

Академія технічних наук України

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
У ГАЛУЗІ БУДІВНИЦТВА**

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ

ТОМ 1

Видавець Кушнір Г.М.
Івано-Франківськ – 2022

УДК 69
ББК 38
Н 34

*Рекомендовано до друку Вченою Радою наукової установи
Академія технічних наук України (протокол №4 від 09.08.2022 року).*

Рецензенти:

завідувач кафедри будівництва та енергоефективних споруд
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу,
доктор технічних наук, професор **В.І. Артим**;
професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції
Київського національного університету будівництва і архітектури,
доктор технічних наук, професор **В.О. Мілейковський**;
професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції
аеропортів Національного авіаційного університету,
доктор технічних наук, професор **Н.О. Махінько**.

Н 34 **Науково-технічні дослідження у галузі будівництва:** колективна
монографія / заг. ред. Д.О. Банніков. – Академія технічних наук
України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г.М. – 2022. Т1. – 208 с.
ISBN 978-617-7926-37-4

У монографії досліджено статику і динаміку вітчизняних промислових будівель зі сталевим каркасом, розроблено аналітичну модель міцності надземних переходів нафтопроводів, споруджених на гірських територіях, досліджено міцність двошарових бетонних колон з урахуванням контактної взаємодії між неоднорідними шарами, розглянуто особливості формування напружено-деформованого стану замкових з'єднань елементів бурильної колони, досліджено пружну взаємодію обсадної труби і муфти у кінчному різьбовому з'єднанні з ущільненням.

УДК 69
ББК 38

ISBN 978-617-7926-37-4

© Авторський колектив, 2022
© Академія технічних наук України, 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
Банніков Дмитро. СТАТИКА І ДИНАМІКА ВІТЧИЗНЯНИХ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ ЗІ СТАЛЕВИМ КАРКАСОМ	7
Андрусяк Андрій. АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ МІЦНОСТІ НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ НАФТОПРОВODІВ, СПОРУДЖЕНИХ НА ГІРСЬКИХ ТЕРИТОРІЯХ	50
Величкович Андрій. ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ДВОШАРОВИХ БЕТОННИХ КОЛОН З УРАХУВАННЯМ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ НЕОДНОРІДНИМИ ШАРАМИ	83
Палійчук Ігор. ПРУЖНА ВЗАЄМОДІЯ ОБСАДНОЇ ТРУБИ І МУФТИ У КОНІЧНОМУ РІЗЬБОВОМУ З'ЄДНАННІ З УЩІЛЬНЕННЯМ	117
Фафлей Олег. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАМКОВИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ	172

ПЕРЕДМОВА

В монографії представлені результати досліджень, присвячених аналізу роботи сталевих каркасів вітчизняних промислових будівель. В якості об'єкту досліджень розглядаються будівлі виробничого типу, II класу, I ступеня довговічності, не нижче III ступеня вогнестійкості, одноповерхові, з мостовими кранами, з каркасною конструктивною схемою, виконані зі сталевих профілів, неопалювальні, із суміщеним освітленням, безліхтарні. В якості методу досліджень використовувався метод скінчених елементів на базі вітчизняних проєктно-обчислювальних комплексів SCAD та Lira. Аналізувалась як статичні, так і динамічні характеристики сталевих каркасів на прикладі будівель, розташованих в м. Дніпро. Серед основних отриманих результатів слід відзначити: найбільш ефективним для каркасів подібних будівель є холодногнутий профіль; спектр парціальних частот основних конструктивних елементів знаходиться в діапазоні 0,3-23 Гц, що корелює зі спектром шкідливих для здоров'я людини частот, тому в практиці потрібні додаткові заходи з метою захисту людини від їх дії.

На сьогодні в низці гірських регіонів світу стаються аномальні зміни клімату, які провокують несприятливі фізико-географічні процеси (ерозії, селі, заболочення, підтоплення тощо). Тому врахування впливу позаштатних змін податливості ґрунтової основи на міцність надземних переходів нафтопроводів має важливе діагностичне значення. Запропоновано оригінальний підхід до механіко-математичного моделювання надземних переходів нафтопроводів. Пропонований підхід дозволяє враховувати вплив на поведінку нафтопроводу, зміни властивостей його ґрунтової основи, і при цьому отримувати остаточні оцінки міцності у вигляді простих аналітичних виразів, які є зручними для інженерної практики. Здобуто аналітичні розв'язки крайової задачі, які описують розподіл зусиль, напружень та переміщень в надземній споруді з урахуванням її контактної взаємодії з ґрунтовою основою. Встановлено ефекти

перерозподілу зусиль в надземному переході нафтопроводу при позаштатній зміні властивостей ґрунтової основи.

Розвинуто ідею механічного рециклінгу полімерних відходів та їх використання для виготовлення будівельних виробів. Представлено будівельний виріб – шарувату бетонну колону, яка виготовлена із використанням утилізованого поліетилентерефталату. Здійснено механіко-математичне моделювання поведінки такої колони під дією експлуатаційного навантаження, експериментально визначено механічні характеристики бетону з різною кількістю полімерного наповнювача. Досліджено напружено-деформований стан двошарової бетонної колони з урахуванням контактної взаємодії між неоднорідними шарами матеріалу. Встановлено, що контактний тиск між шарами може чинити суттєвий вплив на несучу здатність колони і його слід враховувати при оцінці міцності. Принагідно проаналізовано особливий випадок застосування шаруватих сталобетонних колон, за якого осьове навантаження передається на бетонне ядро, а підкріплюючою обоймою є пакет сталевих оболонок.

У нафтових і газових свердловинах застосовують обсадні труби, які з'єднують муфтами з ущільненням і конічною різьбою. Ці з'єднання складаються з кільцевих ділянок у вигляді тонких оболонок з лінійно змінною товщиною стінки. Кожна ділянка деформується осесиметрично під дією внутрішнього і зовнішнього тисків, контактних тисків у різьбі та ущільненні, впливу деформацій суміжних ділянок.

Ці деформації описані неоднорідним диференціальним рівнянням четвертого порядку. Знайдено його розв'язок у вигляді комбінації функцій Бесселя та вирази розподілів вздовж ділянки радіальних деформацій, кутів поворотів, внутрішніх згинальних моментів і поперечних сил у її стінці. На їх основі розроблено методику визначення деформацій і контактних тисків на ділянках з'єднання з натягом, куди залучено формули Ламе, щоб врахувати радіальні зміщення шарів циліндра по товщині стінки. Розроблено математичну модель пружної взаємодії ділянок труби і муфти у конічному різьбовому з'єднанні з ущільненням на основі рівнянь рівноваги

контактних тисків та балансу радіальних натягів і деформацій стінок ділянок у з'єднанні.

На основі програмної моделі усього з'єднання досліджено закономірності розподілу контактних тисків у різьбі й ущільненні з'єднаних з натягом муфти і труби, вплив конструктивних та експлуатаційних чинників на зміну цих тисків і герметичність з'єднання. За їх результатами розроблено удосконалену конструкцію високогерметичного муфтового з'єднання обсадних труб, захищену патентами.

Розглянуто питання підвищення втомної міцності замкових різьбових з'єднань елементів бурильної колони.

Досліджено напружено-деформований стан одноопорного та двоопорного замкового різьбового з'єднання обважнених бурильних труб. Визначено вплив конструктивних елементів на розподіл напружень у двоопорному замковому різьбовому з'єднанні. Оптимізовано геометричні параметри додаткової опори ніпеля двоопорного замкового різьбового з'єднання обважнених бурильних труб. Досліджено вплив розміщення основної площини різьби замкового різьбового з'єднання елементів бурильної колони на напружено-деформований стан.

Визначено оптимальні довжини ніпеля додаткової опори для 14 типорозмірів розробленої конструкції двоопорного замкового різьбового з'єднання обважнених бурильних труб. Виведено безрозмірний коефіцієнт та побудовано його залежності від величини перекриття ніпеля та муфти у зоні додаткового опорного торця і може застосовуватися при розробленні інших типорозмірів різьб аналогічної конструкції.

Результати натурних експериментальних досліджень розробленої конструкції та методики розрахунку моменту згвинчування двоопорного замкового різьбового з'єднання підтверджують проведені дослідження імітаційним моделюванням.

Статика і динаміка вітчизняних промислових будівель зі сталевим каркасом

Дмитро Банніков

*Український державний університет науки і технологій,
м. Дніпро, Україна*

І. ІСНУЮЧІ ПРОМИСЛОВІ БУДІВЛІ ЗІ СТАЛЕВИМ КАРКАСОМ

Впродовж минулого сторіччя на території сучасної України була побудована доволі значна кількість різноманітних за своїм типом промислових будівель зі сталевим каркасом. Переважна більшість таких будівель продовжує експлуатуватись й дотепер, особливо в крупних промислових регіонах, таких як наприклад, Дніпропетровщина.

Поперед всього необхідно розібратися, що мається на увазі під промисловими будівлями відповідно до нормативної бази України. Відразу слід відмітити, що на тепер практично відсутні спеціалізовані нормативні документи (зокрема ДБН або ДСТУ), які б регламентували цю сферу. Мають місце лише поодинокі вузько спеціалізовані норми, як наприклад [1]. Тому фахівці намагаються відобразити це питання різноманітним чином, переважно у фаховій або, навіть, навчальній літературі. Остання, до речі, є більш досконалою в цьому плані.

Так, відповідно до [2] промислове будівництво передбачає створення основних фондів промисловості, в т.ч. і зведення промислових будівель. Останні в свою чергу, як правило, входять до складу промислових підприємств. Промислові будівлі – це будівлі, призначені для розміщення промислових виробництв та для забезпечення необхідних виробничих і санітарно-гігієнічних умов для працюючих.

Згідно «Державного класифікатора будівель та споруд» ДК 018-2000 [3] промислові будівлі включають «... криті будівлі

промислового призначення ...» та поділяються за їх галуззю призначення на наступні 9 видів:

- будівлі підприємств машинобудування та металообробної промисловості;
- будівлі підприємств чорної металургії;
- будівлі підприємств хімічної та нафтохімічної промисловості;
- будівлі підприємств легкої промисловості;
- будівлі підприємств харчової промисловості;
- будівлі підприємств медичної та мікробіологічної промисловості;
- будівлі підприємств лісової, деревообробної та целюлозно-паперової промисловості;
- будівлі підприємств лісової індустрії, будівельних матеріалів та виробів, скляної та фарфоро-фаянсової промисловості;
- будівлі інших промислових виробництв, включаючи поліграфічне.

В загальній класифікації вони займають наступне місце – рис. 1.

Проте така класифікація серед фахівців вважається доволі однобічною, оскільки існує досить значна кількість параметрів промислових будівель, за якими їх можна класифікувати [4]. Аналізуючи, як зазначалось вище, спеціалізовану навчальну літературу [2, 5], є можливим створення більш загальної класифікації промислових будівель – рис. 2. з урахуванням запропонованих фахівцями в роботі [6] пропозицій. Вона передбачає наступний поділ промислових будівель на види:

1) за функціональним призначенням на чотири основні групи: виробничі, енергетичні, будівлі транспортно-складського господарства і допоміжні будівлі.

До виробничих належать будівлі, в яких здійснюється випуск готової продукції або напівфабрикатів. Вони поділяються на багато видів відповідно до галузей виробництва, як наприклад, згідно з класифікатором ДК 018-2000. До енергетичних належать будівлі ТЕЦ (теплоелектроцентралей), котельних, електричні і трансформаторні підстанції та ін. До будівель транспортно-складського господарства

належать гаражі, склади готової продукції, пожежні депо та ін. До допоміжних будівель належать адміністративно-конторські, побутові, пункти харчування, медичні пункти та ін.

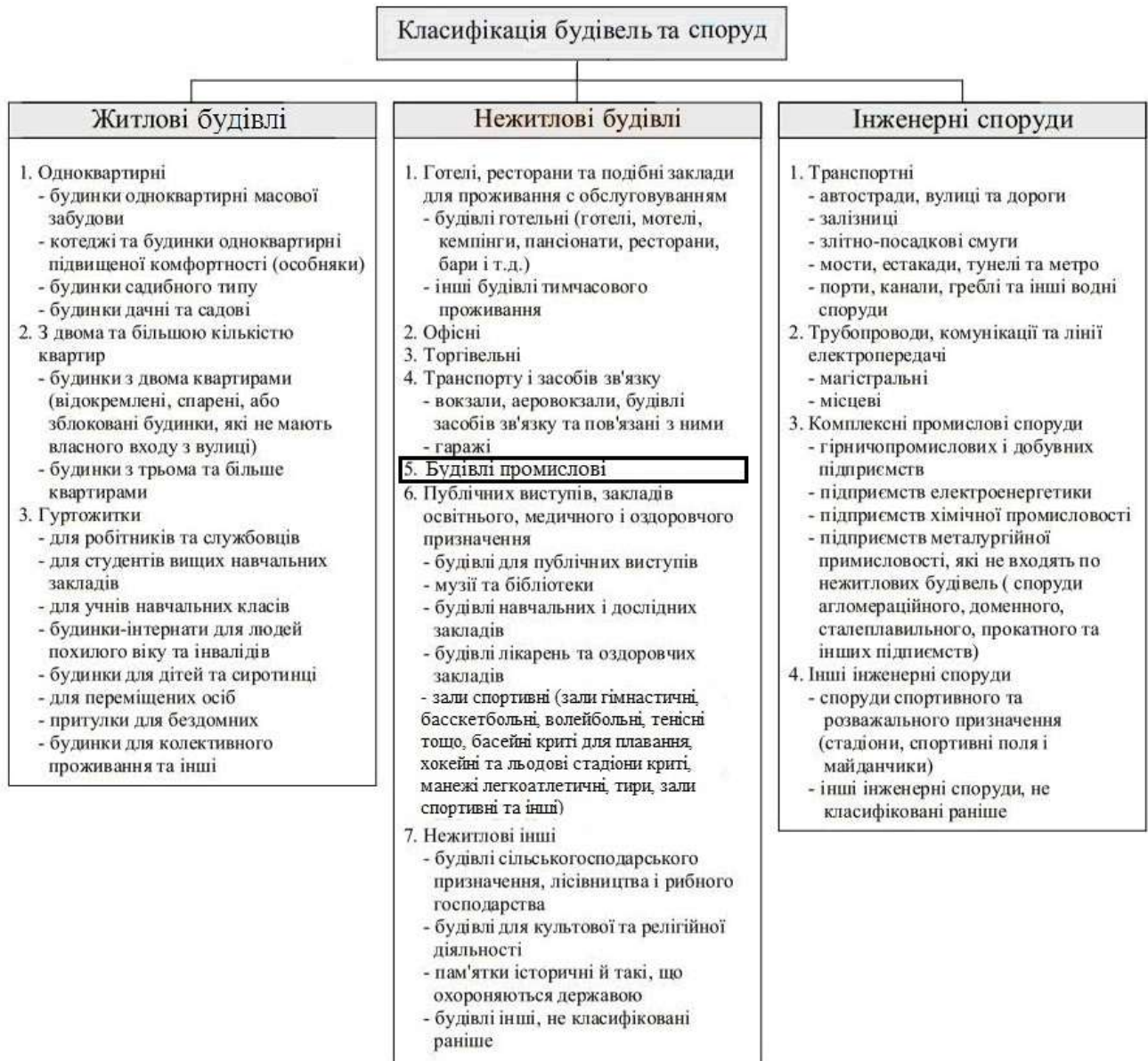


Рисунок 1 – Загальна класифікація будівель та споруд відповідно до ДК 018-2000

2) за класами промислові будівлі поділяють на чотири класи, причому до I класу відносять ті, до яких ставляться підвищені вимоги, а до IV класу – будівлі з мінімальними вимогами. Для кожного класу визначено свої експлуатаційні властивості, а також довговічність і вогнестійкість основних конструкцій будівель.

3) за ступенем довговічності промислові будівлі бувають трьох ступенів: I ступінь – не менше 100 років; II – не менше 50 років і III – не менше 20 років.

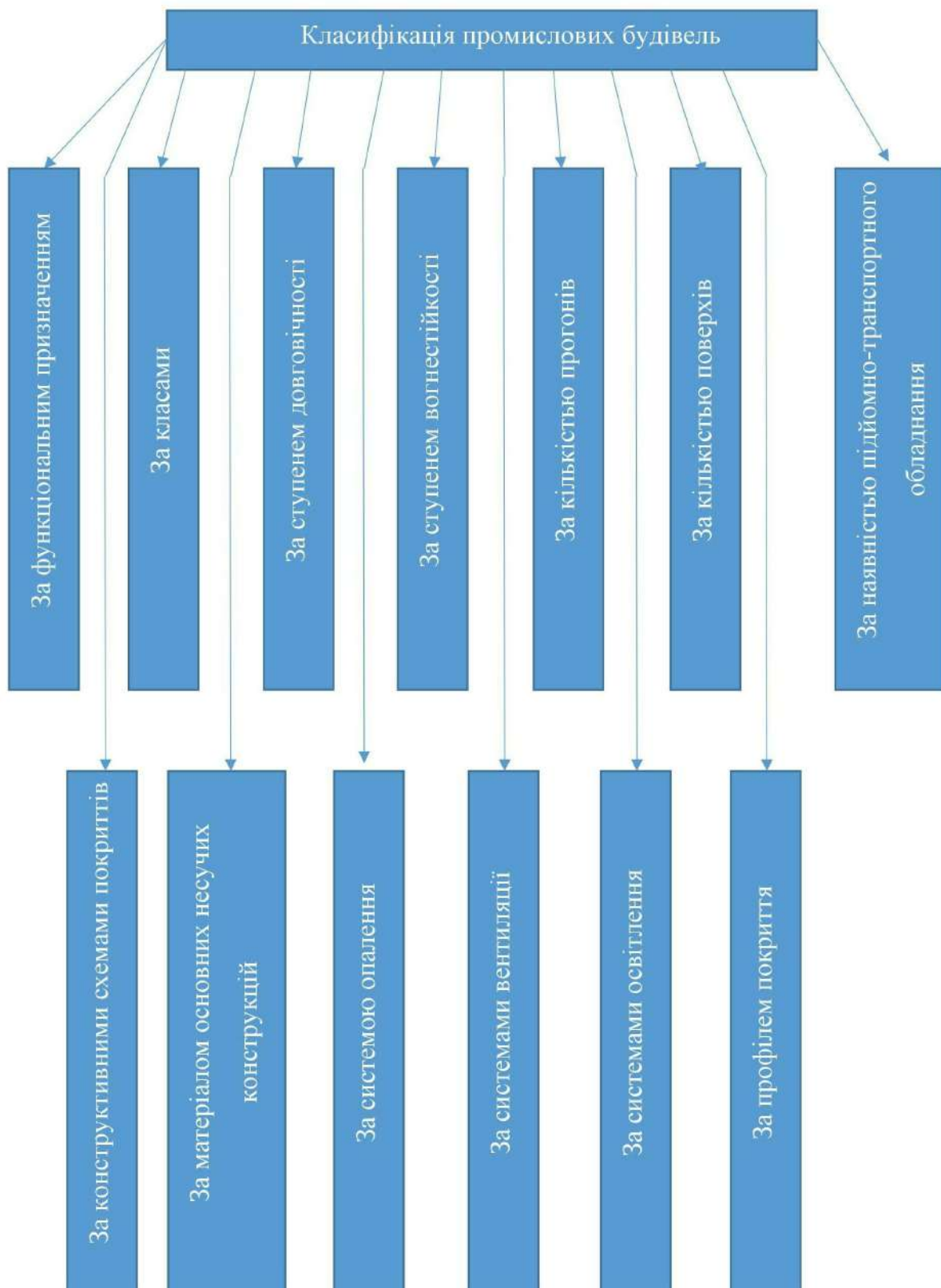


Рисунок 2 – Запропонована вдосконалена класифікація промислових будівель

4) за ступенем вогнестійкості промислові будівлі поділяють на п'ять ступенів. Ступінь вогнестійкості, що характеризується групою загоряння і границею вогнестійкості основних будівельних конструкцій, установлюють: для будівель I класу – не нижче II ступеня, для будівель II класу – не нижче III ступеня. Для будівель III і IV класів ступінь вогнестійкості не нормується.

Зазначимо, що наступні позиції 5-12 є пропозиціями, розробленими фахівцями та наведеними в роботі [6].

5) за кількістю прогонів промислові будівлі розділяють на однопрогонові та багатопрогонові.

Один прогін є доцільним для невеликих виробничих, енергетичних та складських будівель. Однопрогонові будівлі також використовуються для розміщення виробництв, що потребують значної величини прогонів (від 36 та більше метрів – великопрогонові будівлі) та значної висоти (більше 18 м). Однопрогонові будівлі характерні й для виробництв із розташуванням технологічного обладнання на спеціальних конструкціях – «етажерках», які не пов'язані з несучими конструкціями самої будівлі.

Багатопрогонові будівлі є найбільш поширеним типом одноповерхових промислових будівель, який широко використовується в різних галузях промисловості. Багатопрогонові будівлі з однаковими або близькими параметрами прогонів (шириною та висотою) без внутрішніх відкритих дворів називаються будівлями суцільної забудови й можуть досягати в плані значних розмірів (кілька сотень метрів по ширині та довжині).

6) за кількістю поверхів розрізняють одноповерхові та багатоповерхові будівлі. В сучасному будівництві переважають одноповерхові будівлі, через те, що вони мають певні переваги. В таких будівлях кращі умови для розміщення обладнання, організації виробничих потоків, використання різних транспортних та вантажопідйомних пристроїв. Багатоповерхові промислові будівлі проектують при обмежених розмірах території та у випадках, коли технологічний процес організовують по вертикальній схемі.

7) за наявністю підйомно-транспортного обладнання промислові будівлі розділяють на безкранові та кранові (з мостовими кранами та підвісним транспортом).

8) за конструктивними схемами покриттів розрізняють промислові будівлі: каркасні площинні (з покриттями по балкам, фермам, рамам, аркам), каркасні просторові (з покриттями – оболонками одинарної та двоякої кривини, складками, куполами, склепінням), з висячими покриттями різних типів (перехресні, пневматичні - повітряноопорні та повітрянонесучі).

9) за матеріалом основних несучих конструкцій розрізняють промислові будівлі з залізобетонним каркасом (збірним, монолітним, збірно-монолітним), сталевим каркасом, цегляними несучими стінами та покриттям по залізобетонним балкам, металевим та дерев'яним конструкціям.

10) за системою опалення промислові будівлі розділяють на опалювальні та неопалювальні. До неопалювальних відносять будівлі, в яких виробництво супроводжується надмірними тепловиділеннями (так звані гарячі цехи: ливарні, прокатні та інші), а також будівлі, що не потребують опалення (холодні цехи: склади, сховища та т.п.). До опалювальних будівель відносять всі інші промислові будівлі, в яких за санітарно-гігієнічними або технологічними умовами необхідно підтримувати позитивну температуру повітря в холодний період року.

11) за системами вентиляції розрізняють промислові будівлі з природною вентиляцією або аерацією через спеціальні прорізи в огорожувальних конструкціях; зі штучною припливно-витяжною вентиляцією за допомогою вентиляторів та системи повітроводів; з кондиціонуванням повітря (штучна вентиляція, що створює постійні параметри повітряного середовища – температури, вологості, ступеня чистоти повітря).

12) за системами освітлення розрізняють будівлі з природним, штучним або суміщеним (інтегральним) освітленням. Природне освітлення здійснюють через світлопрорізи отвори в стінах (вікна) та в покритті (ліхтарі). Штучне освітлення є основним в будівлях без

природного освітлення або в будівлях без ліхтарів. У таких будівлях застосовують електричні лампи, що дають спектр, близький до природного.

13) за профілем покриття промислові будівлі бувають з ліхтарними надбудовами або без них. Будівлі з ліхтарними надбудовами влаштовують з метою аерації та (або) для природного освітлення. Ліхтарні надбудови ускладнюють конструктивне рішення будівель та їх експлуатацію через накопичення снігу на даху в міжліхтарних просторах.

Незважаючи на подібну різнобарвність різновидів промислових будівель, всі вони будуються за приблизно однаковою конструктивною схемою. Так в останні десятиріччя доволі багато уваги приділяється проєктуванню та створенню будівель, в тому числі й промислових з легких тонкостінних сталевих профілів (ЛСТК) – рис. 3. Проте, як показує досвід їх використання, якщо на початку XXI сторіччя такі конструкції були доволі економічно ефективні, то останнім часом все більше проявляються їх конструктивні та експлуатаційні недоліки [7-9]. Серед них варто відзначити як складнощі із монтажем, так і невисоку довговічність будівельних конструкцій з таких профілів, завдяки можливості легкого ушкодження їх під час експлуатації. До того ж несуча здатність таких профілів теж бажає залишатися кращою, особливо в складних умовах виробництва. Слід зазначити також, що останнім часом й ціна на подібні профілі в Україні стрімко підвищилась, що призвело до різкого зниження їх конкурентоспроможності порівняно із класичними гарячекатаними [10] або холодногнутими профілями [11]. Тому все більше проектних організацій та підприємств надають перевагу застосуванню саме таких профілів. В результаті будівля проєктується за класичною архітектурно-конструктивною схемою – рис. 4.

Така схема передбачає нескладну прямокутну форму будівлі в плані, що забезпечує більш просте планувальне та конструктивне рішення. Відповідно до представленої класифікації в практиці переважають промислові будівлі виробничого типу, II класу, I

ступеня довговічності, не нижче III ступеня вогнестійкості, одноповерхові, з мостовими кранами, з каркасною конструктивною схемою, виконані зі сталевих профілів, неопалювальні, із суміщеним освітленням, безліхтарні.



Рисунок 3 – Конструкція промислової будівлі
з легких тонкостінних сталевих профілів



Рисунок 4 – Конструкція промислової будівлі
з класичних гарячекатаних профілів

Саме такі будівлі й розглядаються далі як об'єкт досліджень та аналізу. Оскільки в останні роки перевага в будівництві надається створенню промислових будівель з невеликими прогонами, то акцент в ході досліджень робився саме на них. При цьому увага приділялась двом основним параметрам – статичним та динамічним. Якщо перші доволі детально розглядаються в значній кількості досліджень, то другим приділяється дуже незначна увага, хоча за даними, наприклад, нових чинних стандартів України [12] бальність сейсмічних впливів збільшено та й навантаження від мостових кранів теж підвищені [13]. Як раз саме ці два види навантажень й створюють найбільш вагомий динамічний ефекти в промислових будівлях, як різновиді будівельних конструкцій. З цим пов'язана актуальність проведених досліджень та отриманих при цьому результатів для забезпечення потрібної надійності та довговічності [14].

II. МЕТОД АНАЛІЗУ РОБОТИ ПРОМИСЛОВОЇ БУДІВЛІ

Аналіз роботи будь-якої будівельної конструкції взагалі та конструкції промислової будівлі зокрема спрямовується на визначення її напружено-деформованого стану. Це дозволяє надалі підібрати необхідні поперечні перерізи елементів конструкції, таким чином, щоб виконувались потрібні відповідно до норм умови. Для сталевих конструкцій на тепер чинними в Україні є норми [15], які регламентують весь спектр подібних умов та критеріїв. Ці норми зорієнтовані, переважно, на використання традиційних методів будівельної механіки, які серед фахівців нерідко називають «ручними», оскільки вони передбачають визначення напружено-деформованого стану на основі аналітичних методів.

Наприкінці ХХ ст. у зв'язку із широким розповсюдженням комп'ютерної техніки значної популярності серед фахівців почали набувати різноманітні чисельні методи будівельної механіки, які доволі легко піддаються програмуванню. На їх основі розпочали створювати відповідні програмні продукти, що дозволяли аналізувати набагато більш складні види будівельних конструкцій, ніж традиційні аналітичні методи.

До таких чисельних методів відносять:

- варіаційно-різницевий метод. Оснований на заміні варіаційної задачі скінченно-різницеvim аналогом із застосуванням деякого функціоналу. Проте хоча й з'являється можливість спростити порядок похідних функціоналу, але виникають певні труднощі при їх програмуванні;

- метод скінчених різниць. Має іншу назву – метод сіток – та за своїм змістом є наближеним методом. Крім цього потребує вирішення алгебраїчних рівнянь високих порядків і створює певні складнощі при сполученні елементів конструкцій різної розмірності або з різними граничними умовами.

- метод скінчених елементів. Напружено-деформований стан визначається в межах скінченого елемента, на які поділяють розглядувану область конструкції. При цьому вдається доволі точно визначити необхідні силові або деформаційні фактори в залежності від того, в якій формі записуються рівняння розв'язку – методу сил або методу переміщень, відповідно. Метод був запропонований в середині минулого сторіччя [16, 17] і виявився доволі вдалим з точки зору можливості його застосування для різноманітних видів будівельних конструкцій і різних видів задач [18-20]. В теперішній час метод продовжує вдосконалюватись [21-24], при цьому його форма у вигляді методу переміщень виявилась доволі зручною для програмування. Тому на його основі була створена доволі значна кількість програмних продуктів як закордонної, так і вітчизняної розробки. Серед них варто відзначити найбільш потужні та поширені – ANSYS Workbench [25], SolidWorks [26], COSMOSWorks [27], Nastran [28], SCAD [29], Lira [30]. Проте закордонні продукти мають більш специфічну машинобудівну орієнтацію, а вітчизняні більше пристосовані для вирішення задач в будівельній галузі. До того ж й фінансове питання набагато переважає в бік вітчизняних розробок. У зв'язку з цим для проведення досліджень роботи промислових будівель були обрані два останні вітчизняні пакети прикладних програм – SCAD та Lira.

III. СТАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОМИСЛОВОЇ БУДІВЛІ

Як свідчить накопичений серед фахівців досвід по відношенню до промислових будівель (як наприклад, [31]) найбільш пошкоджуваною їх частиною при дії статичних навантажень є несучі конструкції покрівель. Ці конструкції проєктують або у вигляді ферм, або у вигляді балок. Однак в обох випадках наявні специфічні дефекти, що утруднюють, а в окремих випадках, навіть, унеможливають експлуатацію всієї будівлі. Вони обумовлені наявністю тонкостінних гнучких стрижнів, складною конфігурацією перерізів, підвищеною концентрацією напружень в вузлах, що робить ці конструкції вельми чутливими до загальних і місцевих перевантажень, механічних, температурних і корозійних впливів.

Так, для ферм доволі типовими є втрата стійкості окремими елементами, розцентрування особливо опорних частин, викривлення елементів, зв'язані з надмірною їх гнучкістю – рис. 5.

Найбільш характерним дефектом балок є неякісні зварні шви та корозійні пошкодження, пов'язані з великими площами поверхонь, що з'єднуються – рис. 6.

Оскільки дефекти в обох випадках різні, то в теперішній час постає питання вибору найбільш ефективного типу несучих конструкцій покрівлі, які можуть бути використані, скажімо, при реконструкції або частковій заміні пошкоджених частин. При цьому перевага надається двом основним критеріям – масі конструкції та її вартості.

Зважаючи на вищевикладене в ході чисельних досліджень були розглянуті наступні види несучих сталевих конструкцій покрівлі на прикладі однопрогонової промислової будівлі прогоном 24 м, розташованої в м. Дніпро (рис. 7) [32]:

- варіант 1 – трикутна ферма з гнutoзварного квадратного профілю за ДСТУ [33];
- варіант 2 – трикутна ферма з електрозварної круглої труби за ДСТУ [34];

- варіант 3 – трикутна ферма з гарячекатаної круглої труби за ДСТУ [35];
- варіант 4 – трикутна ферма з прокатних кутиків за ДСТУ [36];
- варіант 5 – балка двотаврова з прокатного двотавру за ДСТУ [37];
- варіант 6 – балка двотаврова зі зварних листів за ДСТУ [38].

Для забезпечення потрібного ухилу покрівлі за ДБН [39] ферми прийнято трикутні, а балки – зі скошеним верхнім поясом.



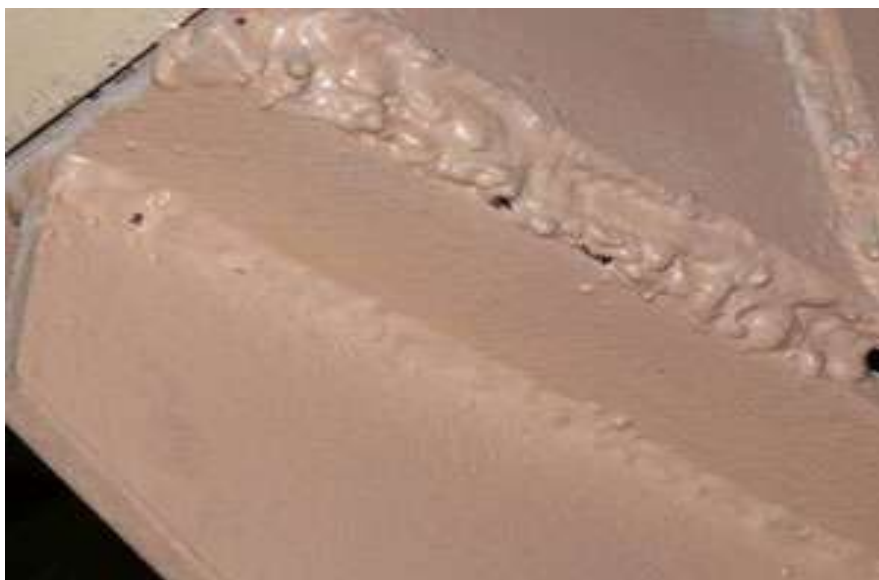
а



б

Рисунок 5 – Типові пошкодження несучих сталевих ферм покриття виробничих будівель:

а – втрата стійкості; б – розцентрування



а



б

Рисунок 6 – Типові пошкодження несучих сталевих балок
покриття виробничих будівель:
а – неякісний зварний шов; б – корозія

Геометричні схеми прийнятих несучих елементів зображено на рис. 8. Відповідно до них були створені скінченно-елементні розрахункові моделі – рис. 9-11. Граничні умови були прийняті у вигляді шарнірного опирання, що відповідає найбільш поширеній схемі з'єднання ригелів із колонами та забезпечує статично визначену їх роботу. В третьому варіанті спеціальним чином добиралось подрібнення на скінчені елементи, відповідно до рекомендацій, викладених в роботах [40, 41]. Навантаження задавались за ДБН [42] як для неопалювальної будівлі.

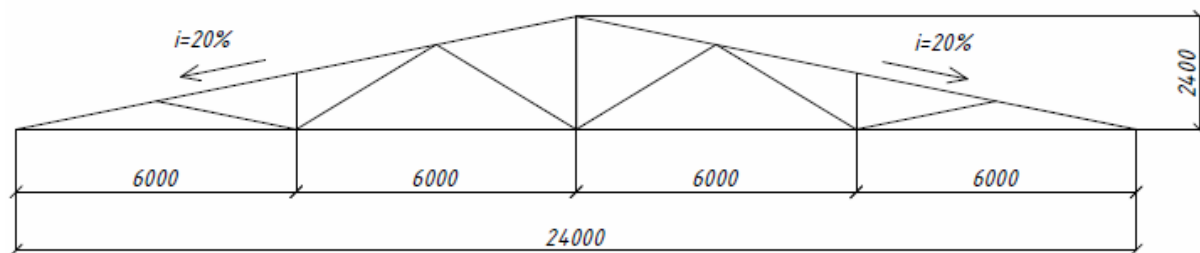


а

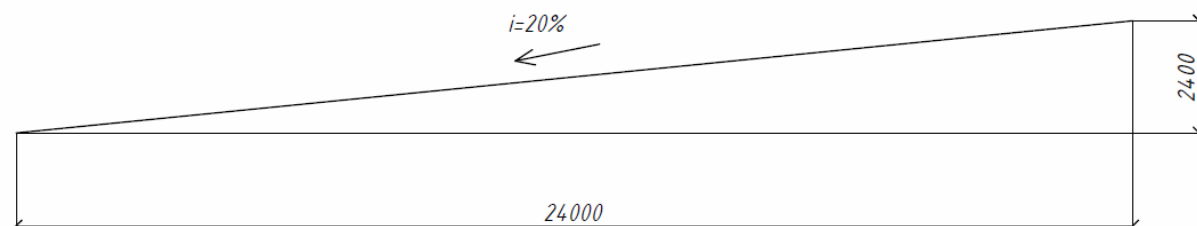


б

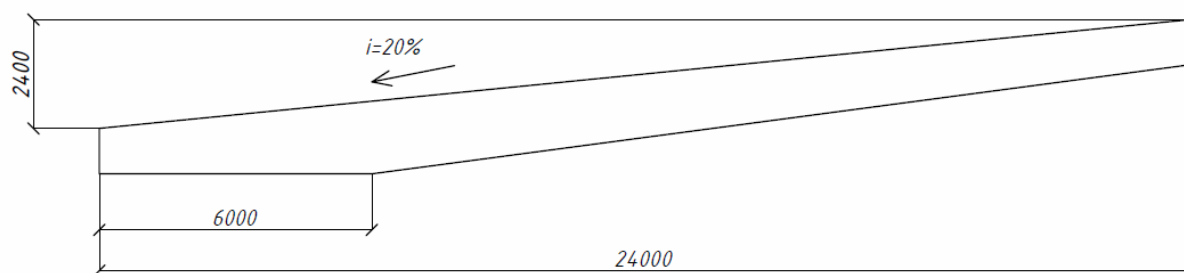
Рисунок 7 – Розглядувана промислова будівля:
а – торцевий вигляд; б – боковий фасад



а



б



в

Рисунок 8 – Геометричні схеми несучих сталевих елементів покриття промислової будівлі:

а – трикутна ферма; б – прокатна балка; в – зварна балка

В результаті розрахунків були автоматично підібрані потрібні перерізи несучих елементів, відповідно до вимог чинних норм ДБН [15] і тільки в останньому варіанті розміри перерізу змінювались вручну доки не досягалась відповідність вимогам чинних норм. Після цього відповідно до існуючих правил технологічності за [2] були уніфіковані перерізи елементів ферм для всіх випадків. Отримані та проміжні значення перерізів наведені в табл. 1 і 2. Підібрані перерізи для балок наведені в табл. 3. В цих таблицях всі розміри подані в мм.

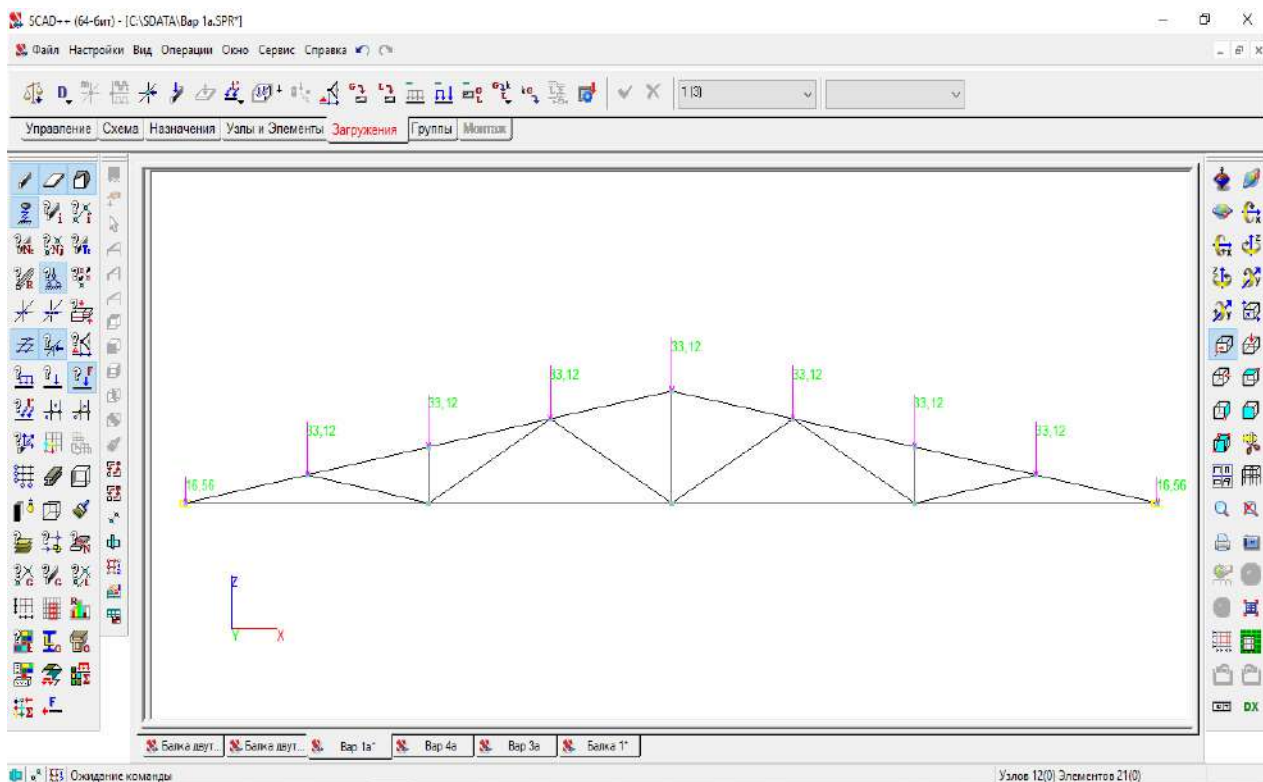


Рисунок 9 – Розрахункова модель сталеві трикутної ферми
покриття промислової будівлі

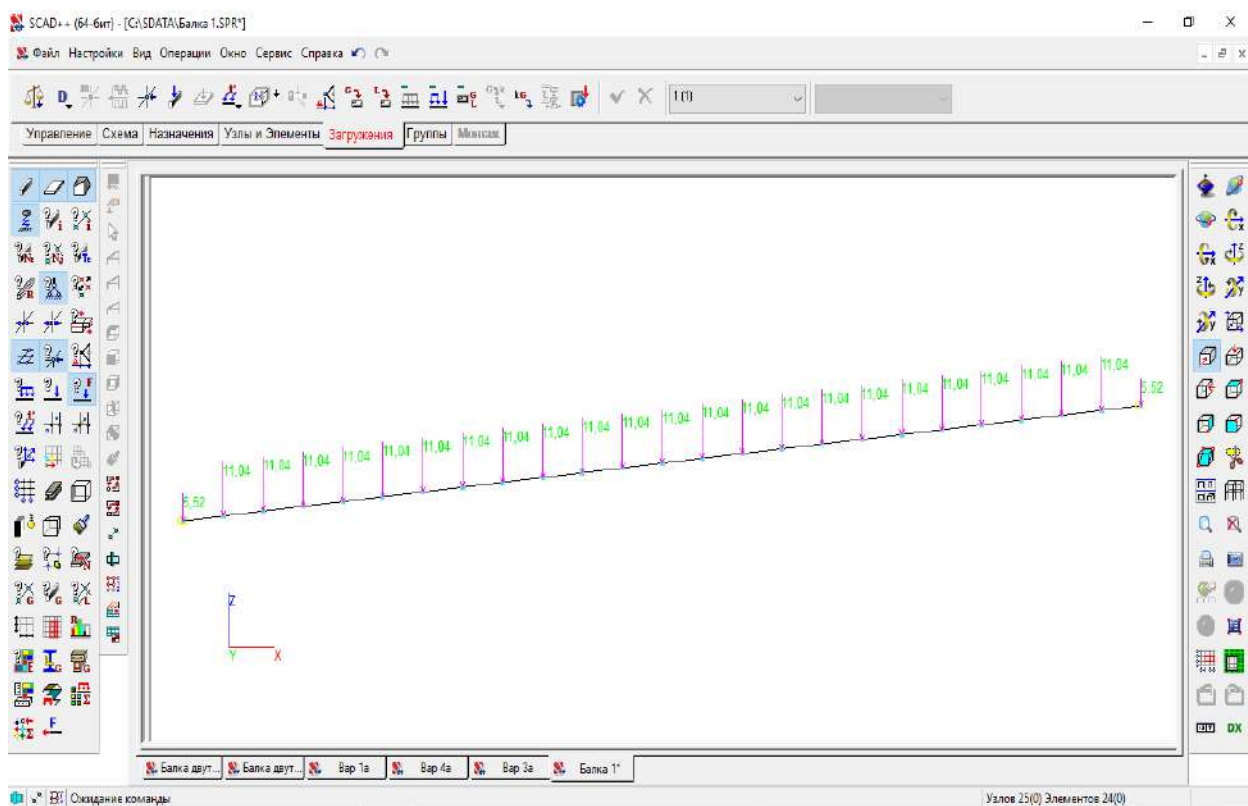
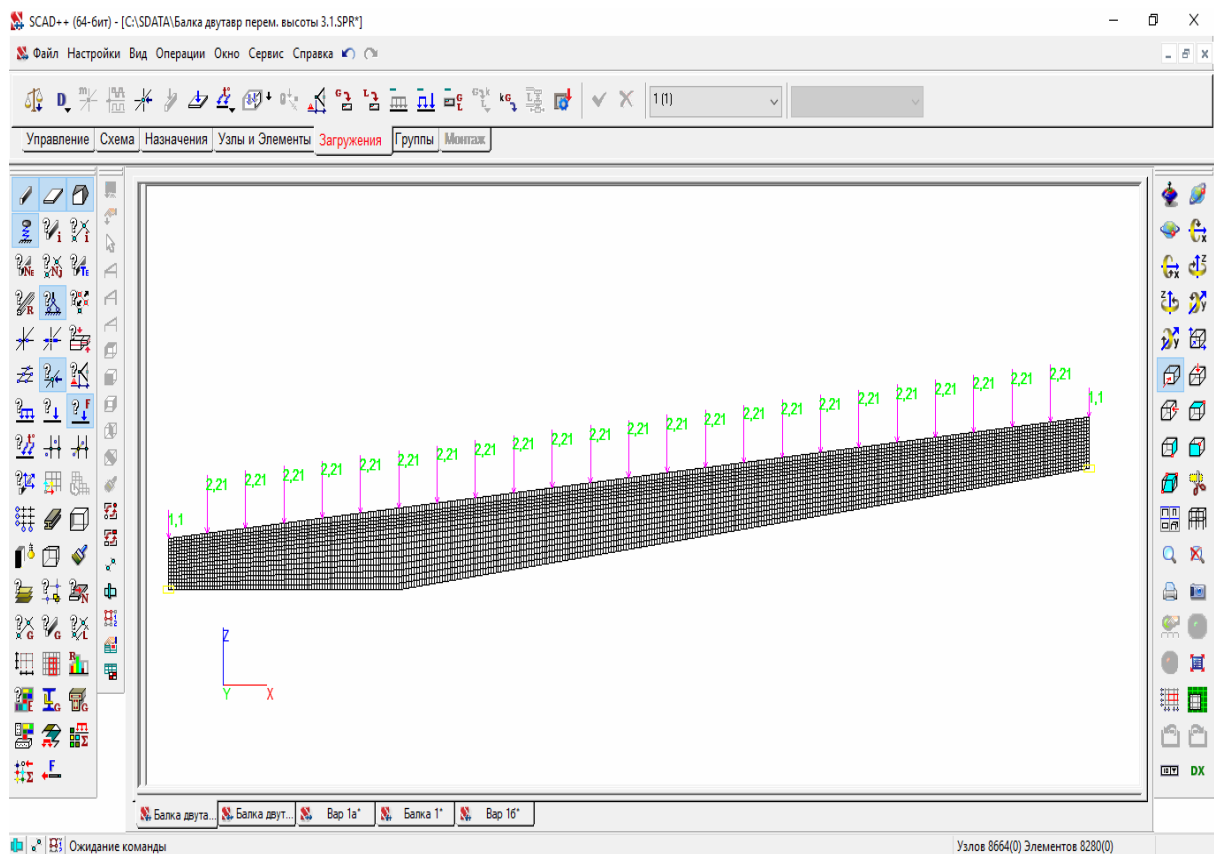
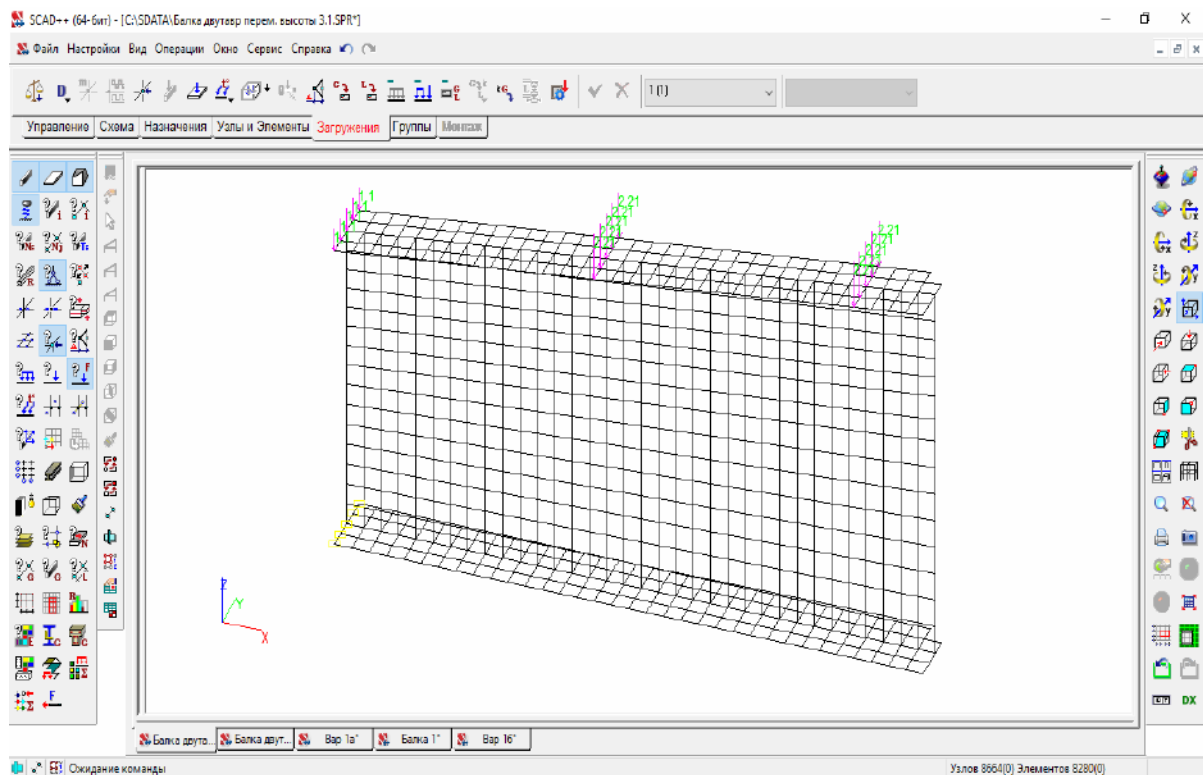


Рисунок 10 – Розрахункова модель сталеві прокатної балки
покриття промислової будівлі



а



б

Рисунок 11 – Розрахункова модель сталевій зварній балки
покриття промислової будівлі:
а – загальний вигляд; б – збільшений фрагмент

Таблиця 1 – Підібрані перерізи для трикутних ферм з холодногнутих зварних профілів

Елемент ферми	Варіант 1		Варіант 2	
	первісний	уніфікований	первісний	уніфікований
Верхній пояс	□120x7	□120x7	○194x5	○194x5
Нижній пояс	□110x6	□110x6	○133x6,5	○133x6,5
Стійки	□42x3	□80x4	○32x5,5	○68x3
Розкоси	□80x4	□80x4	○73x4	○73x4

Таблиця 2 – Підібрані перерізи для трикутних ферм з гарячекатаних прокатних профілів

Елемент ферми	Варіант 3		Варіант 4	
	первісний	уніфікований	первісний	уніфікований
Верхній пояс	○193,7x5,5	○193,7x5,5	└125x8	└125x8
Нижній пояс	○159x5,5	○159x5,5	└90x7	└90x7
Стійки	○70x4	○70x4	└35x4	└50x3
Розкоси	○83x4	○83x4	└80x5	└80x5

Таблиця 3 – Підібрані перерізи для балок

Елемент балки	Варіант 5	Варіант 6-1	Варіант 6-2
Профіль	I70Б1	–	–
Стінка	–	– 1280x4	– 500x4
Полиця	–	– 1015x6	– 420x6

Масові і кошторисні показники (в цінах 2018 р.) по кожному із варіантів наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Критеріальні показники для розглядуваних варіантів

Варіант	Маса, кг	Вартість за 1 т, грн.	Вартість конструкції, грн.
1	1028	22 150	22 770
2	1040	18 975	19 734
3	980	28 250	27 685
4	1266	22 912	29 007
5	3103	19 400	60 198
6-1/6-2	1581/2078	19 670	31 098/40 874

Також доволі цікавим є співставлення отриманих даних стосовно вартості різних варіантів конструкцій за цінами 2022 р. в Україні – табл. 5. Однак слід зауважити, що певний час деякі із зазначених стандартів на сталеві профілі не були чинними, проте оскільки ніякої альтернативи їм не існувало, то багато проектних підприємств пішли доволі цікавим шляхом. Вони використовують спеціальні стандарти, вважаючи їх внутрішніми стандартами підприємств, тобто надаючи їм маркування як технічні умови – ТУ.

Таблиця 5 – Критеріальні показники для розглядуваних варіантів (за цінами 2022 р.)

Варіант	Маса, кг	Вартість за 1 т, грн.	Вартість конструкції, грн.
1	1028	41 300	42 456
2	1040	50 090	52 094
3	980	49 790	48 794
4	1266	38 330	48 488
5	3103	55 500	172 217
6-1/6-2	1581/2078	47 830	75 690/99 391

Загальна динаміка ціноутворення зображена на графіку рис. 12 (варіант 6 являє собою варіант 6-1, а варіант 7 – варіант 6-2).

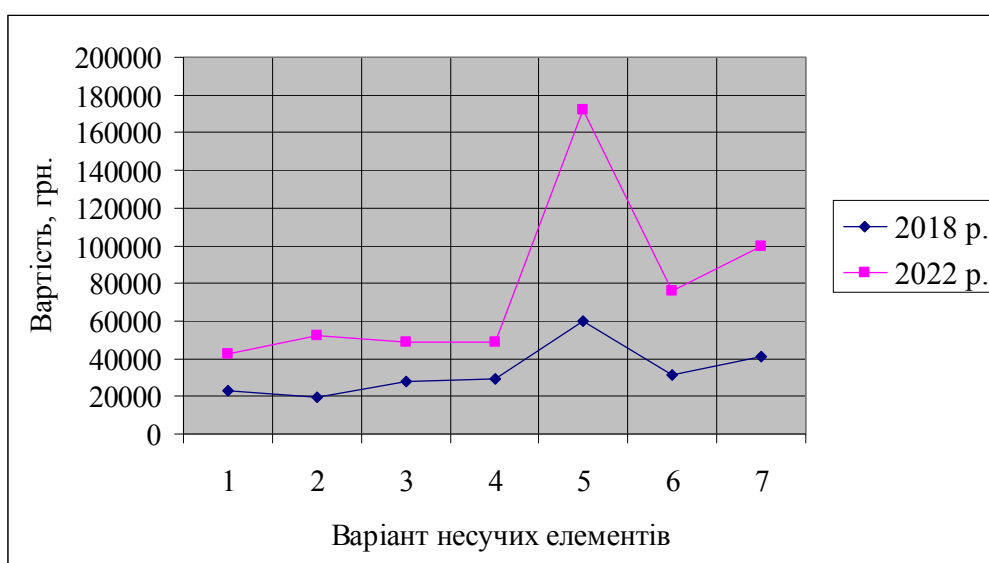


Рисунок 12 – Динаміка зміни вартості досліджуваних елементів

Таким чином, як свідчать отримані дані, представлені в табл. 4 і 5, та узагальнені на графіку рис. 12, з урахуванням вартості 2018 р. найбільш економічно ефективним слід вважати варіант трикутної сталевий ферми з електрозварної круглої труби. В теперішній час (2022 р.) найбільш економічно ефективним виявляється варіант трикутної ферми з гнutoзварного квадратного профілю. За технологічністю виготовлення він переважає попередній варіант.

На другому місці слід відзначити з урахуванням вартості 2018 р. варіант трикутної сталевий ферми з гнutoзварного квадратного профілю, а з урахуванням вартості 2022 р. – варіант трикутної сталевий ферми з гарячекатаної круглої труби або з прокатних кутиків. Їх вартість виявляється вищою на 15 % в кожному випадку при приблизно однакових масових показниках. Зважаючи на низьку технологічність виготовлення та складощі при експлуатації (необхідність приборки пилу, ускладнене покриття антикорозійними сумішами тощо) з цих двох варіантів перевагу слід надати все ж таки першому з гарячекатаної круглої труби.

Найбільш кошторисним (вище на 67 % в цінах 2018 р. та 306 % в цінах 2022 р. порівняно з найбільш ефективним варіантом) та й маючим найбільшу вагу (приблизно в 3 рази порівняно з найбільш ефективним варіантом) виявляється сталевий двотавровий прокатний профіль, особливо в цінах 2022 р., який категорично не рекомендується до застосування в якості несучого елементу сталевий каркасу промислової будівлі розглядуваного типу.

Балковий зварний профіль також на тепер суттєво знизив свою економічну привабливість порівняно з 2018 р., й може бути рекомендований тільки за відсутності технологічних можливостей з виготовлення трикутних ферм. Його масові показники на 54 – 102 % вище, ніж найбільш ефективного варіанту, та за кошторисною вартістю – вище приблизно вдвічі.

Також слід відмітити значний приріст кошторисної вартості металопрокату в 2022 р. порівняно з 2018 р., причому в першу чергу за рахунок прокатних профілів заводського виготовлення.

IV. ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОМИСЛОВОЇ БУДІВЛІ

Якщо статичні розрахунки є доволі розповсюдженими стосовно промислових будівель, то динамічні розрахунки практично не виконуються. У спеціальній фаховій літературі [43] це пояснюється тим, що існуючі динамічні навантаження (наприклад від руху мостових кранів по підкранових балках) не переносяться на несучі елементи каркасу будівлі. Проте останні сучасні дослідження, в тому числі й по іншим типам будівельних конструкцій, свідчать про те, що це невірно [44, 45]. Також в сучасних умовах нерідко компактне обладнання, що прикріплюється до несучого каркасу будівлі, виявляється доволі потужним джерелом динамічних впливів. До того ж робота робітників на подібних підприємствах із наявними динамічними навантаженнями чинить суттєвий вплив на здоров'я персоналу та якість його роботи [46]. Все це спонукає до розгляду такого питання як динамічна робота промислової будівлі.

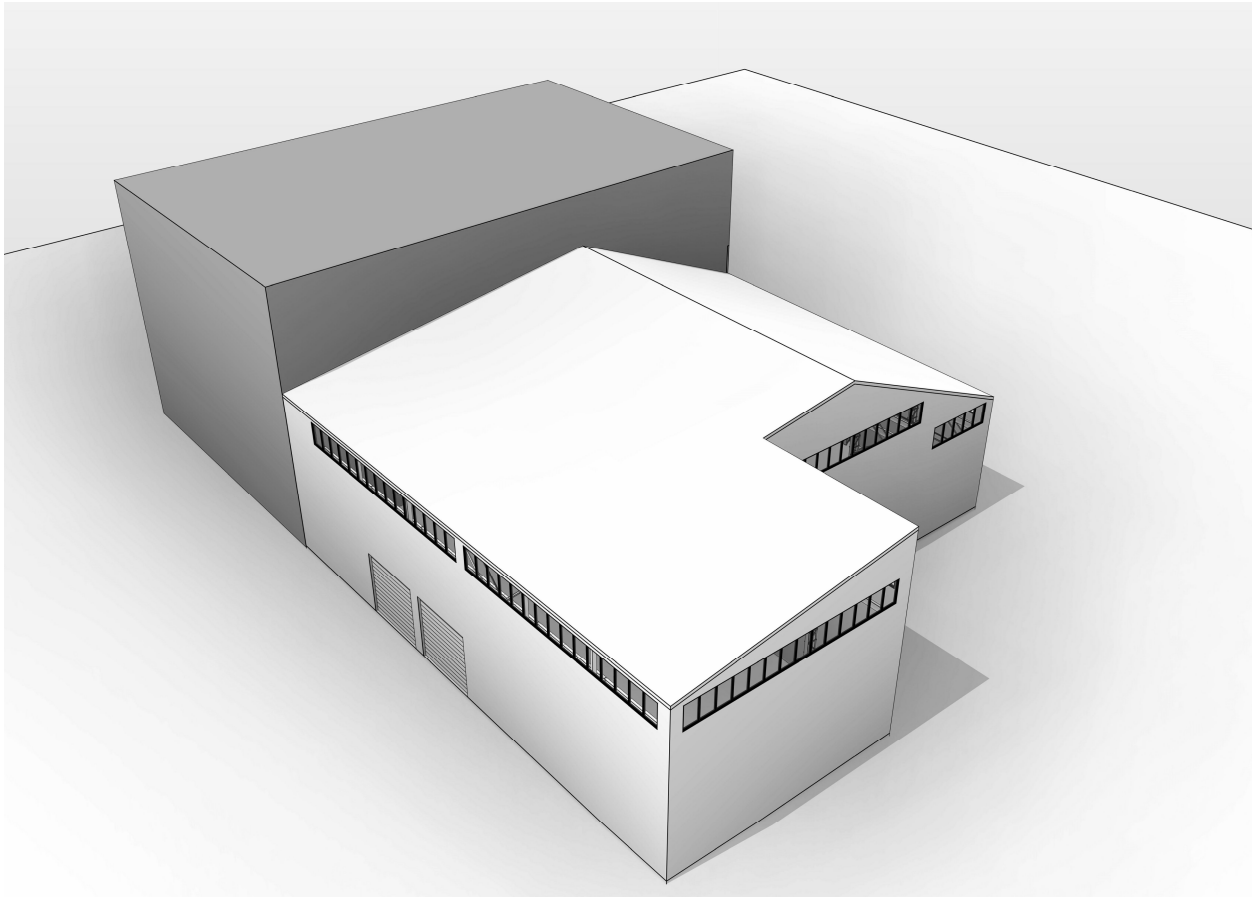
Як і випадку статичного аналізу доволі зручним для аналізу динамічної роботи виявляється метод скінчених елементів. В ході чисельних досліджень розглядалась багатопрогонова будівля з основними прогонами 15 м, розташована в м. Дніпро (рис. 13) [47].

Розроблена скінченно-елементна схема цієї будівлі наведена на рис. 14. При цьому аналізувались наступні варіанти, як найбільш поширені в сучасній проєктній практиці:

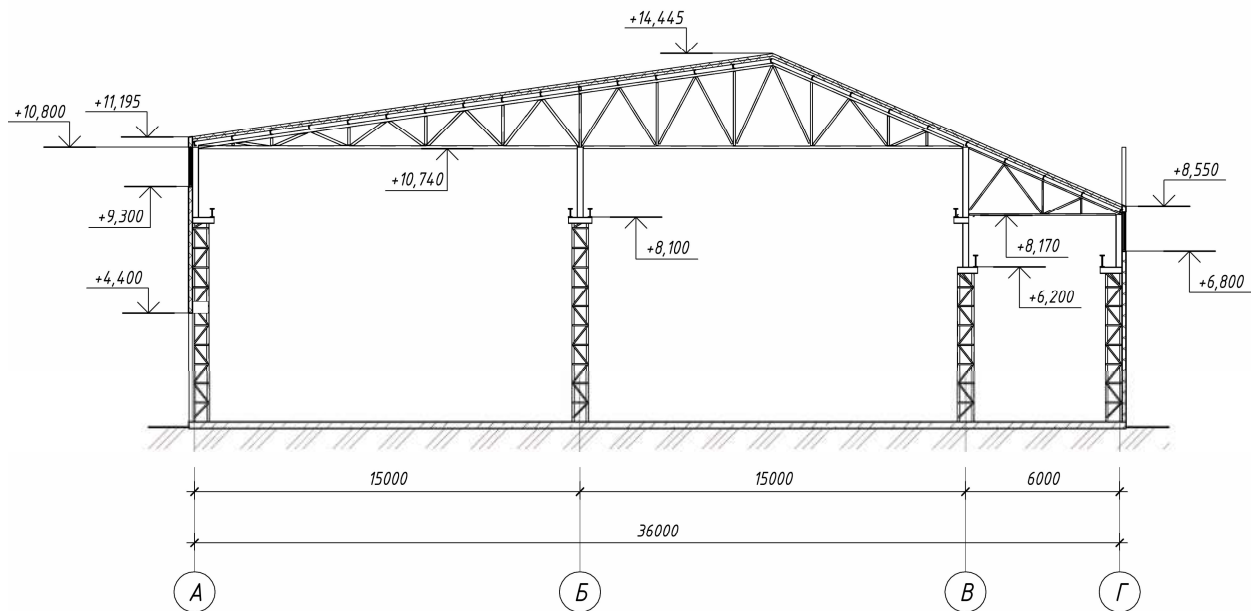
- варіант 1 – будівля довжиною 4 кроки по 6 метрів;
- варіант 2 – будівля довжиною 6 кроків по 6 метрів;
- варіант 3 – будівля довжиною 10 кроків по 6 метрів.

Конструктивно всі ці варіанти були абсолютно ідентичні та виконані за традиційною конструктивною схемою із використанням профілів класичного типу – колони з швелеру 24П за ДСТУ [48] та гарячекатаного двотавру 40 за ДСТУ [37], підкранові балки з гарячекатаного двотавру 40 за ДСТУ [37], ферми з гнutoзварного квадратного профілю за ДСТУ [33] (80x80x4, 100x100x4, 120x120x4), прогони покриття зі швелеру 16П за ДСТУ [48], в'язі з прокатних кутиків 75x75x5 за ДСТУ [36].

Опирання на фундамент прийнято за шарнірною схемою, що забезпечує відповідне розташування анкерних болтів.

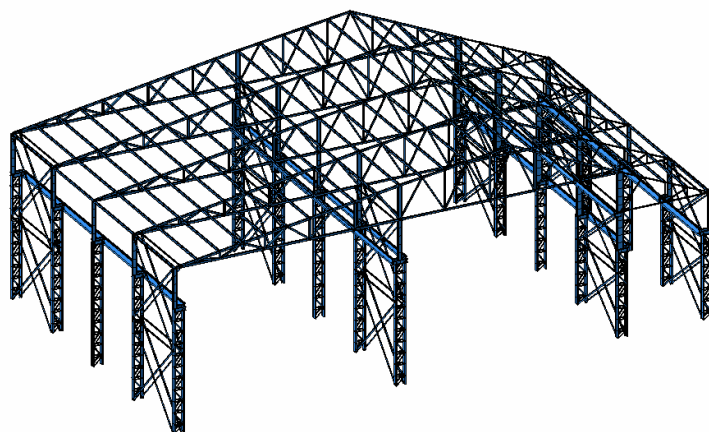


а

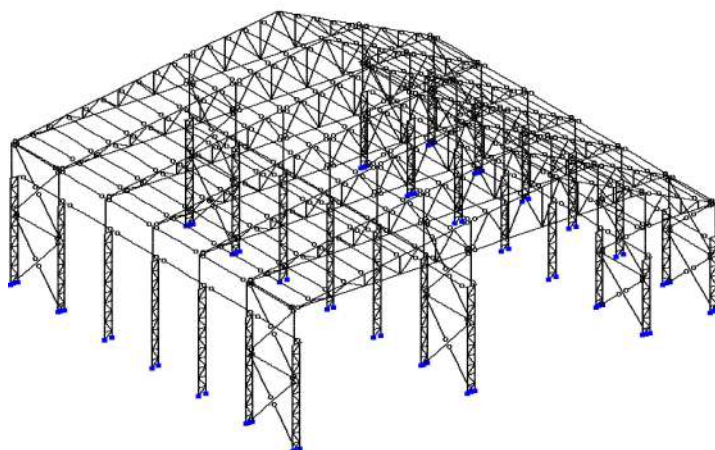


б

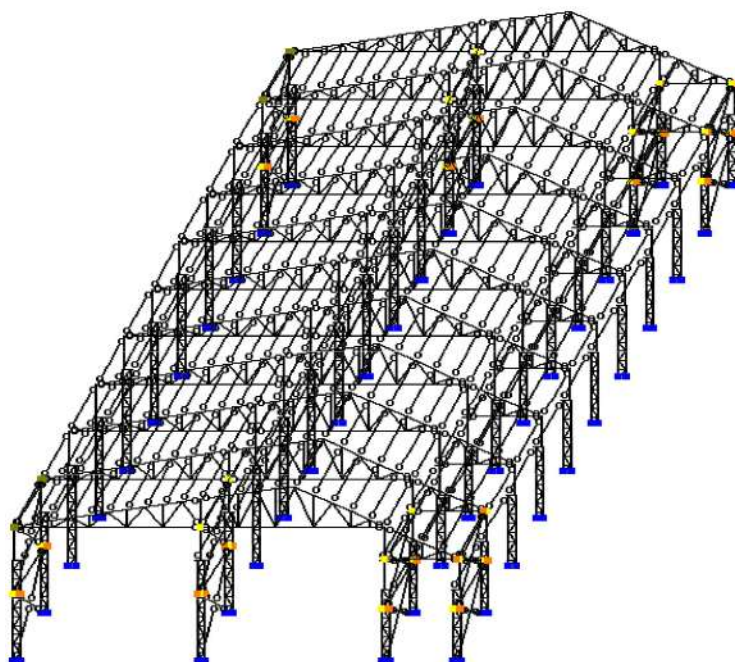
Рисунок 13 – Розглядувана промислова будівля:
а – загальний вигляд; б – поперечний переріз



а



б



в

Рисунок 14 – Розглядувана модель промислової будівлі:
а – варіант 1; б – варіант 2; в – варіант 3

Додатково аналізувались ще 2 варіанти, що відрізнялись прийнятим профілем для елементів сталеві ферми покриття (на основі даних статичних досліджень – див. розділ III):

- варіант 4 – ферма з електрозварної круглої труби за ДСТУ [35];
- варіант 5 – ферма з прокатних кутиків за ДСТУ [36].

Основні отримані результати динамічного аналізу розглядуваної конструкції промислової будівлі наведені в табл. 6-8.

Таблиця 6 – Парціальні частоти для розглядуваних варіантів, Гц

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
Ферма	0,343	0,296	0,307	0,306	0,297
Колони	1,977	1,847	1,961	1,867	1,881
Прогони покриття	4,269	4,288	4,288	4,288	4,288
Підкранова балка	5,692	5,591	5,595	5,599	5,608
В'язі	22,410	22,128	22,465	22,448	22,577

Таблиця 7 – Кругові частоти для розглядуваних варіантів, рад/с

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
Ферма	2,155	1,858	1,928	1,924	1,866
Колони	12,422	11,604	12,322	11,731	11,819
Прогони покриття	26,820	26,944	26,939	26,94	26,943
Підкранова балка	35,763	35,132	35,157	35,178	35,237
В'язі	140,807	139,032	141,153	141,043	141,853

На рис. 15-28 представлені парціальні форми коливань (чорним кольором вказано вихідне положення конструкції, червоним кольором показана форма коливань) для різноманітних конструктивних несучих елементів розглядуваної промислової будівлі.

Таблиця 8 – Періоди для розглядуваних варіантів, с

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
Ферма	2,916	3,382	3,258	3,266	3,367
Колони	0,506	0,541	0,510	0,536	0,532
Прогони покриття	0,234	0,233	0,233	0,233	0,233
Підкранова балка	0,176	0,179	0,179	0,179	0,178
В'язі	0,045	0,045	0,045	0,045	0,044

Зазначимо відразу, що для варіантів 4 і 5 якісно форми коливань залишаються аналогічними до варіантів 1-3, тому вони не наводяться.

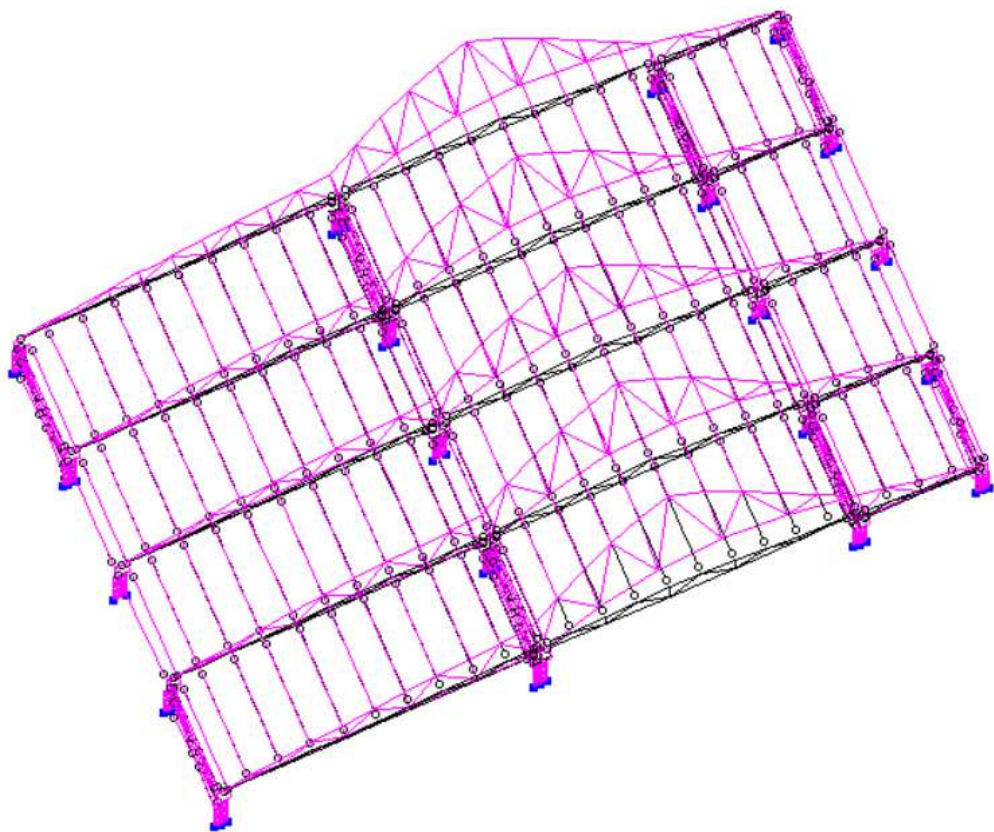


Рисунок 14 – Форма коливань ферми для промислової будівлі (варіант 1)

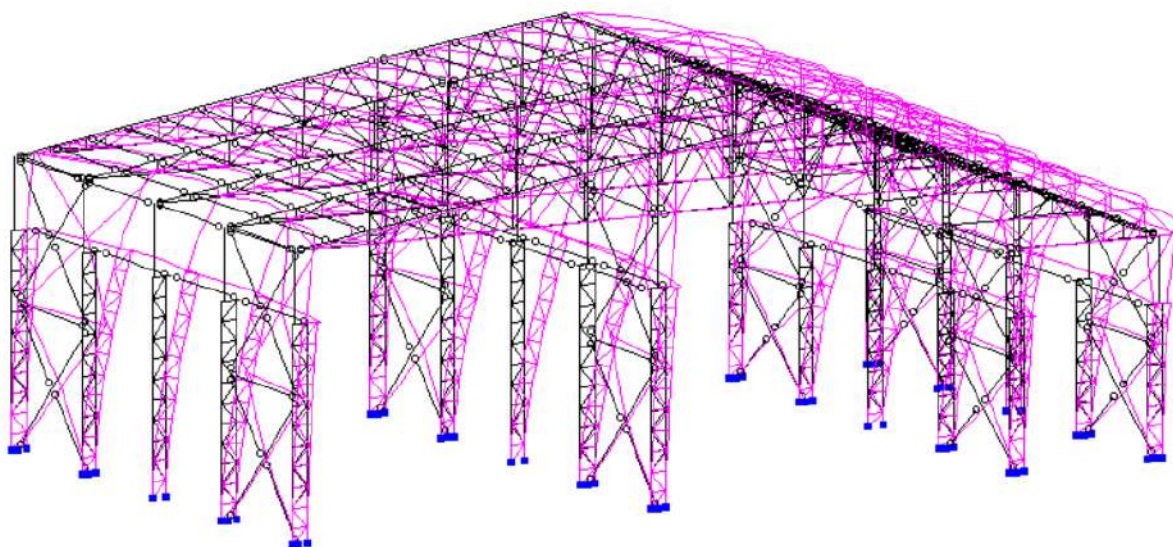


Рисунок 15 – Форма коливань колон
для промислової будівлі (варіант 1)

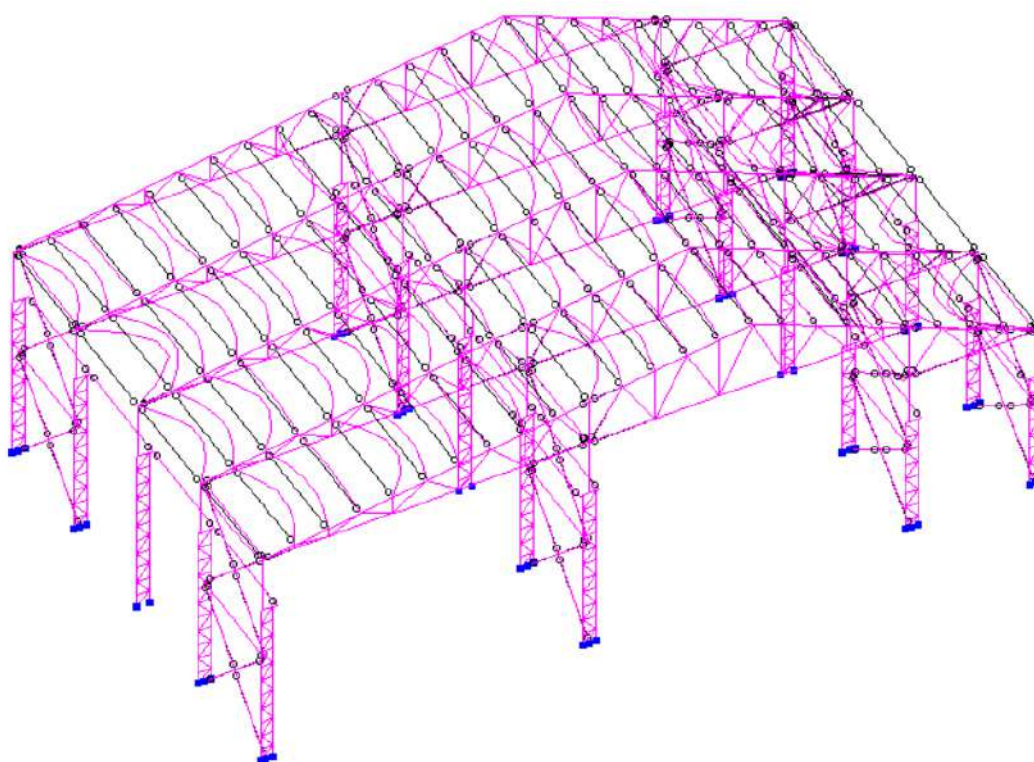


Рисунок 16 – Форма коливань прогонів покриття
для промислової будівлі (варіант 1)

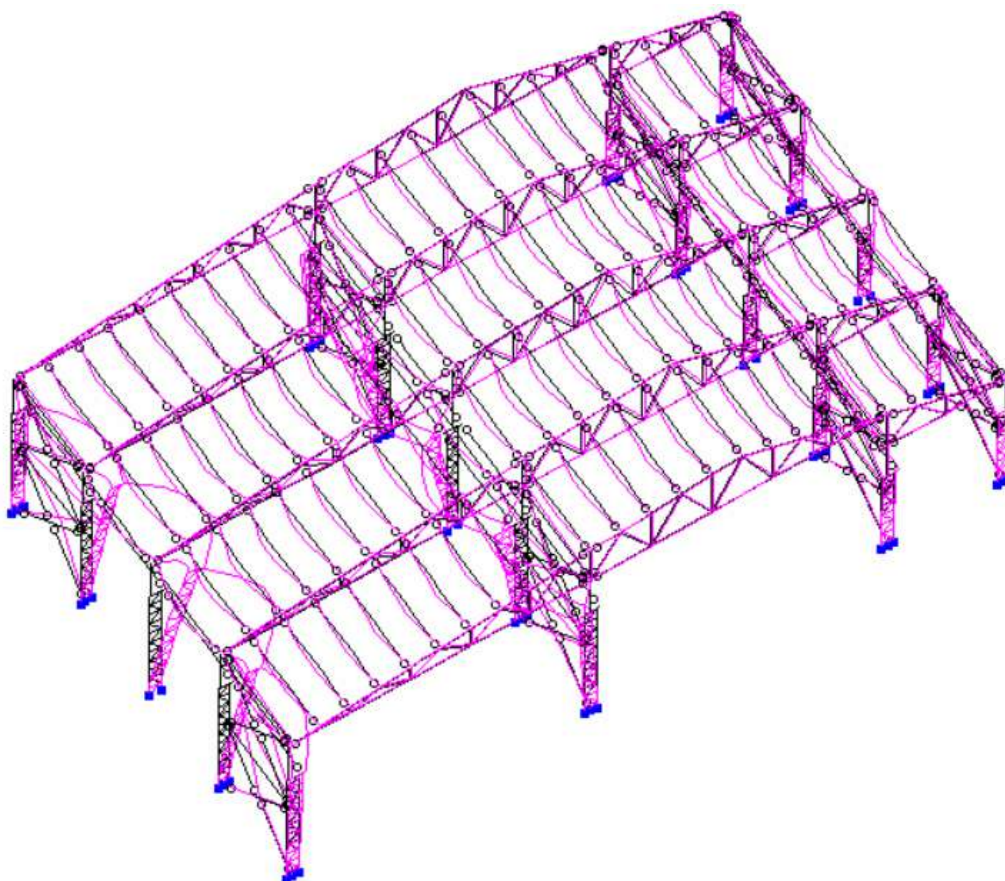


Рисунок 17 – Форма коливань підкранових балок
для промислової будівлі (варіант 1)

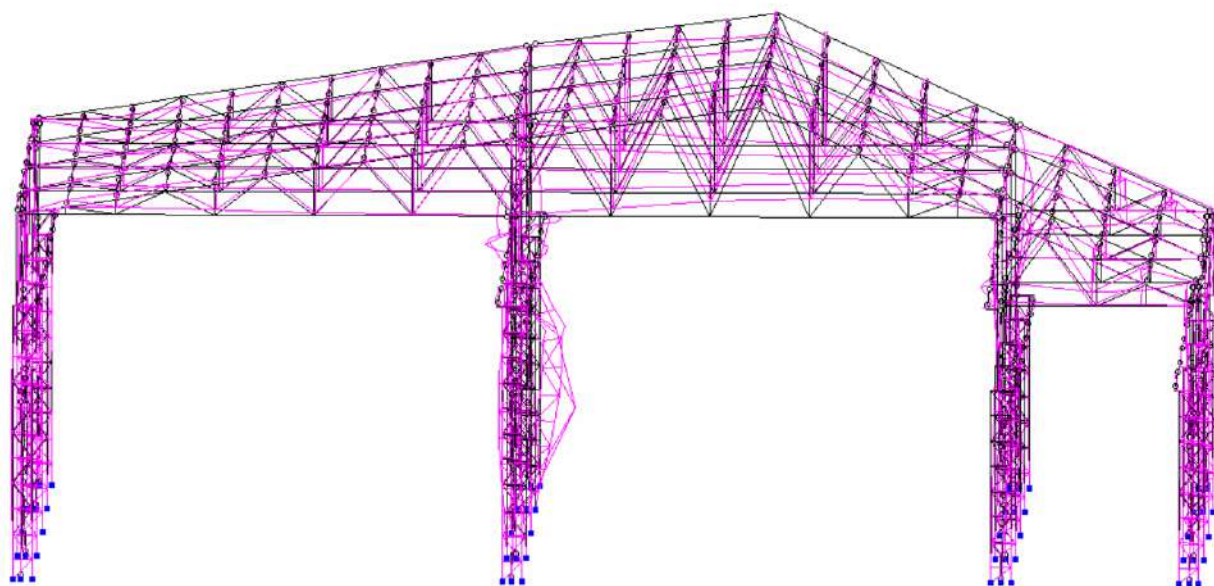


Рисунок 18 – Форма коливань в'язей
для промислової будівлі (варіант 1)

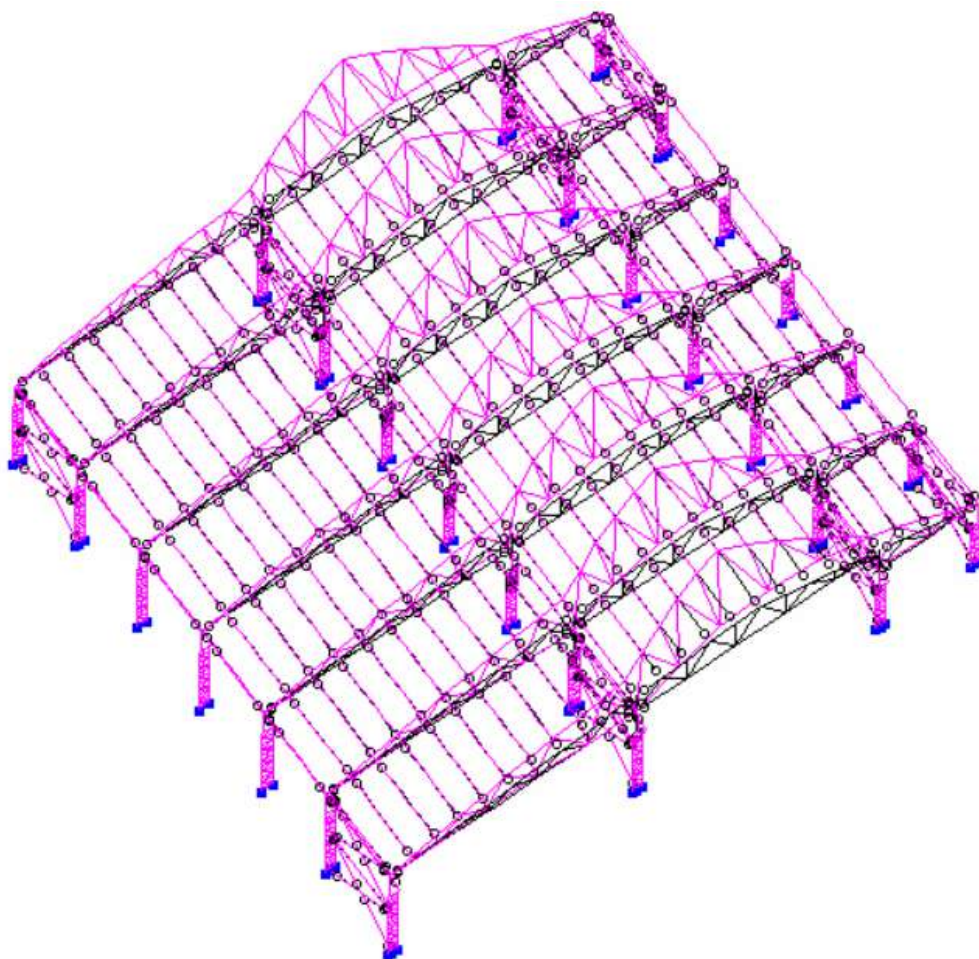


Рисунок 19 – Форма коливань ферми
для промислової будівлі (варіант 2)

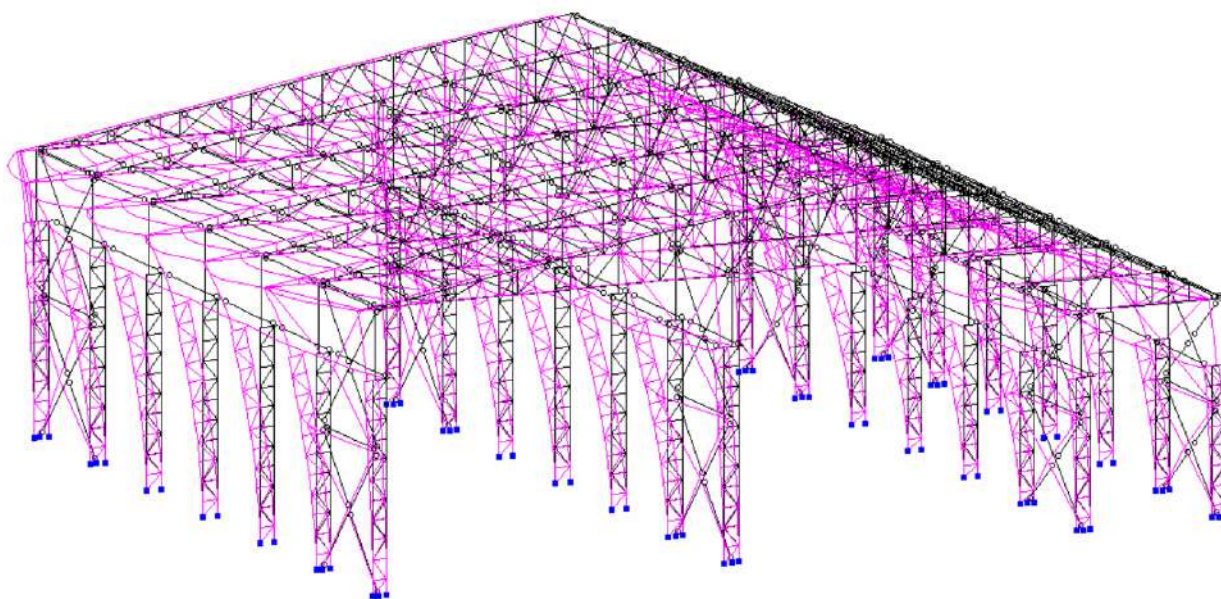


Рисунок 20 – Форма коливань колон
для промислової будівлі (варіант 2)

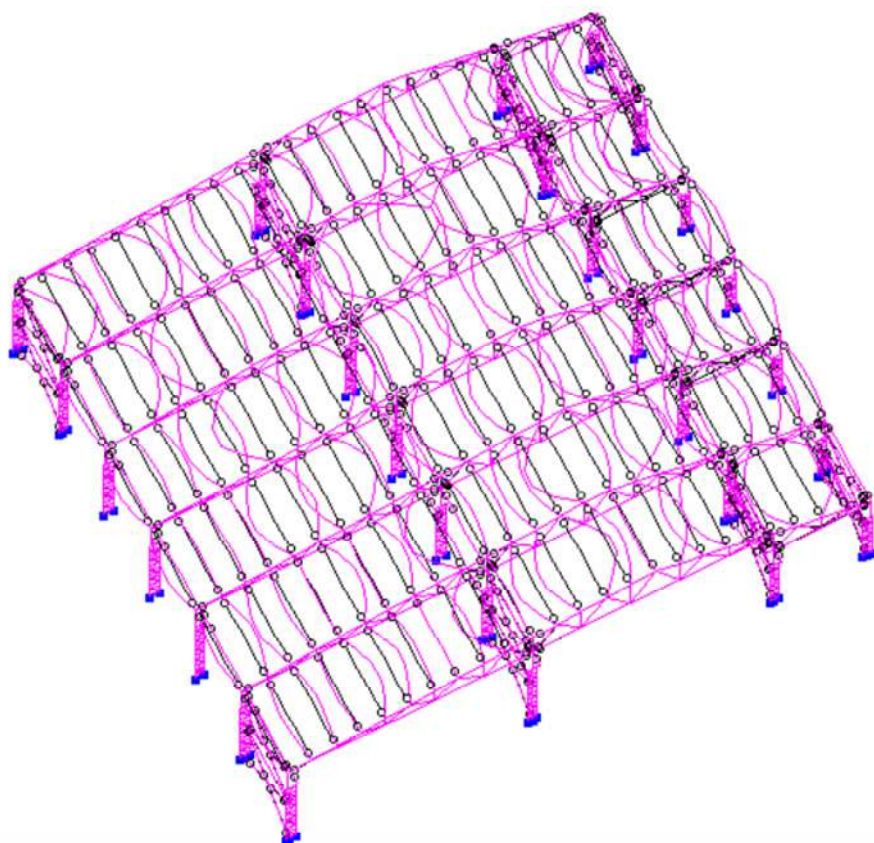


Рисунок 21 – Форма коливань прогонів покриття
для промислової будівлі (варіант 2)

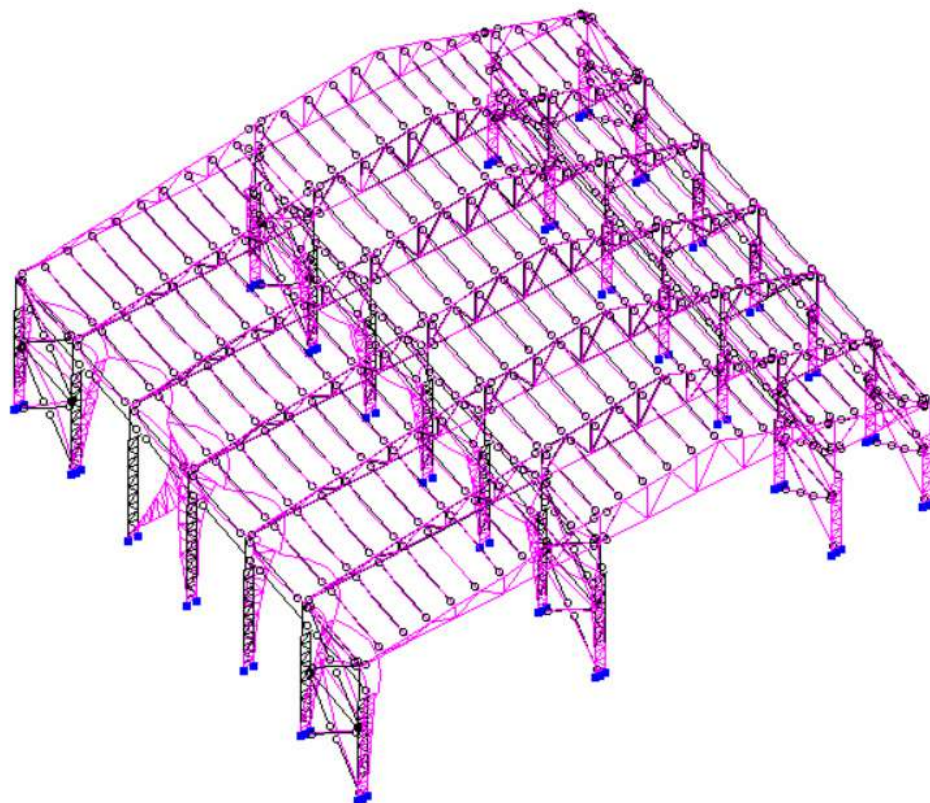


Рисунок 22 – Форма коливань підкранових балок
для промислової будівлі (варіант 2)

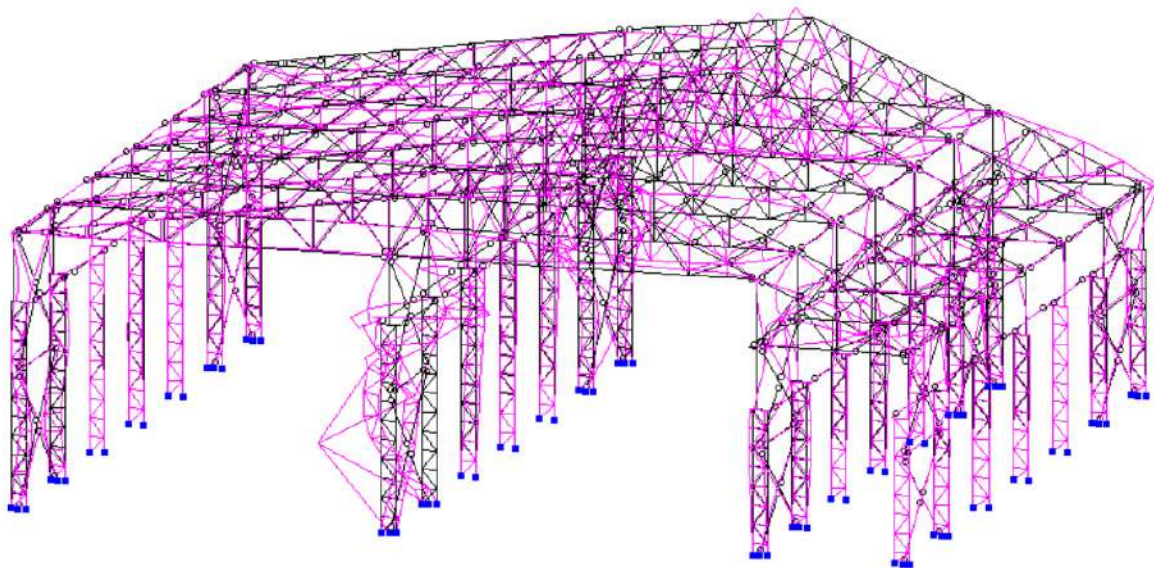


Рисунок 23 – Форма коливань в'язей
для промислової будівлі (варіант 2)

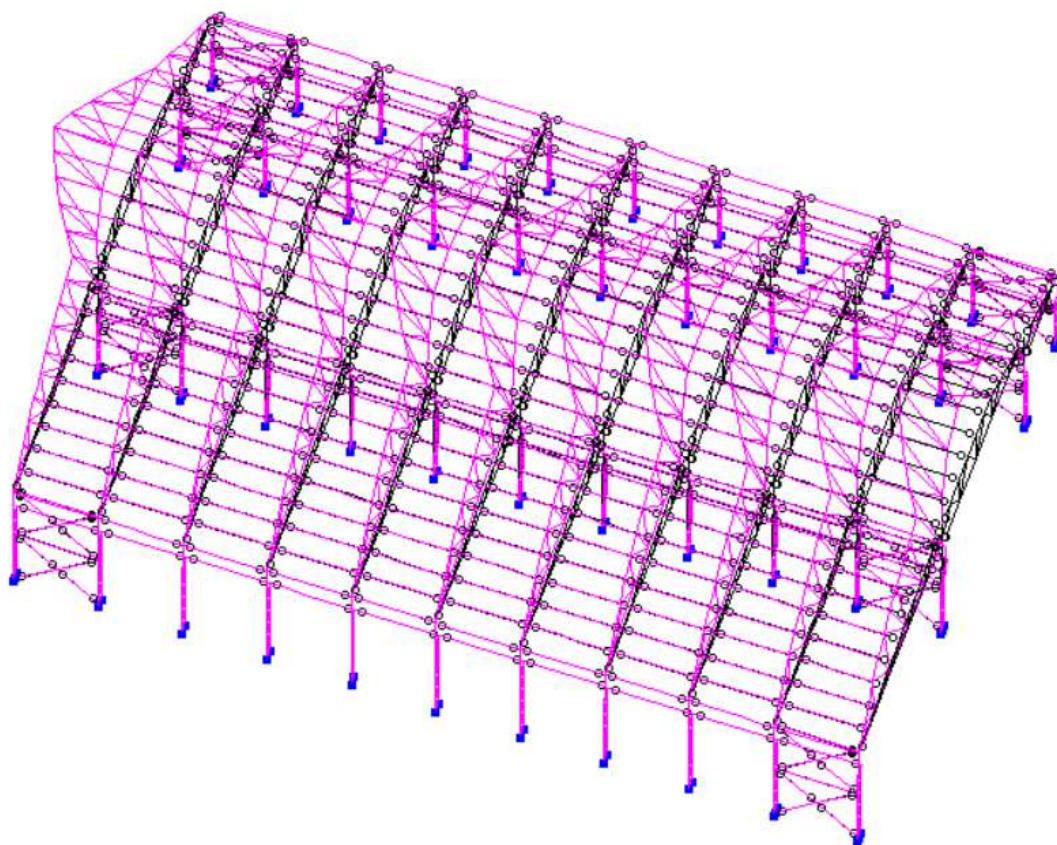


Рисунок 24 – Форма коливань ферми
для промислової будівлі (варіант 3)

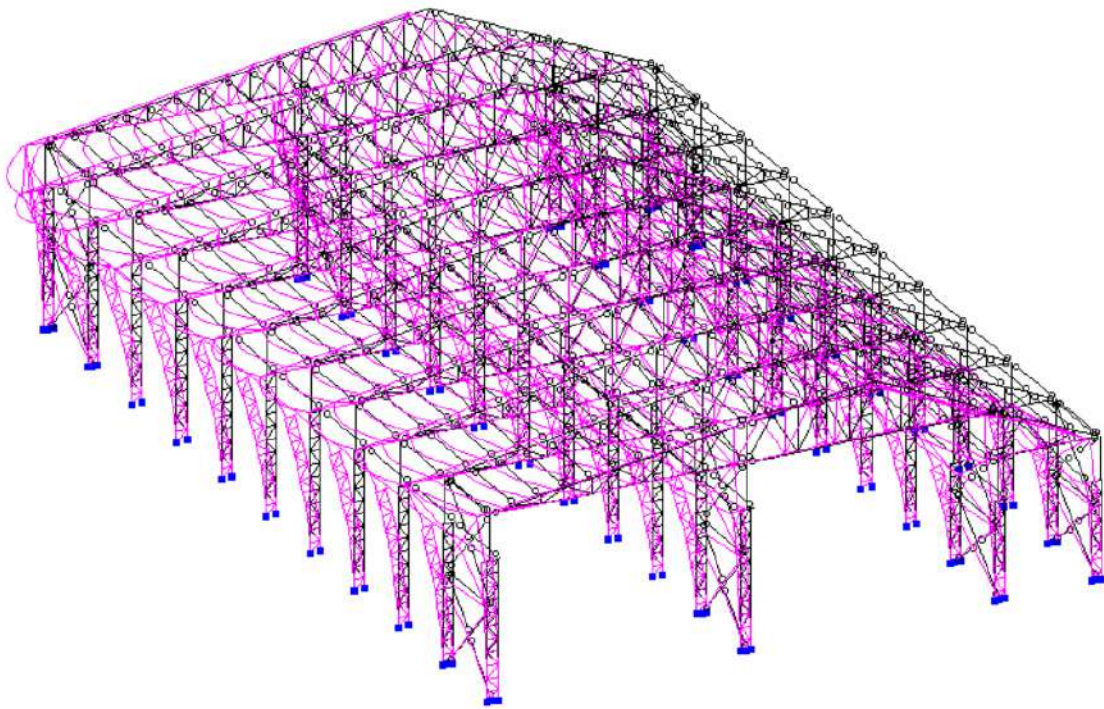


Рисунок 25 – Форма коливань колон
для промислової будівлі (варіант 3)

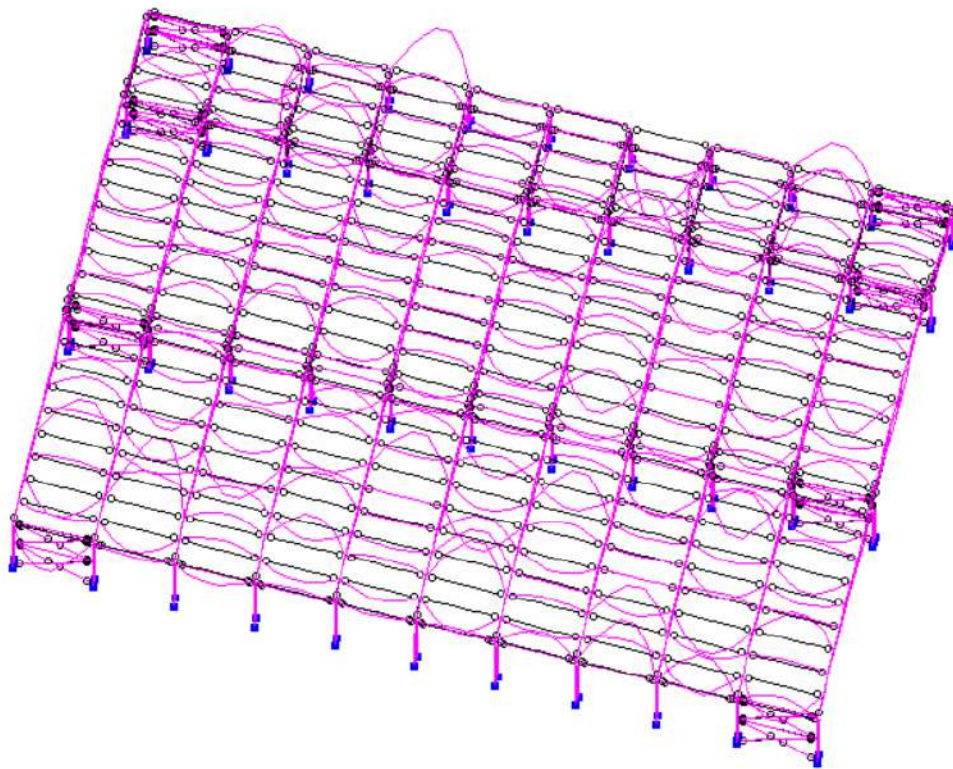


Рисунок 26 – Форма коливань прогонів покриття
для промислової будівлі (варіант 3)

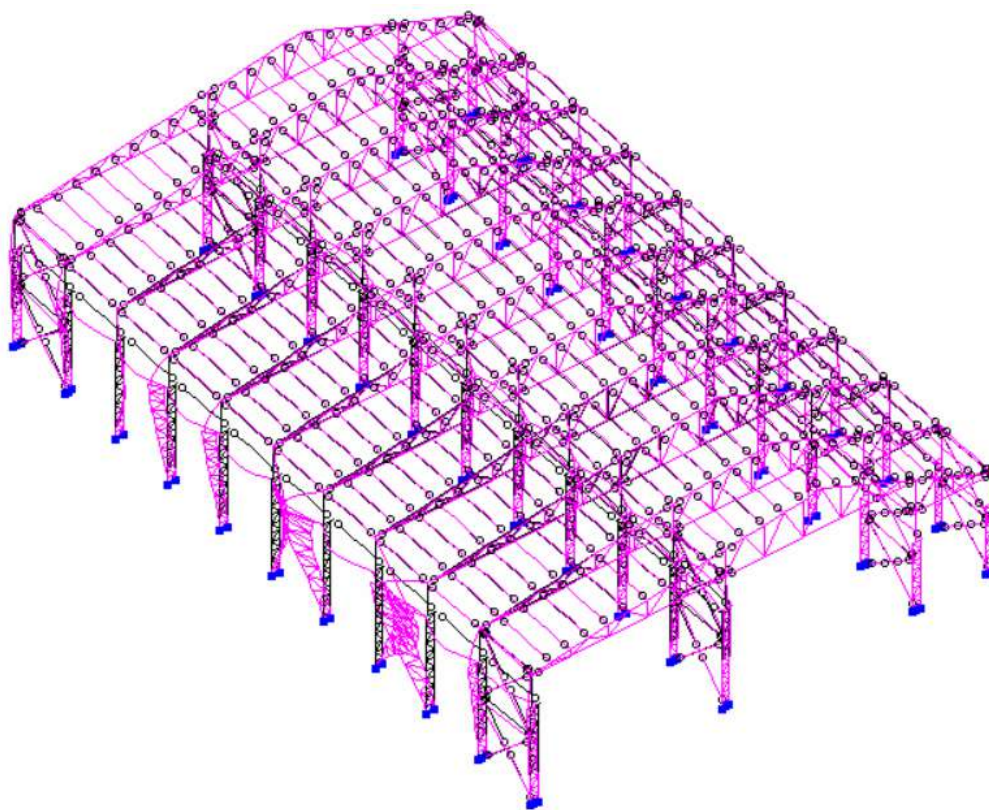


Рисунок 27 – Форма коливань підкранових балок
для промислової будівлі (варіант 3)

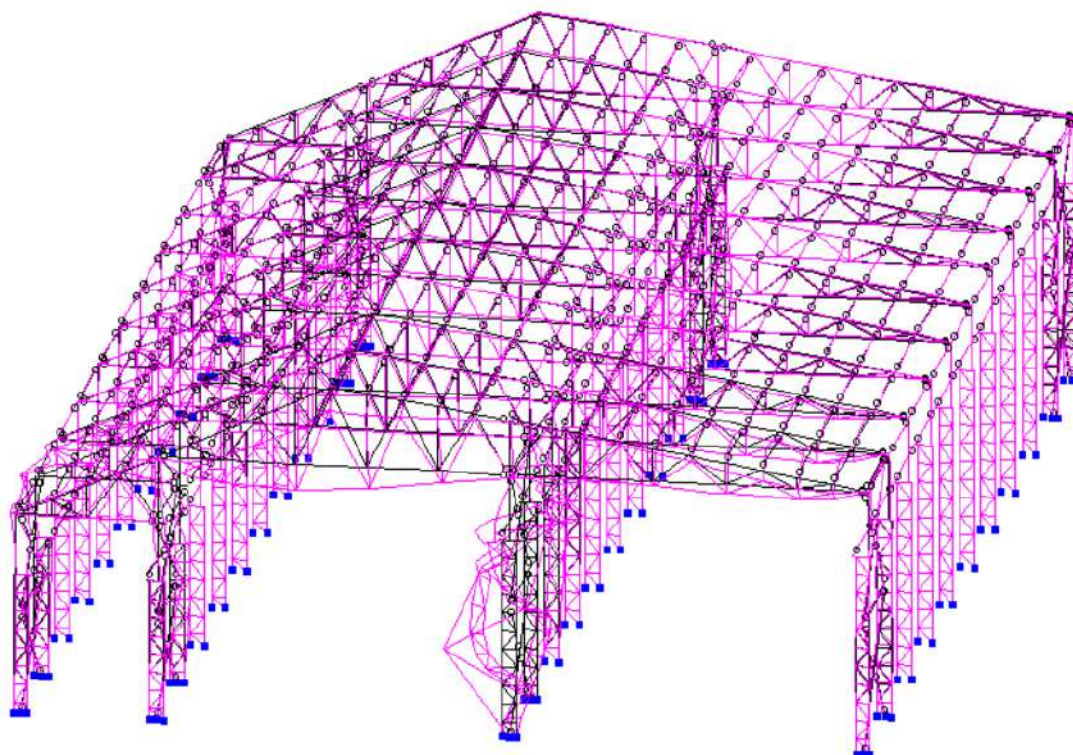


Рисунок 28 – Форма коливань в'язей
для промислової будівлі (варіант 3)

Для можливості оцінки рівня небезпеки для людини отриманого спектру власних парціальних частот коливань порівняємо їх із цікавими даними, наведеними в роботі [46]. Так, при динамічних впливах на людину найбільш істотно те, що тіло людини можна представити у вигляді складної динамічної системи. Численні дослідження показали, що ця динамічна система змінюється залежно від пози людини, її стану – розслаблене або напружене – та інших факторів.

Для такої системи з медичної точки зору можна виділити небезпечні резонансні частоти. І якщо зовнішні сили впливають на людину з частотами, близькими або рівними резонансним, то різко зростає амплітуда коливань як усього тіла, так і окремих його органів – табл. 9. При цих частотах інтенсивна вібрація може призвести до травматизації хребта і кісткової тканини, розладу зору, у жінок – викликати передчасні пологи. Коливання викликають у тканинах органів змінні механічні напруження. Інформація про діючу вібрації сприймається вестибулярним апаратом, що може передавати у мозок неправильну інформацію, призводячи ще й до психо-невротичних розладів.

Таблиця 9 – Парціальні резонансні частоти коливань органів тіла людини, Гц

Орган тіла людини	Частота резонансних коливань
Голова	20 - 30
Очні яблука	60 - 90
Вестибулярний апарат	0,5-13
Серце	4-6
Шлунок	2-3
Кишечник	2-4
Нирки	6-8
Руки	2-5
Система таз-спина	5
Система груди-живіт	3

Як бачимо із отриманих в ході проведених досліджень даних (табл. 6), небезпечними є коливання всіх конструктивних елементів промислової будівлі окрім ферм. Особливу небезпеку являють колони будівлі, які часто використовуються для кріплення до них різноманітного обладнання або допоміжного устаткування та вволікають у роботу весь каркас будівлі. Тому питання покращення їх динамічної роботи є першочерговою задачею. При цьому під покращенням маємо на увазі зміщення спектру парціальних частот коливань за межі шкідливого для людини. Фактично мова йде про підвищення парціальних частот найважливіших конструктивних елементів промислової будівлі.

Оскільки зміна профілю перерізу доволі слабо впливає на динамічні властивості певного конструктивного елементу, як рівно й зміна довжини промислової будівлі, то потрібні більш радикальні заходи.

Одним із подібних запропонованих прийомів є додавання спеціальних «розтяжок» круглого перерізу діаметром 20 мм під кутом до горизонту приблизно 60° – рис. 29. Розрахункова скінченно-елементна модель для цього випадку представлена на рис. 30, а отримана парціальна форма коливань для колон будівлі – на рис. 31.

Звісно слід зазначити, що такий підхід є доволі специфічним, проте коли мова йде про можливість подальшої експлуатації будівлі взагалі або у важкодоступних умовах будівництва, то він виявляється повністю виправданим.

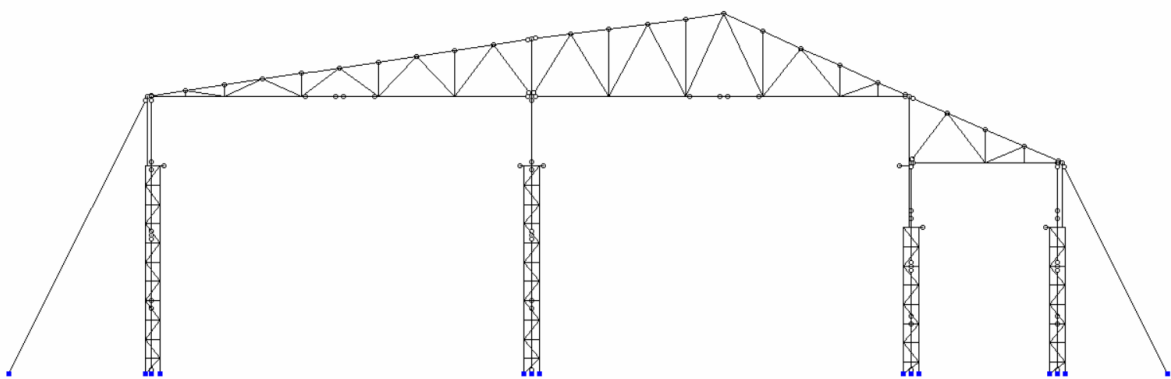


Рисунок 29 – Рама вдосконаленого каркасу промислової будівлі

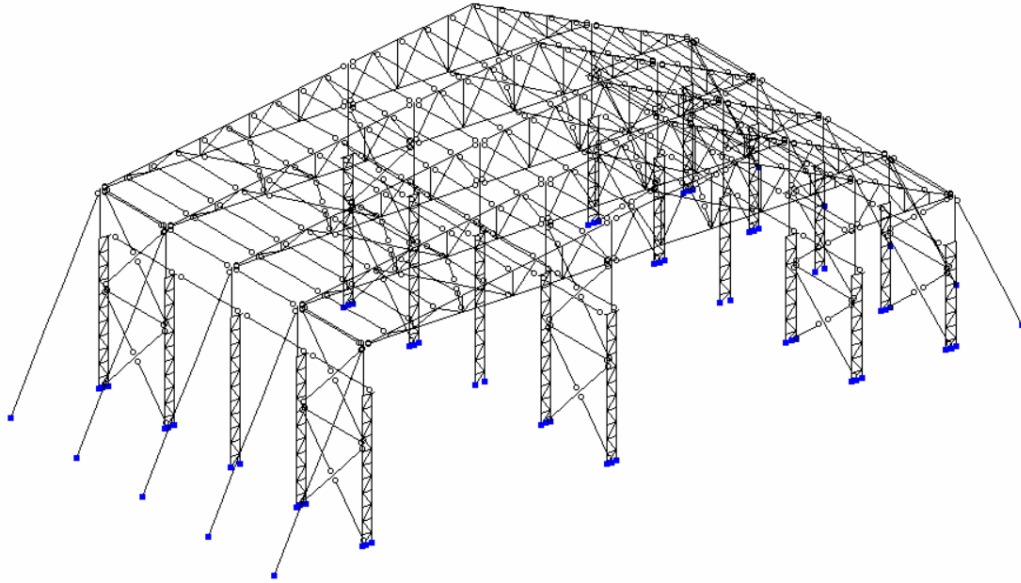


Рисунок 30 – Розглядувана модель вдосконаленого каркасу промислової будівлі

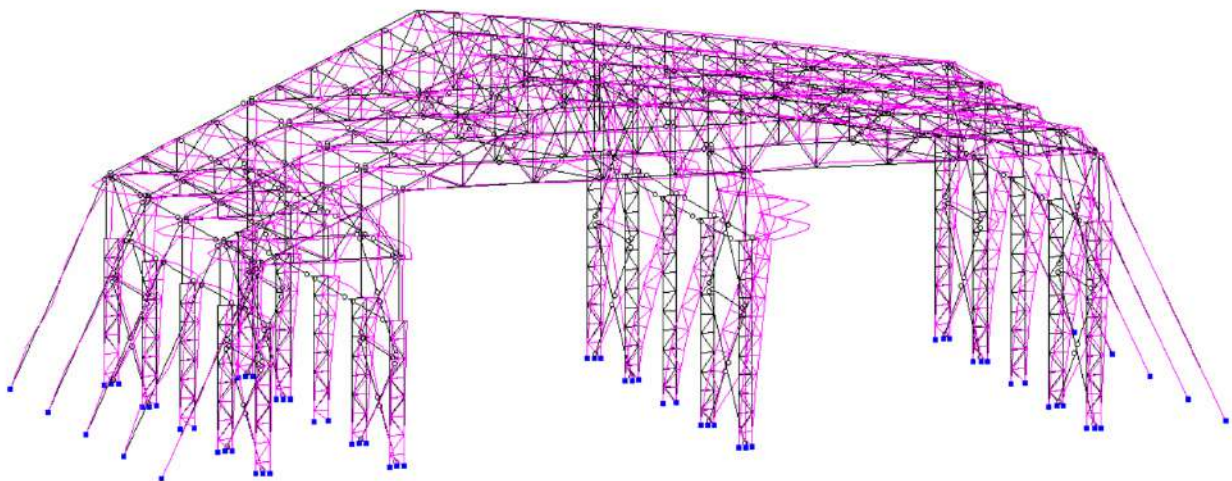


Рисунок 30 – Форма коливань колон для вдосконаленого каркасу виробничої будівлі

Співставлення парціального частотного спектру для варіантів без та з використанням динамічної стабілізації каркасу будівлі наведена в табл. 10. Як видно вдалось підвищити власну парціальну частоту для колон і при цьому якісно змінити форму коливань, яка тепер практично не залучає в роботу весь каркас промислової будівлі. «Нова» парціальна частота наблизилась до границь спектру найбільш шкідливих частот для людини.

Таблиця 10 – Співставлення парціальних частот до і після динамічної стабілізації каркасу промислової будівлі, Гц

	Варіант 1 (без динамічної стабілізації)	Варіант з динамічною стабілізацією
Ферма	0,344	0,345
Колони	1,978	5,136
Прогони покриття	4,269	4,287
Підкранова балка	5,695	5,637
В'язі	22,384	22,388

Також додатково було проаналізовано вплив поперечного перерізу «розтяжок» на динамічну стабілізацію конструкції колон та каркасу промислової будівлі – табл. 11.

Таблиця 11 – Залежність парціальних частот від поперечного перерізу стабілізуючих «розтяжок», Гц

	Переріз, мм		
	20	40	100
Колони	5,136	5,350	5,433

Як ми бачимо з результатів розрахунків, переріз «розтяжок» чинить дуже незначний вплив на парціальну частоту коливання колон.

V. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Викладені у розділі результати проведених досліджень вітчизняних промислових будівель зі сталевим каркасом дозволили в цілому розширити уявлення про їх дійсну роботу, виявити найбільш економічно ефективні й доцільні на тепер конструктивні рішення, а також отримати новітні дані про динамічні показники будівель такого

типу та їх вплив на здоров'я людини. В ході досліджень аналізувались промислові будівлі найбільш поширеного на сьогодні типу та з найбільш розповсюдженими геометричними розмірами, що надає змогу розповсюдити й застосувати отримані результати на доволі широкий клас подібних будівельних конструкцій. При аналізі використовувався найпопулярніший на сьогодні чисельний метод будівельної механіки – метод скінчених елементів. Для його реалізації були обрані вітчизняні програмні комплекси – SCAD та Lira – що відрізняються як в цілому будівельною орієнтацією, так і невисокою кошторисною вартістю.

Також слід відзначити, що окремо розглянуто на початку розділу питання класифікації промислових будівель в чинній нормативній базі України не є досконалим та потребує суттєвих змін. В розділі наводяться пропозиції відповідно до впорядкування цього питання.

Серед найбільш важливих наукових результатів слід зазначити наступні:

1. Найбільш ефективним з точки зору маси й вартості конструктивним рішенням несучого елемента покрівлі слід вважати застосування ферм із електрозварних холодногнутих профілів квадратного або круглого поперечного перерізів.

2. Наступними з точки зору цих критеріїв слід вважати гарячекатані круглі труби або кутики, які приблизно на 15 % виявляються більш вартісними. Проте їх технологічна складність у використанні накладає певні обмеження на виготовлення з них несучих сталевих елементів ферм.

3. Найменш ефективним для несучих конструкцій покриття сталевих каркасів є прокатні балкові профілі, які майже втричі перевищують за вартістю попередні типи профілів.

4. Спектр парціальних частот основних конструктивних елементів сталевих каркасів промислових будівель знаходиться в діапазоні 0,3-23 Гц, що якраз доволі добре корелює зі спектром шкідливих для здоров'я людини частот. При цьому найбільшу небезпеку являють колони, що залучають в процесі динамічної роботи весь сталевий каркас будівлі.

Практичні результати досліджень зводяться до:

1. Встановлено, що ані зміна поперечних перерізів конструктивних елементів сталевго каркасу промислової будівлі, ані довжини самої будівлі суттєвим чином не впливає на спектр власних парціальних динамічних характеристик сталевго каркасу промислової будівлі розглядуваного типу та форми її коливань.

2. Запропоновано варіант динамічної стабілізації сталевго каркасу, що полягає у встановленні спеціальних «розтяжок». Такий підхід дозволяє підвищити власні парціальні частоти, зсунувши їх на межі небезпечної для людини зони.

В цілому отримані результати можуть бути використані як в практиці проєктування та відновлення існуючих вітчизняних промислових будівель, так і враховані в чинній нормативній базі України.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] ДБН В.2.2-8-98. 1998. *Будинки і споруди. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна*, Київ: Держбуд України, 84.
- [2] Нілов О. О., Пермяков В. О. та ін. 2010. *Металеві конструкції. Загальний курс: підручник для вищих навчальних закладів*. – Вид. 2-ге. / Під заг. редакцією О. О. Нілова і О. В. Шимановського, Київ: Сталь, 869.
- [3] ДК 018-2000. 2000. *Державний класифікатор будівель та споруд*, Київ: Держстандарт України, 83.
- [4] Банніков Д. О., Нікіфорова Н. А., Косячевська С. М. 2022. Сучасний стан класифікації транспортних будівельних конструкцій в Україні. *Мости та тунелі: теорія, дослідження. Практика*, Дніпро: УДУНТ, 35-43.
- [5] Мізяк М. І. 2008. *Архітектурні конструкції: Навчальний посібник для вищих навчальних закладів*, Харків: ХНАМГ, 198.
- [6] Коробко О. О., Кушнір О. М. 2014. *Конспект лекцій до вивчення варіативної навчальної дисципліни «Архітектура промислових будівель та споруд»*, Одеса: ОДАБА, 50.
- [7] Марченко Т. В., Банников Д. О. 2011. Технология ЛСТК: проблемы и перспективы. «Строительство, материаловедение, машиностроение», серия: Создание высокотехнологических социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития, 60, 120-124.
- [8] Безсалий В. М., Банников Д. О. 2019. Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 20-29.
- [9] Hezentsvei Y. I., Bannikov D. O. 2021. Use of Fine-Grained Heat-Strengthened Steels to Increase the Operation Qualities of Bunker Capacities from Thin-Walled Galvanized Profiles. *Наука та прогрес транспорту*, 1 (91), 84-93.
- [10] Банніков Д. О. 2014. *Металеві конструкції: Довідкові дані «Сортамент металопрокату»*. Частина 1. Гарячекатані профілі, Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 54.

- [11] Банніков Д. О. 2014. *Металеві конструкції: Довідкові дані «Сортамент металопрокату». Частина 2. Холодногнуті профілі*, Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2014, 51.
- [12] ДБН В.1.1-12:2006. 2006. *Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України*, Київ: Мінбуд, арх-ри та ЖКГ України, 80.
- [13] ДБН В.1.2-2:2006. 2006. *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування*, Київ: Мінрегіонбуд України, 70.
- [14] ДБН В.1.2-14:2018. 2018. *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд*, Київ: Мінрегіонбуд, 36.
- [15] ДБН В.2.6-198:2014. 2014. *Сталеві конструкції. Норми проектування*, Київ: Мінрегіонбуд України, 205.
- [16] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. 2014. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. – Seventh Edition*, Elsevier LTD, 624.
- [17] Strang G., Fix G. J. 1973. *An Analysis of the Finite Element Method*, Prentice-Hall, 328.
- [18] Karpilovskyi V. S. 2020. Finite Elements of the Plane Problem of the Theory of Elasticity with Drilling Degrees of Freedom, *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 16(1), 48-72.
- [19] Дубінчик О. І., Недужа Л. О. 2021. Обґрунтування напружено-деформованого стану пальового фундаменту з використанням програмних комплексів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 20, 13-18.
- [20] Тютюкін О. Л., Мірошник В. А., Гелетюк І. В. 2021. Комплексний аналіз конструкції стовбуру Дніпровського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 91-98.

- [21] Bofang Z. 2018. *The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering*, Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 843.
- [22] Johnson R. P. 2018. *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 265.
- [23] Singiresu S. R. 2018. *The Finite Element Method in Engineering*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 782.
- [24] Shames I. H. 2017. *Energy and Finite Element Methods in Structural Mechanics*. New York: Routledge, 776.
- [25] Chimakurthi S. K., Reuss S., Tooley M., Scampoli St. 2018. ANSYS Workbench System Coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems. *Engineering with Computers*, 34-2, 385-411.
- [26] Salahuddin M. B. M., Atikah A. F., Rosnah S., Zuhair M. N. M. 2019. Conceptual design and finite element analysis of a high inclusion dough shaping machine using 3D-computer aided design (CAD) (SolidWorks). *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 50-3 (SI), 267-273.
- [27] Liang W., Ruilin L., Changhao W. 2015. Modal Analysis and Improvement of Vibration Noise of Paper Folding Board Based on COSMOSWorks. *Packaging Engineering*, 36-1, 125-128.
- [28] Chaomei Ch., Chengjie Xi., Haichuan T., Guo M. 2015. A Topology Optimization Method based on Nastran Card Quickly Modifying Parameter. *Journal of Mechanical Transmission*, 39-7, 182-186.
- [29] Fialko S., Karpilovskyi V. 2018. Time History Analysis Formulation in SCAD FEA Software. *Journal of Measurements in Engineering*, 6-4, 173-180.
- [30] LIRALAND Group. Режим доступу: <https://www.liraland.ua/company>.
- [31] Іванніков В. В. 2015. Характерні дефекти і пошкодження металевих конструкцій. *Хімічна техніка*, 7.

- [32] Kruhlikova N .G., Bannikov D. O. 2019. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Наука та прогрес транспорту*, Дніпро: вид-во ДНУЗТ, 2-80, 144-152.
- [33] ДСТУ Б В.2.6-8-95 (ГОСТ 30245-94) *Будівельні конструкції. Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій. Технічні умови*. К: Держстандарт України, 19.
- [34] ДСТУ 8943:2019 *Труби сталеві електрозварні. Технічні умови*. К: Мінекономрозвитку України, 23.
- [35] ДСТУ 8938:2019 *Труби сталеві безшовні гарячедеформовані. Технічні умови*. К: Мінекономрозвитку України, 23.
- [36] ДСТУ 2251-93 (ГОСТ 8509-93). 1993. *Кутики сталеві гарячекатані рівнополічні. Сортамент*. Київ: Держстандарт України, 17.
- [37] ДСТУ 8768:2018 *Двотаври сталеві гарячекатані. Сортамент*. К: Мінекономрозвитку України, 8.
- [38] ДСТУ 8541:2015. 2016. *Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови*, Київ: ДП «УкрНДНЦ», 21.
- [39] ДБН В.2.6-220:2017. 2017. *Покриття будівель і споруд*, Київ: Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 46.
- [40] Банников Д. О., Казакевич М. И. 2003. *Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов*, Днепропетровск: Наука и образование, 150.
- [41] Гуслиста Г. Е., Банніков Д. О. 2011. Вибір сітки скінчених елементів при комп'ютерному моделюванні будівельних конструкцій і ґрунтових масивів. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*, 61, 156-164.
- [42] ДБН В.1.2–2:2006. 2006. *Навантаження та впливи. Норми проектування*, Київ: Мінрегіонбуд України, 70.
- [43] Клименко Ф. Є., Барабаш В. М., Стороженко Л. І. 2002. *Металеві конструкції: підручник для вищих навчальних закладів*. – Вид. 2-ге. / Під редакцією Ф. Є. Клименко, Львів: Світ, 312.

- [44] Редченко В. П. 2016. *Динамічні випробування мостів. Частина 1: Загальні положення, спектральний аналіз, динамічні характеристики*, Дніпро: Пороги, 216.
- [45] Редченко В. П. 2017. *Динамічні випробування мостів. Частина 2: Вільні коливання, модальний контроль*. Дніпро: Пороги, 216.
- [46] Kulyabko V., Babenko M. 2018. Synergy of vi-broecologists, programmers, inventors and testers of buildings and structures under the evaluation of the impact of the dynamics of structures. *Sustainable housing and human settlement*. Dnipro – Bratislava: SHEE “PSACEA” – Slovak University of Technology in Bratislava, 108-115.
- [47] Rozumenko D. V., Bannikov D. O. 2020. Dynamic Properties of One-Storey Industrial Building. *Наука та прогрес транспорту*, Дніпро: вид-во ДНУЗТ, 1-85, 138-148.
- [48] ДСТУ 3436-96 (ГОСТ 8240-97). 2004. *Швелери сталеві гарячекатані. Сортамент*, Київ: Держстандарт України, 11.