різноманітних конструкцій, зокрема ферм. У роботі [1] представлено методику визначення довговічності з використанням ПК SolidWorks, що дозволяє ефективно оцінювати надійність конструкцій. Хоча методика ця базується на іншому програмному забезпеченні, результати, отримані в зазначеній роботі, надають важливі порівняння щодо довговічності сталевих

✉ М.А. Омелян  
mak\_omelyan@ukr.net

<sup>1</sup> Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

вих ферм. Вони вказують на важливість виявлення втоми тріщин, особливо в К-подібних вузлах на верхній хорді ферми, що є критичним фактором у процесі експлуатації конструкцій. За результатами верифікації показники втомного пошкодження виявилися точними з похибкою лише 5,7 %. Це свідчить про високу достовірність використаного методу для довгострокового моніторингу стану ферм. Однак застосування SolidWorks для цих розрахунків має свої обмеження, зокрема у моделюванні складних навантажень та матеріальних властивостей, де більш потужні програмні засоби, такі як ANSYS, можуть демонструвати кращі результати.

У порівнянні з роботою [1], у дослідженні [2] застосовано більш комплексний підхід, що включає як напівнатурний експеримент, так і комп'ютерне моделювання в середовищі ANSYS Workbench. Проведені експериментальні дослідження довговічності прямокутної зварної ферми дозволили підтвердити важливість точної візуалізації втомних пошкоджень, зокрема в К-подібних вузлах, де також спостерігається зниження несучої здатності конструкції. Порівняно з методикою, запропонованою [1], виявлено, що використання комбінованих методів дозволяє отримати більш точні результати, хоча похибка при порівнянні з напівнатурним експериментом не перевищує 5,7 %.

На відміну від цих робіт, у дослідженні [3] запропоновано новий підхід до визначення поведінки зварних ферм при термомеханічних впливах, який досягає високої достовірності результатів завдяки комп'ютерному моделюванню. Зокрема, було виявлено, що результати досліджень підпорядковуються нормальному розподілу, з мінімальними відхиленнями для межі міцності та плинності (2,1 % і 2,6 % відповідно).

Натомість робота [4] представляє значно інноваційний підхід, застосовуючи метод навчання з глибоким підкріпленням для оновлення моделей сталевих ферм. Це дозволяє інтегрувати мережу довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM) з алгоритмом глибокого детермінованого градієнта політики (DDPG), що підвищує ефективність алгоритму в реальних умовах експлуатації. Результати, отримані за допомогою алгоритму NF-LSTM-DDPG, виявилися значно точнішими, з середньою відносною похибкою 14,15 % і більш достовірними показниками зміни модуля пружності в порівнянні з іншими методами.

У роботі [5] представлено методику виявлення та визначення місця пошкоджень у сталевих фермових залізничних мостах за допомогою алгоритмів машинного навчання. Запропонований підхід дає змогу автоматично обробляти сирі сигнали з датчиків деформації без потреби в попередній обробці чи виділенні характеристик.

У дослідженні [6] здійснено структурно-параметричний синтез сталевих комбінованих ферм з прольотом 30 м з метою зменшення маси та потенційної енергії. Встановлено, що максимальна несуча здатність конструкції досягається при використанні критерію ра-

ціонального проектування за міцністю. Виявлено, що комбіновані конструкції мають значний потенціал для покращення напружено-деформованого стану та вдосконалення конструктивних рішень.

Робота [7] присвячена аналізу ключових етапів підсилення сталевих балок-прогонів похилого даху в типовому металевому каркасі з початковими геометричними недоскональностями за умов деформованої схеми. Зокрема, підсилення може здійснюватися шляхом додавання до сталеві балки легких огорожувальних елементів, таких як профільований настил складського приміщення.

Ряд інших оригінальних алгоритмів та параметрів для оптимізації сталевих конструкцій наведено в роботах [8]–[10].

Загалом, результати вищезазначених робіт підтверджують ефективність використання МСЕ для дослідження довговічності сталевих ферм, але кожна з методик має свої переваги і обмеження. Наприклад, в роботах [1]–[3] використовуються більш традиційні підходи, тоді як роботи [4], [5] пропонують більш сучасні методи з інтеграцією штучного інтелекту, що дозволяє підвищити точність прогнозування та адаптивність до реальних змін у навантаженнях та умовах експлуатації.

З огляду на викладене, актуальним залишається потреба у достовірному визначенні параметрів напружено-деформованого стану (НДС) плоских ферм для зниження металоемності та зменшення трудомісткості про розрахунку і проектуванні, а застосування комбінованих методик дозволяє отримати більш точні результати для визначення параметрів напружено-деформованого стану ферм з паралельними поясами при дії зовнішнього навантаження.

## Мета і задачі дослідження

Основною метою цієї роботи є визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) плоскої ферми з паралельними поясами з використанням двоетапної методики заснованої на сучасних мультипакетних програмних засобах, які базуються на методі скінченних елементів (МСЕ).

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

1. Із застосуванням двоетапної методики заснованої на мультипакетних програмних засобах, які реалізують метод скінченних елементів, розробити повнорозмірну скінченно-елементну модель плоскої ферми із паралельними поясами.

2. Виконати розрахунок параметрів НДС скінченно-елементної моделі плоскої ферми із паралельними поясами.

3. Провести аналіз параметрів НДС скінченно-елементної моделі плоскої ферми із паралельними поясами.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано двоетапну методику моделювання параметрів НДС плоскої ферми з паралельними поясами, яка базується на застосуванні мультипакетних програмних засобів, що використовують метод скінченних елементів. Такий підхід дозволяє отримати максимально точні результати, що сприяють оптимізації розрахунків і підвищенню ефективності проектування підбних конструкцій.

Практична значимість роботи полягає в зниженні матеріалоемності ферм та зниженню трудозатрат при проектуванні та розрахунку плоских ферм із паралельними поясам.

### Методика дослідження

Запропонована методика включає два етапи скінченно-елементного визначення параметрів напружено-деформівного стану плоскої ферми з паралельними поясами. Перший етап включає створення геометричної стрижневої моделі та скінченно-елементної моделі в середовищі програмного комплексу ЛІРА-САПР 2016 R5, задання перерізів та фізико-механічних характеристик матеріалів, прикладання навантажень і подальший розрахунок із застосуванням методу скінченних елементів. Зовнішнім навантаженням виступає зосереджена сила  $P = 10$  кН. Зусилля від  $P/2$  прикладається у двох вузлах ферми, які розташовані на верхніх поясах. В результаті в першій ітерації буде отримано набір даних в табличній формі, що включає список перерізів елементів, які забезпечать необхідну міцність та стійкість плоскої ферми з паралельними поясами.

ЛІРА-САПР 2016 R5 це багатофункціональний програмний комплекс для проектування та розрахунку машинобудівних і будівельних конструкцій різного призначення. Програма дозволяє виконувати розрахунки на статичні й динамічні навантаження, використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ) як основу. Різноманітні підключені модулі (процесори) забезпечують можливість підбору та перевірки перерізів сталевих і залізобетонних конструкцій, моделювання ґрунту, розрахунку мостів та аналізу поведінки будівель під час монтажу тощо.

ПК ЛІРА-САПР складається з декількох взаємопов'язаних інформаційних систем. Організація взаємозв'язків між цими системами забезпечує технологічність роботи з комплексом так, що комплекс сам веде користувача – від створення розрахункової моделі до конструювання елементів. Основною графічною системою є система ВІЗОР-САПР, єдине графічне середовище, що має у своєму розпорядженні великий набір можливостей і функцій для формування адекватних скінченно-елементних і супер-елементних моделей об'єктів, що розраховуються. ВІЗОР-САПР дає змогу провести докладне візуальне обстеження створених моделей і їх коригування, описати фізико-механічні властивості матеріалів [11].

У цьому ж середовищі задають зв'язки, різноманітні навантаження, характеристики різних динамічних впливів, а також призначають взаємозв'язки між різними навантаженнями з метою визначення їхніх найнебезпечніших поєднань. До складу ПК ЛІРА-САПР входить кілька розрахункових процесорів.

Лінійний процесор призначено для розв'язання задач, що описують роботу матеріалу конструкцій у лінійно-пружній постановці. Нелінійний процесор дає змогу розв'язувати задачі, пов'язані з фізичною нелінійністю матеріалу в рамках нелінійної теорії пружності та в пружно-пластичній постановці (бетон, залізобетон, сталобетон, метал, ґрунт). Розв'язання таких задач проводиться кроковим і кроково-ітераційним методом. Нелінійний процесор дає змогу розв'язувати задачі, пов'язані з геометричною нелінійністю (ванти, великопролітні покриття, мембрани), а також і з конструктивною нелінійністю (контактні задачі, односторонні зв'язки, тертя). До складу бібліотеки нелінійних скінченних елементів входять також елементи, що дають змогу здійснювати одночасне врахування фізичної та геометричної нелінійності [11].

Другий етап передбачає перебудову геометричної та скінченно-елементної моделі в ANSYS Workbench 14.5, з подальшим заданням перерізів та фізико-механічних характеристик матеріалів, прикладанням навантажень та подальший розрахунок. На обох етапах фізико-механічні характеристики матеріалів, форми і розміри поперечних перерізів елементів ферми ідентичні.

ПК ANSYS Workbench 14.5 також використовує метод скінченних елементів для математичного моделювання, поєднуючи універсальність алгоритмів для різних завдань з ефективною комп'ютерною реалізацією розрахунків. Розв'язання задачі методом скінченних елементів у програмі ANSYS здійснюється в наступній послідовності. Спочатку формуються основи скінченно-елементної моделі об'єкта, що досліджується. Здійснюються наступні кроки [12]:

- визначення фізичного типу задачі (механіка твердого тіла, теплопередача, гідродинаміка тощо) і відповідне налаштування програми;
- вибір типу скінченного елемента в залежності від розмірів та характеристик об'єкта, з можливістю задання властивостей елемента;
- вибір матеріалу об'єкта та зазначення його властивостей (об'ємна вага, межа міцності, межа плинності, коефіцієнт Пуассона тощо), які можна ввести вручну або імпортувати з бібліотеки матеріалів ANSYS. Властивості визначають матеріальну модель (лінійно-пружну, пружно-пластичну, білінійну тощо), що впливає на вибір рівнянь для методу скінченних елементів;
- створення геометричної твердотільної моделі об'єкта (3D-моделі), що виконується в модулі PREP7 у класичному ANSYS та в модулі Design Modeler в Workbench (Рис. 1). Геометричну модель також можна експортувати з будь-якого CAD-пакету;

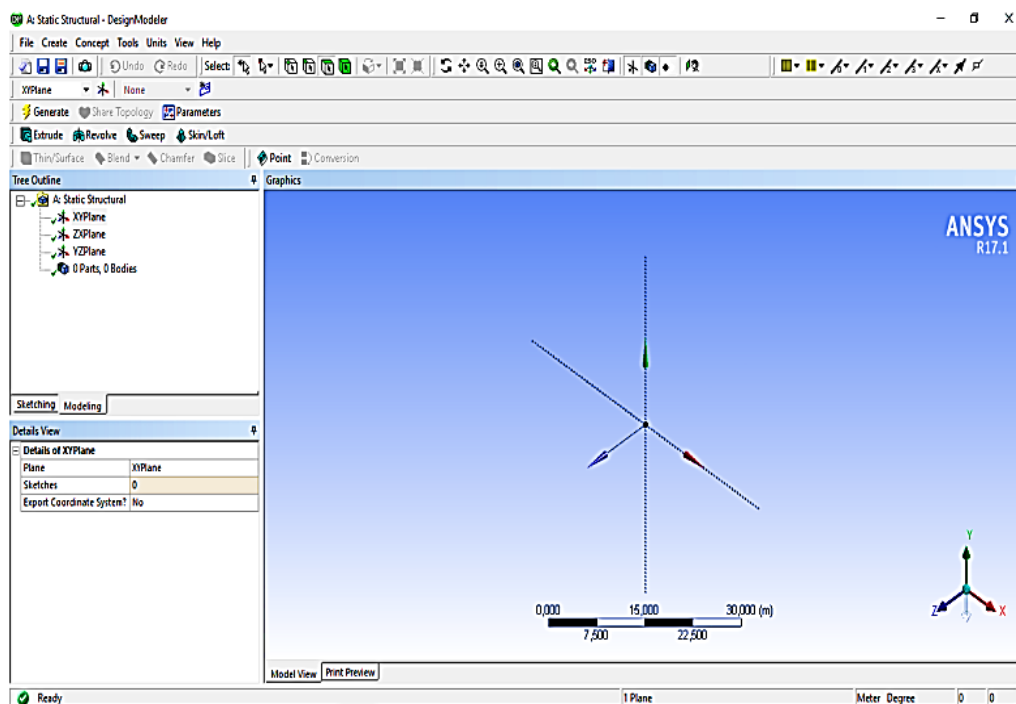


Рис. 1. Вікно модуля Design Modeler в ANSYS Workbench 14.5 [12]

– геометричну модель розбивають на скінчені елементи, з можливістю налаштування параметрів сітки.

Ця стадія формує повну математичну та фізичну модель об'єкта, що є критично важливим для отримання точних і надійних результатів у наступних етапах моделювання.

Далі накладаються фізичні умов і виконується розв'язання задачі – складається з трьох основних частин:

– задаються граничні умови (сили, переміщення, зв'язки тощо);

– вибирається тип аналізу (статичний, динамічний, модальний тощо), а також метод розв'язання рівнянь та параметри обчислювальних процедур (кількість кроків навантаження, ітерацій тощо);

– проводиться розв'язання системи рівнянь методом скінчених елементів. У результаті створюється файл із вектором знайдених ступенів свободи (вузлові переміщення, температури тощо).

Описаний етап необхідний для безпосереднього проведення чисельного аналізу моделі з використанням методу скінчених елементів. Він дозволяє сформулювати математичну постановку задачі, враховуючи фізичні умови та параметри навантаження, і отримати результати, що характеризують поведінку конструкції.

Третя стадія полягає в аналізі отриманих результатів. Фізичні величини, розраховані методом скінчених елементів (переміщення, деформації, напруження, температури тощо), відображаються в графічному інтерфейсі ANSYS у вигляді зображень, таблиць, графіків або анімацій. Всі ці результати можна зберігати в відповідних файлах [12]. Визначена на цьому етапі інформативність дозволяє отримати розуміння про роботу

конструкції в цілому, а також окремих її компонентів. Що дозволяє зробити висновки про ефективність прийнятих конструктивних рішень.

### Матеріали та методи дослідження

Для скінченно-елементного моделювання на першому етапі використовувалася ферма з паралельними поясами і трикутною решіткою (Рис. 2) та геометричними розмірами 18000x3600 мм. Матеріал ферми – сталь ВСт3пс, відповідні фізико-механічні властивості імпортовано із моделі матеріалу для сталі ВСт3пс. Модуль пружності сталі  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа, густина  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Профіль розкосів та поясів – прокатні кутники перерізом 100x100x10 мм. Ферма завантажена

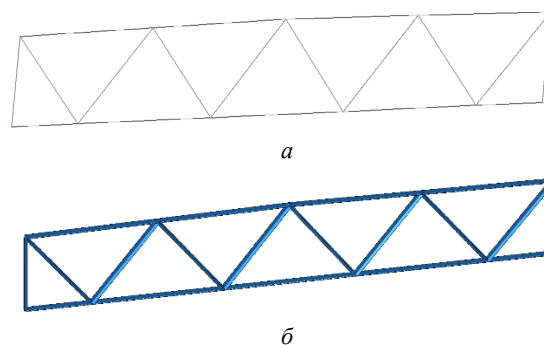


Рис. 2. Модель ферми в середовищі ЛІРА-САПР 2016 R5: а) геометрична модель; б) скінченно-елементна сіткова модель

зовнішнім загальним сумарним навантаженням у вигляді зосередженої сили  $P = 10$  кН. Сила  $P$  (10 кН) розподілена між двома вузлами на верхньому поясі ферми. Так, на кожний із цих вузлів припадає половина загальної сили, тобто  $P/2 = 10 \text{ кН}/2 = 5$  кН.

Для скінченно-елементного моделювання на другому етапі в середовищі ANSYS (Рис. 3) використовувалася ферма з аналогічними параметрами як і в ЛІРА-САПР 2016 R5. Геометричні розміри  $18000 \times 3600$  мм. Матеріал ферми – сталь ВСт3пс, відповідні фізико-механічні властивості імпортовано із моделі матеріалу для сталі ВСт3пс. Профіль розкосів та поясів – прокатні кутники перерізом  $100 \times 100 \times 10$  мм. Косинки у вузлах виготовлені зі сталевого листа товщиною 10 мм. Ферма навантажена зовнішнім навантаженням у вигляді зосередженої сили  $P = 10$  кН. Зусилля від  $P/2$  прикладається у двох вузлах ферми, які розташовані на верхніх поясах. Дані розрахунку імпортувались з ПК ЛІРА-САПР 2016 R5 та перебудовувалась геометрична та скінченно-елементна модель повнорозмірної ферми із наступним розбиттям на скінченно-елементну сітку в середовищі ANSYS.

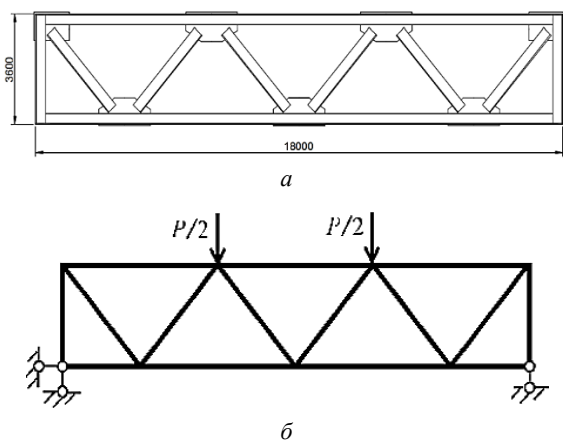


Рис. 3. Графічна схема ферми: а) схема решітки ферми; б) схема навантаження ферми

В середовищі програмного комплексу ANSYS Workbench 14.5. створено геометричну модель повнорозмірної ферми із наступним розбиттям на скінченно-елементну сітку (Рис. 4). Відображено форми поперечних перерізів розкосів, поясів та опорних стійок.

Зображена тривимірна геометрична структура ферми, яка розроблена в модулі Design Modeler є основою для подальшого аналізу і відображає геометричні параметри об'єкта. Також показано результат розбиття геометричної моделі на скінченні елементи. Ця сіткова модель використовується для виконання розрахунків методом скінченних елементів. Рис. 4 ілюструє перехід від САД-моделювання до етапу САЕ-аналізу, підкреслюючи важливість точності побудови геометричної моделі та якості створення сітки для забезпечення достовірності розрахунків.

Скінченно-елементна сітка в ANSYS створена розмірами  $10 \times 10$  мм, у фасонках сітка дискретна. В ПК ЛІРА-САПР 2016 R5 скінченно-елементна сітка створена із аналогічними параметрами, за винятком фасонки.

### Результати дослідження

В результаті застосування скінченно-елементного моделювання (СЕМ) ферми з паралельними поясами на першому етапі отримано схему деформування ферми (Рис. 5). (позначено рожевими лініями) в порівнянні з недеформованим станом (чорні лінії).

Деформації масштабовані для більшої наочності. Помітно зміну геометрії конструкції в результаті навантаження. Верхній прогинається вниз, а розкоси змінюють кут нахилу.

Також, у результаті СЕМ побудовано схеми переміщень вузлів ферми (Рис. 6) у вузлах ферми в напрямку осі Z, під дією заданих навантажень. Переміщення відображено в масштабованій формі для кращого розуміння поведінки конструкції. Визначено області максимальної деформації, якими є місця прикладання зусиль, що дало змогу ідентифікувати потенційно слабкі місця конструкції.

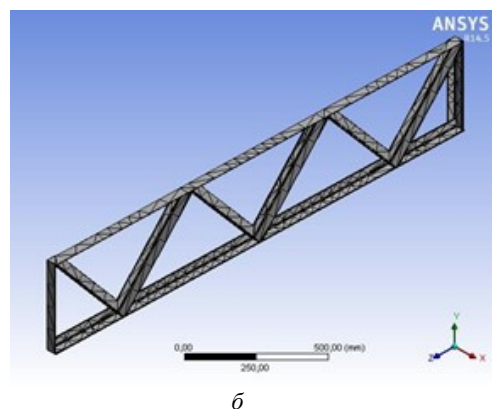
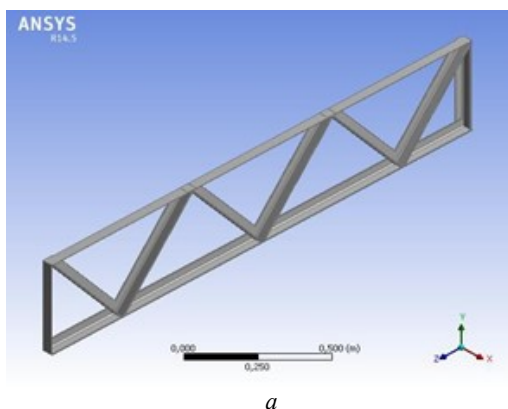


Рис. 4. Модель ферми в середовищі ANSYS Workbench 14.5: а) САД – геометрична модель; б) САЕ – скінченно-елементна сіткова модель

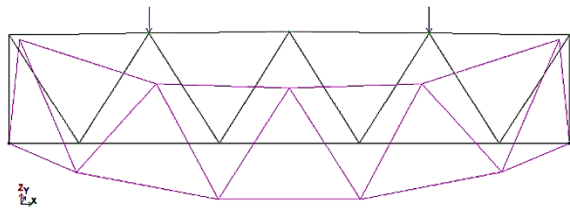


Рис. 5. Схема деформування ферми із паралельними поясами

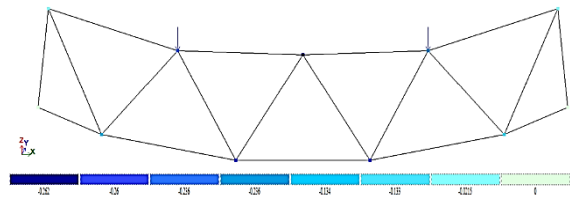


Рис. 6. Схема переміщень вузлів ферми

Колірна шкала вгорі відображає величину переміщень (у міліметрах), де сині тони вказують на від'ємні переміщення (опускання вузлів), зелені та нейтральні зони відповідають мінімальним або відсутнім переміщенням. Максимальні переміщення знаходяться у центральній частині верхнього поясу ферми, що типово для конструкцій, які зазнають вертикальних навантажень. Встановлено, що максимальні прогини становлять 0,24 мм. Переміщення поступово зменшуються до крайніх вузлів, де ферма закріплена.

На рис. 7 представлено мозаїчний розподіл згинальних моментів  $M_y$  в стержневих елементах ферми. Величина моментів відображається за допомогою колірної шкали, розташованої зверху рисунка. Значення моментів змінюються від негативних (сині тони) до позитивних (жовті та помаранчеві тони).

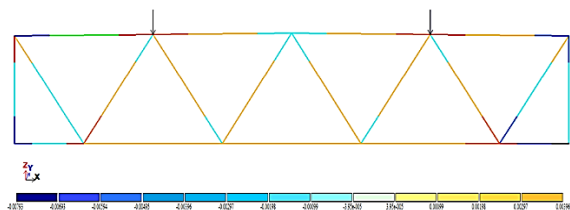


Рис. 7. Розподіл згинальних моментів  $M_y$

Максимальні значення позитивних моментів спостерігаються в центральних частинах верхнього поясу ферми, що обумовлено дією зовнішніх навантажень, спрямованих вниз. Негативні моменти локалізовані переважно в крайніх ділянках елементів, що з'єднують верхній і нижній пояси. Це відповідає типовій поведінці ферми під дією навантаження. Локальні зони різкого переходу кольору вказують на вузли з високою концентрацією моментів, що вимагає ретельного аналізу для уникнення перевантажень.

Рис. 8 демонструє розподіл поперечних сил  $Q_z$  у стержневих елементах ферми. Колірна шкала показує зміну значень сили в межах усієї конструкції.

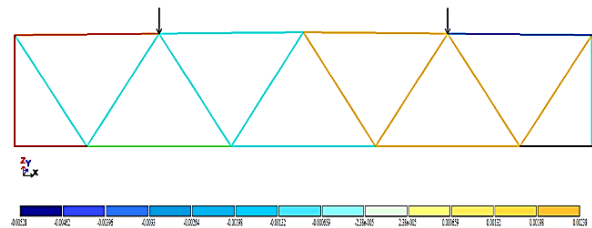


Рис. 8. Розподіл поперечних сил  $Q_z$

В центральній частині конструкції локалізовано мінімальні значення поперечних сил (наближаються до нуля), що є типовим для елементів, орієнтованих уздовж осі ферми. Максимальні значення (жовті та помаранчеві тони) зосереджені в крайніх зонах, ближче до опорних вузлів, де ферма передає навантаження на опори. Спостерігається поступове зменшення величини поперечних сил у напрямку до центральної частини, що відповідає теоретичному розподілу зусиль у фермах.

На другому етапі із застосуванням ANSYS Workbench 14.5. отримано розподіл напружень у вузлах ферми по осі  $o_y$ , викликаних дією зовнішніх сил. На рис. 9 показано розподіл нормальних напружень у мегапаскалях (МПа) по всій конструкції ферми.

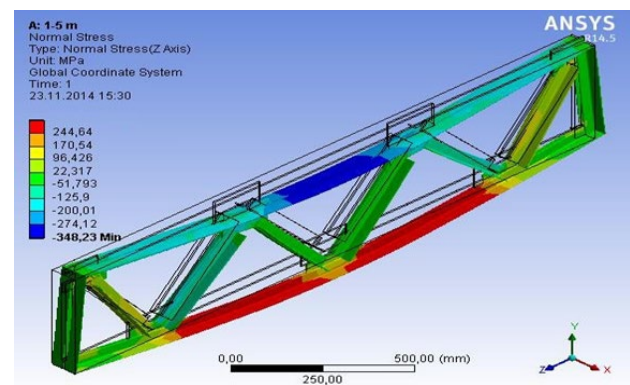
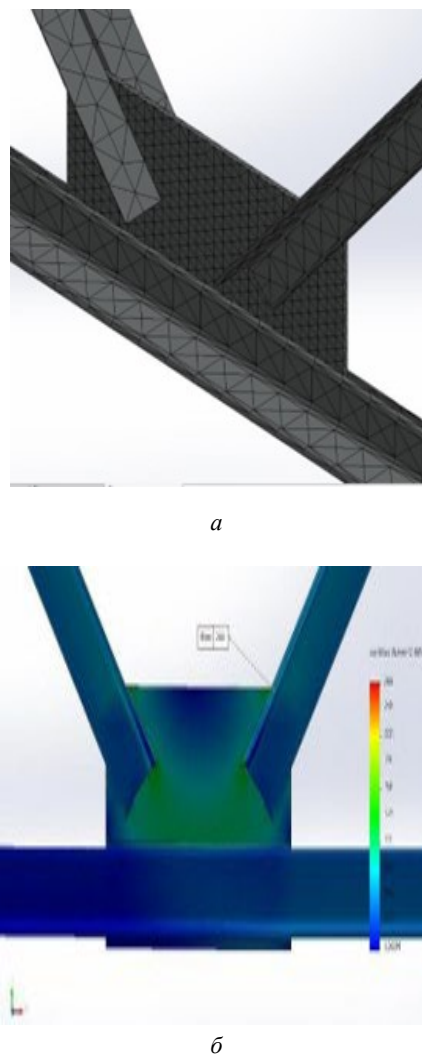


Рис. 9. Розподіл нормальних напружень

Найвищі значення напружень, позначені червоним кольором і сягають 244,6 МПа. Вказані числові значення напружень у різних елементах конструкції, що дозволяє оцінити її міцність більш локалізовано, на відміну від даних, отриманих в розрахунковому комплексі ПК ЛІРА-САПР 2016 R5. Так, на рис. 10 наведено скінченно-елементну сітку та розподіл нормальних напружень у К-подібному вузлі.



**Рис. 10.** Розподіл нормальних напружень в нижньому середньому вузла, а) Розбиття К-подібного вузла на скінченно-елементну сітку, б) Розподіл нормальних напружень у К-подібному вузлі

Провівши аналіз можна стверджувати, що максимальні напруження зосереджені в місцях з'єднання розкосів з косинкою, а також в зоні передачі зусиль від розкосів на нижній пояс.

Таким чином, можна стверджувати, що застосування тільки одного розрахункового комплексу, в даному випадку ПК ЛІРА-САПР 2016 R5, дає тільки узагальнене розуміння роботи конструкції, без графічного відображення розподілу напружень в окремих її елементах чи місцях. Можливим є тільки наявність розподілу згинальних моментів  $M_x$ , поперечних сил  $Q_z$ , та поздовжніх сил  $N$ . Натомість, зазначений розрахунковий комплекс підходить для першого (інженерного) етапу моделювання параметрів напружено-деформівного стану плоскої ферми з паралельними поясами.

Водночас використання ANSYS Workbench 14.5. на другому етапі дає більш конкретне розуміння на основі наявності наочних даних про розподіл та локалізацію напружень, місцеві концентрації напружень та деформацій. Однак через складність побудови моделі в зазначеному комплексі, отримання цих даних потребує значного часу. Зокрема в ANSYS Workbench 14.5 не реалізована функція підбору поперечних перерізів, через що необхідно провести декілька ітерацій розрахунків.

Використання на першому етапі ПК ЛІРА-САПР 2016 R5 зумовлює скорочення термінів розрахунків, а подальше перенесення скінченно-елементної моделі в ANSYS Workbench 14.5 зумовлює глибше розуміння параметрів напружено-деформівного стану плоскої ферми з паралельними поясами., що сприяє ефективнішому підбору та розташуванню елементів ферми.

## Висновки

У роботі створено повнорозмірну скінченно-елементну модель плоскої ферми з паралельними поясами, що реалізовано за допомогою мультипакетних програмних засобів (ЛІРА-САПР 2016 R5 та ANSYS Workbench 14.5). Особливістю моделі є інтеграція геометричних параметрів із реальними фізико-механічними характеристиками матеріалів, що дозволяє враховувати специфіку конструкцій при різних зовнішніх навантаженнях. Це вирізняється високою точністю моделювання в порівнянні з існуючими підходами.

Виконано розрахунок параметрів НДС для скінченно-елементної моделі ферми, що дозволило отримати результати напружень і деформацій у критичних елементах конструкції. Зокрема, встановлено, що вузли з'єднання (особливо К-подібні) є найбільш вразливими до втомних пошкоджень. Особливістю методики є використання двох програмних комплексів, що підвищує точність розрахунків і забезпечує хорошу верифікацію результатів.

Проведений аналіз показав, що застосування двоступінної методики моделювання із використанням ЛІРА-САПР і ANSYS сприяє як загальному усвідомленню роботи ферми так і більш локальному розумінню роботи елементів конструкції. Це створює передумови для ефективного для визначення параметрів НДС. Інтерпретація результатів вказує на можливість зниження матеріалоемності ферми шляхом оптимізації перерізів окремих елементів, також зменшується трудомісткість при проектуванні ферм.

Запропонована методика є ефективним інструментом для підвищення точності інженерних розрахунків і може бути адаптована до інших типів ферм, що розширює її практичну значущість.

## References

- [1] Y. Shved, Y. Kovalchuk, N. Shynhera and V. Voronchak, “Fatigue damage of the heel joint of welded roof truss”, *Scientific Journal of TNTU*, Vol. 99(3), pp. 28–33, 2020, doi: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2020.03.028](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03.028).
- [2] M. Basara, Y. Kovalchuk, N. Shynhera, “Durability of a welded truss under cyclic loads”, *Innovative Solution in Modern Science*, Vol. 5, No. 41, pp. 147–158, 2021, doi: [https://doi.org/10.26886/2414-634X.5\(41\)2020.11](https://doi.org/10.26886/2414-634X.5(41)2020.11).
- [3] Y. Kovalchuk, N. Shynhera and Y. Shved, “Formation of input information arrays for computer simulation of welded trusses behavior under thermal force effects”, *Scientific Journal of TNTU*, Vol. 110, No. 2, pp. 118–124, 2023, doi: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2023.02.118](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.02.118).
- [4] H. Liu, Z. Yang, T. Zhou, L. Wang and Z. Chen, “Study on updating finite element model of steel truss structure based on knowledge-enhanced deep reinforcement learning”, *Engineering Structures*, Vol. 316, 118576, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118576>.
- [5] F. Parisi, A.M. Mangini, M.P. Fanti, Jose M. Adam, “Automated location of steel truss bridge damage using machine learning and raw strain sensor data”, *Automation in Construction*, Vol. 138, 104249, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104249>.
- [6] M. Hohol, G. Gasii, V. Pents and D. Sydorak, Structural-parametric synthesis of steel combined trusses. In International Conference building innovations, pp. 163–171, 2020, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_16).
- [7] S. Hudz, L. Storozhenko, G. Gasii and O. Hasii, Features of operation and design of steel sloping roof purlins. In International Conference building innovations, pp. 65–73, 2019, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_8).
- [8] T. N. Huynh, D. T. Do and J. Lee, “Q-Learning-based parameter control in differential evolution for structural optimization”, *Applied Soft Computing*, Vol. 107, 107464, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107464>.
- [9] A. Kaveh, N. Khodadadi and S. Talatahari, “A comparative study for the optimal design of steel structures using CSS and ACSS algorithms”, *Iran Univ Sci Technol*, Vol. 11(1), pp. 31–54, 2021, doi: <https://iyoce.iust.ac.ir/article-1-464-en.pdf>.
- [10] N. Khodadadi and S. Mirjalili, “Truss optimization with natural frequency constraints using generalized normal distribution optimization”, *Appl Intell*, Vol. 52, pp. 10384–10397, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-021-03051-5>.
- [11] E. Strelets-Streletsky, A. Zhuravlev and R. Vodopyanov, LIRA-SAD. Book I. Fundamentals LIRALAND Publishing House, 2019.
- [12] V. Vasylykiv, L. Danylchenko, D. Radyk and O. Divdyk, Methodical workshop on the topic: ‘Engineering analysis in Ansys Workbench’ in the discipline: ‘Computer modelling of materials processing processes’ for practical classes and independent work of applicants for the educational level of Doctor of Philosophy in speciality 131 “Applied Mechanics”. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2021. Available: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35162>.

## Finite-element two-stage modelling of stress-strain state parameters of a planar truss with parallel chords

M. Omelian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

**Abstract.** This paper investigates a planar truss with parallel belts made of VcT3ps steel. The stress-strain state (SSS) of such a truss is studied using a two-stage numerical modelling method based on the application of LIRA-SAPR 2016 R5 and ANSYS Workbench 14.5 software packages. The main problem is to improve the accuracy of determining the parameters of the stress-strain state of flat trusses, which will reduce their material consumption and design complexity. This will facilitate the optimization of manufacturing processes in construction and engineering. The paper proposes a two-stage modelling methodology that involves the use of two software packages. At the first stage, a finite-element model is created in LIRA-SAPR, where the preliminary parameters of the SSS are determined. At the second stage, this model was detailed in ANSYS Workbench. Critical zones in the truss nodes where stresses are maximum were identified, which is key for further design. The modelling efficiency is due to the integration of data from both software packages. This makes it possible to compensate for the limitations of each of them separately, in particular in modelling nodes with stress concentrations. The methodology provides visibility of the stress-strain state parameters, which contributes to the effective analysis of the data obtained.

The work demonstrates the effectiveness of a two-stage approach to modelling the stress-strain state, which has made it possible to achieve efficiency in determining the parameters of the stress-strain state of a truss. The combination of LIRA-CAD and ANSYS allows to effectively take into account both the overall strength characteristics of the structure and local deformations and stress concentration zones.

The results of the study can be applied in the construction of industrial and public buildings, bridges, as well as in other industries, including mechanical engineering, where parallel girders are used. The methodology ensures the optimization of material costs and labour costs during design, which is critical for large-scale engineering projects.

**Keywords:** plane truss, finite elements, stress-strain state, ANSYS Workbench, LIRA-SAPR 2016 R5.