

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**ЮРЧЕНКО Віталіна Віталіївна**



УДК 624.014

**УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ ФОРМИ ЛЕГКИХ  
КАРКАСІВ БУДІВЕЛЬ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ НА  
БАЗІ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО  
ПРОЕКТУВАННЯ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Київ – 2019**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор

**Білик Сергій Іванович**

Київський національний університет

будівництва і архітектури МОН України

завідувач кафедри металевих та дерев'яних конструкцій

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Пічугін Сергій Федорович**

Полтавський національний технічний університет

імені Юрія Кондратюка МОН України

завідувач кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Махінко Антон Володимирович**

ТОВ «ЕТУАЛЬ» Інжинірингова компанія

завідувач проектно-конструкторським відділом

доктор технічних наук, професор

**Волкова Вікторія Євгенівна**

Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка» МОН України

професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки

Захист відбудеться « 10 » жовтня 2019 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ-37, Повітрофлотський проспект, 31, а. 319.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03680, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий « 6 » вересня 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,

к. т. н., доцент



Д. В. Михайловський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сьогодні на український ринок металоконструкцій активно імпортуються різноманітні конструктивні системи із тонкостінних холодногнутих профілів, які знайшли широке застосування у будівельній індустрії. Характерними рисами легких сталевих тонкостінних конструкцій є: мала металомісткість, висока технологічність та пристосованість для виготовлення на потокових автоматизованих лініях, для транспортування, а також для конвеєрно-блочних та інших швидкісних методів монтажу; високий ступінь заводської готовності, можливість комплектної поставки цілих будівель-модулів та їх несучих конструкцій.

Впровадження у практику будівництва конструкцій із холодногнутих профілів є актуальним та економічно обґрунтованим, проте широке їх використання затримується передусім недосконалістю нормативної бази та недостатністю вітчизняного досвіду економічного та надійного проектування таких конструкцій.

Економія різних типів ресурсів при проектуванні конструкцій каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів можлива шляхом розвитку теорії та провадження в практику методів оптимального проектування, які набувають особливого значення при широкому застосуванні систем автоматизованого проектування. На сьогодні методи оптимізації використовуються обмежено і потребують подальшого розвитку з врахуванням наближення їх до практичного попиту.

Розробка методології пошуку оптимальних проектних рішень будівельних конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів є важливою науковою проблемою. Вирішення поставленої проблеми полягає насамперед у дослідженні принципів формоутворення поперечних рам каркасів будівель, колон та наскрізних ригелів, виконаних з тонкостінних стержнів відкритого профілю, при різноманітних граничних умовах та при дії навантажень, що обумовлюють стиснене кручення, на базі вирішення оптимізаційної задачі. Розробка рекомендацій по розрахунку та проектуванню конструкцій поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів відкритого перерізу сприятиме ширшому впровадженню цього класу конструкцій у практику будівництва.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні дослідження теоретичного і прикладного характеру виконані в межах держбюджетної науково-дослідної теми 7-ДБ-06 “Розвиток основи формоутворення і теорії розрахунку сталевих конструкцій із тонкостінних гнутих профілів несиметричного перерізу при розкріпленні в'язями зсуву” (№ держреєстрації 0106U000647), яка виконувалась за дорученням Міністерства освіти і науки України. У зазначеній темі автору належить розробка алгоритму пошуку оптимальної конструктивної форми досліджуваного класу систем. Автор брав участь у виконанні науково-дослідної роботи як виконавець.

Базуючись на виконаному аналізі існуючих методів, методик,

теоретичних розробок, програмних комплексів, літературних джерел з розрахунку та проектування конструкцій із тонкостінних холодногнутих профілів, а також з метою ширшого впровадження ефективних конструкцій швидкокомтованих будівель комплектної поставки із тонкостінних холодногнутих профілів вітчизняного виробництва можна сформулювати мету та задачі дисертаційного дослідження.

**Мета та наукові задачі досліджень.** Метою роботи є розвиток наукового напрямку вирішення проблеми оптимального проектування легких каркасів будівель, виготовлених із тонкостінних холодногнутих профілів, а також розробка моделей, методів і ефективних алгоритмів реалізації підходу та дослідження властивостей конструкцій з оптимальними параметрами.

Досягнення поставленої мети здійснюється на основі вирішення таких **задач досліджень**:

- виконати числові дослідження, присвячені оцінці депланацій перерізів, що примикають до вузлів, та розподілу депланацій та бімоментів у тонкостінних стержневих системах;
- розробити математичне та алгоритмічне забезпечення для числового розв'язку задачі пошуку дотичних напружень у тонкостінному стержневому елементі довільного перерізу для загального випадку навантаження, орієнтованого на програмну реалізацію в системах автоматизованого проектування тонкостінних стержневих систем;
- розробити методику розрахунку несучої здатності стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи, що обумовлена втратою стійкості стиснутих елементів перерізу та втратою стійкості форми поперечного перерізу;
- побудувати математично і механічно коректну модель задачі оптимізації поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів, що враховує особливості роботи та поведінки досліджуваного класу конструкцій під навантаженням;
- дослідити область пошуку оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів;
- запропонувати метод вирішення задачі оптимального проектування поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів, що дозволяє врахувати особливості області пошуку оптимальних проектних рішень досліджуваного класу конструкцій;
- розробити ефективний алгоритм для вирішення задачі пошуку оптимальної конструктивної форми поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів та дослідити його обчислювальну ефективність;
- розробити методику пошуку оптимальних розмірів поперечних перерізів тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів;
- виконати числові дослідження для виявлення закономірностей формоутворення оптимальних поперечних перерізів тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів;
- розв'язати задачі пошуку оптимальної конструктивної форми та визначити техніко-економічну ефективність оптимальних проектних рішень

каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів;

- виконати числові дослідження для виявлення закономірностей формоутворення оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів, виготовлених із тонкостінних холодногнутих профілів, та сформулювати рекомендації по підвищенню техніко-економічної ефективності досліджуваного класу конструкцій.

**Об'єкт досліджень.** У дисертаційній роботі досліджуються легкі конструкції поперечних рам каркасів будівель, виготовлені із тонкостінних холодногнутих профілів.

**Предметом досліджень** є особливості роботи та поведінки поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів під навантаженням та пошук оптимальних проектних рішень досліджуваного класу конструкцій.

**Методи досліджень.** В основу одержаних в дисертаційній роботі наукових результатів покладена інтерпретація задачі оптимального проектування конструкцій як задачі нелінійного програмування. Для проведення теоретичних досліджень, побудови математичних моделей та розробки алгоритмів реалізації підходу використовуються аналітичні та числові методи класичної механіки стержневих систем, методи математичної статистики, а також числові методи оптимізації, зокрема методи нелінійного програмування та комбінаторного числення.

**Наукова новизна одержаних результатів.** З єдиних позицій, що ґрунтуються на інтерпретації задачі оптимального проектування будівельних конструкцій як задачі нелінійного програмування та використанні еволюційних методів оптимізації для її розв'язку:

- побудована нова математична модель задачі оптимального проектування плоских поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів, що враховує особливості роботи та поведінки досліджуваного класу конструкцій під навантаженням;

- вперше побудовано і досліджено область несучої здатності стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх роботи у закритичній стадії та виявлено стрибкоподібний характер її границь;

- запропоновано метод розв'язку сформульованої задачі оптимізації – гібридний генетичний алгоритм, який дозволяє врахувати особливості області пошуку оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів;

- побудовано новий ефективний алгоритм пошуку оптимальної конструктивної форми поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів з оптимізацією параметрів геометричної схеми та розмірів поперечних перерізів її елементів з врахуванням особливостей роботи досліджуваного класу конструкцій під навантаженням.

В рамках запропонованої методології пошуку оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів:

- вперше проведені числові експерименти з оцінки депланацій перерізів, що примикають до вузлів, та виявлена роль конструктивного рішення вузлів на розподіл депланацій та бімоментів у тонкостінних стержневих системах;
- розроблено нове алгоритмічне забезпечення для чисельного розв'язку задачі пошуку потоків дотичних зусиль у довільному перерізі тонкостінного стержня для загального випадку навантаження;
- удосконалена методика розрахунку несучої здатності стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи, що обумовлена втратою стійкості стиснутих елементів перерізу та втратою стійкості форми поперечного перерізу;
- розроблена нова методика пошуку оптимальних розмірів поперечних перерізів тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів;
- виявлені нові закономірності формоутворення оптимальних поперечних перерізів тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів;
- сформульовано і розв'язано нові задачі пошуку оптимальної конструктивної форми поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів;
- виявлені нові закономірності формоутворення оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів залежно від умов проектування та параметрів навантаження.

**Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій**, сформульованих у роботі, підтверджується строгістю використання основних положень будівельної механіки стержневих систем та елементів теорії оптимізації; коректністю формулювання механічних моделей досліджуваного класу конструкцій; застосуванням на окремих етапах розроблених алгоритмів відомих і добре апробованих чисельних методів аналізу стержневих систем; строгістю та коректністю математичної моделі задачі оптимального проектування досліджуваного класу конструкцій; стійкістю отриманих чисельних розв'язків по відношенню до вихідних даних та подальшим аналізом збіжності ітераційного пошукового процесу; апробацією підходу на тестових задачах з подальшим математичним обґрунтуванням розроблених методів та запропонованих обчислювальних алгоритмів; порівняльним аналізом та узгодженням отриманих результатів досліджень із опублікованими результатами; практикою застосування окремих прикладних досліджень.

**Теоретична цінність** роботи полягає у подальшому розвитку математично коректного, ефективного і перспективного єдиного підходу, що ґрунтується на інтерпретації задачі оптимального проектування будівельних конструкцій як задачі нелінійного програмування та використанні методу скінченних елементів та еволюційних методів оптимізації для її розв'язку. Область застосування результатів може бути поширена на вирішення проблем ресурсозбереження та задач оптимального проектування будівельних конструкцій.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у можливості безпосереднього використання підходу як ефективного засобу відшукування оптимальних проектних рішень з метою зниження витрат ресурсів на стадіях виготовлення і зведення поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів. Одержані в дисертації результати (методологія, алгоритми, чисельні дослідження, оптимальні проектні рішення досліджуваного класу конструкцій) можуть служити науковою основою перспективних розробок прогнозування і створення легких конструкцій поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів із заданими властивостями.

Результати дисертаційної роботи були використані при розробці обчислювального комплексу SCAD та програм-сателітів КРИСТАЛ, КОМЕТА і ТОНУС, що функціонують у складі програмного забезпечення інтегрованої системи SCAD Office, яка впроваджена у розрахункову практику близько 4000 вітчизняних і закордонних підприємств будівельної галузі різних форм власності. Участь здобувача у розробці зазначених програм підтверджена довідками про впровадження.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці нормативних документів ДБН В.2.6-163:2010 (затверджено наказами Мінрегіонбуду України від 16.12.2010 р. №521, від 30.12.2010 р. №571 та від 22.08.2011 р. №93) і ДБН В.2.6-198:2014 (затверджено наказом Мінрегіонбуду України від 10.06.2014 р. №167), а також під час розробки національних додатків до частин 1-3, 1-5 та 1-8 Єврокоду 3, що введені в дію як: Зміна №1 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012, Зміна №1 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012 і Зміна №1 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-8:2011. Участь здобувача у розробках зазначених нормативних документів зафіксована у офіційних виданнях цих документів, а також у відповідних довідках про впровадження.

Матеріали дисертації методично обґрунтовані для впровадження у навчальний процес будівельних спеціальностей вищих навчальних закладів. Окремі результати роботи впроваджено в навчальний процес на кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури у вигляді спеціалізованого курсу лекцій, а також при виконанні дипломних та магістерських робіт студентів спеціальності «Промислове та цивільне будівництво».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи, які становлять суть (зміст) дисертації та виносяться на захист, отримані автором самостійно. Роботи [13, 14, 18, 19, 27, 30, 34, 35, 48, 58] опубліковані без співавторів. У роботах, підготовлених у співавторстві, викладені наступні наукові результати, що належать автору: огляд сучасного стану, постановка проблеми розробки та впровадження ефективних конструкцій будівель із тонкостінних холодногнутих профілів та побудова програми наукових досліджень [10]; огляд сучасного стану оптимального проектування металевих конструкцій та оптимізації топології металевих стержневих конструкцій [1, 4, 5]; розробка методології розрахунку тонкостінних елементів стержневих конструкцій із холодногнутих профілів з

врахуванням закритичної роботи стиснутих елементів перерізів [12] та її програмна реалізація [54, 56]; ідея розробки аналітичних залежностей для обчислення значень критичних сил втрати місцевої стійкості та втрати стійкості форми перерізу тонкостінних стержнів відкритого профілю [41]; постановка задачі визначення критичних сил на базі чисельного розв'язку задачі пружного випучування тонкостінного стержня відкритого профілю [46]; дослідження області несучої здатності стержневих елементів металевих конструкцій у закритичній стадії [53, 55], зокрема, для тонкостінних холодногнутих профілів [21]; ідея застосування генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних проектних рішень металевих стержневих систем, участь у програмній реалізації [1, 32]; ідея удосконалення стандартного генетичного алгоритму шляхом його гібридизації із застосуванням градієнтного методу, участь у програмній реалізації, дослідження обчислювальної ефективності запропонованої гібридизації генетичного алгоритму [1, 3, 31, 33, 36, 38]; реалізація числових експериментів по оцінці депланацій в перерізах тонкостінних стержневих елементів, що примикають до конструкції вузлів, та розподілу депланацій і бімоментів у просторових тонкостінних стержневих системах [16, 17, 28, 47, 52]; постановка проблеми скінченно-елементного аналізу просторових тонкостінних стержневих систем при використанні стержневої апроксимації [37, 42, 45]; математичне і алгоритмічне забезпечення чисельного розв'язку задачі пошуку потоків дотичних зусиль у довільному перерізі тонкостінного стержня для загального випадку навантаження [51, 56], а також участь у розробці програмного забезпечення [2]; постановка задачі оптимізації, розробка математичної моделі, участь у реалізації задачі оптимального проектування досліджуваних поперечних рам легких каркасів промислових будівель та аналізі результатів [6, 9, 22, 40, 49]; участь у розробці математичної моделі, реалізація задачі оптимального проектування досліджуваних конструкцій та участь у аналізі результатів [29, 50]; участь у проведенні експериментальних випробувань конструкції ферми із холодногнутих елементів відкритого профілю та аналізі їх результатів [7]; розробка методики експериментальних досліджень несучої здатності профільованих листів [57]; участь у розробці способів кодування змінних проектування задач оптимізації металевих стержневих систем з метою застосування генетичних алгоритмів для їх розв'язку [15]; участь у формулюванні задачі оптимальної кількості типорозмірів стержневих елементів металевих конструкцій [39]; участь у розробці удосконаленої математичної моделі стержневих металевих конструкцій для систем автоматизованого проектування [8]; постановка та реалізація задачі пошуку оптимальних розмірів С-подібного холодногнутого профілю з полчками, підкріпченими одинарними відгинами, аналіз результатів [20]; аналіз конструктивних вимог, що висуваються до болтових з'єднань, з метою їх подальшої реалізації в математичній моделі задачі оптимального проектування досліджуваного класу конструкцій, а також порівняння вітчизняних та європейських нормативних вимог до конструювання та перевірного розрахунку [11, 23-26, 43, 44].



Подана докторська дисертаційна робота є подальшим розвитком напрямку досліджень проблеми оптимізації в механіці деформівного твердого тіла, що ґрунтується на використанні еволюційних методів для задач оптимізації стержневих систем.

Усі наукові праці, що склали основу докторської дисертації, були опубліковані та апробовані після захисту кандидатської дисертації.

У поданій докторській дисертації результати кандидатської дисертації Юрченко В. В., крім відповідних посилань, не використовуються.

**Апробація результатів роботи.** Матеріали дисертації були представлені на міжнародних та національних конференціях, симпозиумах, семінарах, у тому числі: на VIII міжнародній конференції «Modern Building Materials, Structures and Techniques» (м. Вільнюс, Литва, 2004 р.), на VIII українській науково-технічній конференції «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее» (м. Київ, Україна, 2004 р.), на міжнародній конференції «Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures» (м. Вроцлав, Польща, 2006 р.), на українській науковій конференції «Металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку» (м. Київ, Україна, 2008 р.), на VIII світовому конгресі зі структурної та багатодисциплінарної оптимізації (м. Лісабон, Португалія, 2009 р.), на міжнародному симпозиумі «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)» (м. Брест, Білорусія, 2009 р.), на XII міжнародній науковій конференції «Current issues of civil and environmental engineering» (м. Жешув, Польща, 2009 р.), на щорічних наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА (м. Київ, Україна, 2006, 2007, 2009, 2010 рр.), на X міжнародній конференції «Modern Building Materials, Structures and Techniques» (м. Вільнюс, Литва, 2010 р.), на III міжнародному симпозиумі «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (м. Новочеркаськ, Росія, 2010 р.), на IV міжнародному симпозиумі «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (м. Челябінськ, Росія, 2012 р.), на міжнародній конференції «Design, Fabrication and Economy of Metal Structures» (м. Мішкольц, Угорщина, 2013 р.), на 3-му Польському конгресі механіків та 21-й міжнародній конференції «Computer methods in mechanic» (м. Гданськ, Польща, 2015 р.), на всеукраїнському семінарі «Застосування ПОК SCAD в учбовому процесі та проектуванні» (м. Київ, Україна, 2015 р.), на I, II та III міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі» (м. Київ, Україна, 2017, 2018 і 2019 рр.), а також на щорічних міжнародних наукових семінарах METNET (м. Люльо, Швеція, 2013 р.; м. Будапешт, Угорщина, 2015 р.; м. Тампере, Фінляндія, 2016 р.; м. Кемі, Фінляндія, 2017 р.; м. Коттбус, Німеччина, 2017 р.; м. Вільнюс, Литва, 2018 р.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Київського

національного університету будівництва та архітектури (м. Київ, Україна, 21.05.2019 р.).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковані в 58 наукових працях, у тому числі: 2 монографії, 19 статей у наукових фахових виданнях ВАК України, 9 статей, що включені до наукових періодичних видань інших держав та у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз матеріалів, 28 основних публікацій по доповідям на міжнародних і вітчизняних конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел (452 найменувань робіт) та додатків. Дисертація викладена на 466 сторінках, у тому числі 331 сторінок основного тексту, що містять 95 рисунків та 26 таблиць, 51 сторінок списку використаних джерел, додатків на 15 сторінках.

**Подяка.** Автор висловлює глибоку подяку доктору технічних наук, старшому науковому співробітнику, головному науковому співробітнику НПО «СКАД Софт» Перельмутеру Анатолію Вікторовичу, а також кандидату технічних наук, доценту, доценту кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» Пелешкові Івану Дмитровичу за змістовні та корисні зауваження, внесені при виконанні роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульована мета і задачі досліджень, наведена загальна характеристика роботи.

У першому розділі висвітлено сучасний стан проблеми розробки та впровадження рамних конструкцій будівель із холодногнутих профілів, наведено огляд конструктивних рішень рамних каркасів будівель, виготовлених із холодногнутих профілів, розглянуті особливості роботи під навантаженням тонкостінних стержневих конструкцій із холодногнутих профілів, зокрема їх закритична робота з врахуванням втрати місцевої стійкості та втрати стійкості форми перерізу.

Загальна теорія розрахунку тонкостінних стержнів відкритого профілю та стержневих систем, складених з тонкостінних стержнів, викладена в працях В. З. Власова, Є. А. Бейліна, Г. Ю. Джанелидзе і Я. Г. Пановко, А. А. Уманського, Д. В. Бичкова, Б. Н. Горбунова, В. П. Багмутова, В. А. Постнова та інших і на сьогодні добре відома. Вивченню проблеми стійкості несучих елементів тонкостінних конструкцій, а також проблемі чисельного моделювання роботи тонкостінних стержневих елементів присвячені праці Г. І. Белого та його учнів І. В. Астахова і А. Ю. Кузнецова, праці А. В. Перельмутера і В. І. Слівкера, І. Д. Євзерова, А. І. Манєвича, С. В. Ракши, С. І. Білика, В. П. Багмутова, А. Р. Тусніна, В. О. Семка, Н. І. Ватіна, В. В. Лаліна, В. А. Рибакіна, Т. В. Назмеевой та інших.

Дослідженнями втрати місцевої стійкості тонких пластин та їх закритичної роботи займалися С. П. Тимошенко, Ф. Блейх, А. А. Ільюшин,

В. З. Власов, Б. М. Броуде та інші. Окремо необхідно відмітити праці Т. Кармана та Д. Вінтера, які запропонували методику розрахунку несучої здатності тонких пластин з врахуванням впливу місцевої втрати стійкості, що ґрунтується на концепції «ефективної ширини». Пізніше у працях М. Л. Шарпа та Д. Б. Двигхта вперше розглянута особлива місцева форма втрати стійкості, пов'язана з втратою стійкості одночасно декількох пружно спряжених тонких пластин (втрата стійкості форми перерізу). Пізніші дослідження Д. Т. Девольфа, Д. Рходеса, Б. В. Шафера, Т. Пекоза, Т. П. Десмонда, Г. Д. Хенкока, К. Д. Р. Рассмусена, Д. Камотіма були спрямовані на вивчення взаємного впливу різних форм втрати стійкості, пошуку раціональних форм перерізу, врахуванню впливу залишкових напружень та початкових геометричних недосконалостей.

У подальшому виконано огляд праць з оптимального проектування металевих конструкцій, проаналізовано основні теоретичні дослідження з проблеми оптимального проектування металевих стержневих систем, яким присвячені праці Абовського Н. П., Баженова В. А., Бараненка В. О., Васількова Г. В., Геммерлінга А. В., Генієва Г. А., Герасимова Є. М., Гордєєва В. М., Гребенюка Г. І., Гуляєва В. Н., Дзюби А. П., Єгорова Е. А., Кошкіна В. Л., Ляховича Л. С., Малкова В. П., Овчіннікова І. І., Олькова Я. І., Пелешка І. Д., Пермькова В. О., Пічугіна С. Ф., Почтмана Ю. М., Рейтмана М. І., Скалозуба В. В., Трофимовича В. В., Трофімова В. І., Холопова І. С., Чіраса А. А., Шевченка Є. В., Шимановського В. М., Угодчикова А. Г. та інших.

На закінчення розділу сформульовані мета та задачі досліджень.

**Другий розділ** роботи присвячений виконанню числових досліджень по оцінці депланацій перерізів, що примикають до конструкції вузла, та розподілу депланацій та бімоментів у тонкостінних стержневих системах.

Статичний аналіз тонкостінних стержневих систем методом скінченних елементів при врахуванні деформацій стисненого кручення потребує введення до розгляду додаткового сьомого ступеня свободи у вузлах скінченно-елементної моделі, що відповідає за депланаційну складову вузлового переміщення і обумовлює виникнення бімоменту. Проте у випадку, коли для просторової стержневої системи використовується модель з скінченними елементами з 7-ма ступеня свободи, проблема формулювання умов сумісності по депланаціям на сьогоднішній день не має рішення. Для стержневої системи у загальному випадку доводиться миритися з дуже грубим формулюванням крайових умов, коли у кожному примиканні тонкостінного стержневого елемента до вузла скінченно-елементної моделі депланація або повністю відсутня (абсолютно жорсткий вузол), або не зустрічає жодних перешкод (шарнір відносно депланації). Це обумовило необхідність виконання числових досліджень, присвячених оцінці депланацій перерізів, що примикають до вузлів, та розподілу депланацій та бімоментів у тонкостінних стержневих системах.

У подальшому розглядалися детальні оболонкові скінченно-елементні моделі стержневих конструкцій, навантажені зовнішнім крутним моментом із

різноманітними умовами обпирання (рис. 1). При цьому тонкостінні стержні у такій моделі представлялись сукупністю плоских скінченних елементів. Для побудованих скінченно-елементних моделей стержневих конструкцій визначались поздовжні переміщення точок перерізів стержнів  $\hat{u}_i$ , що примикають до розрахункової моделі вузла, а також поздовжні напруження у цих точках  $\hat{\sigma}_i$ .

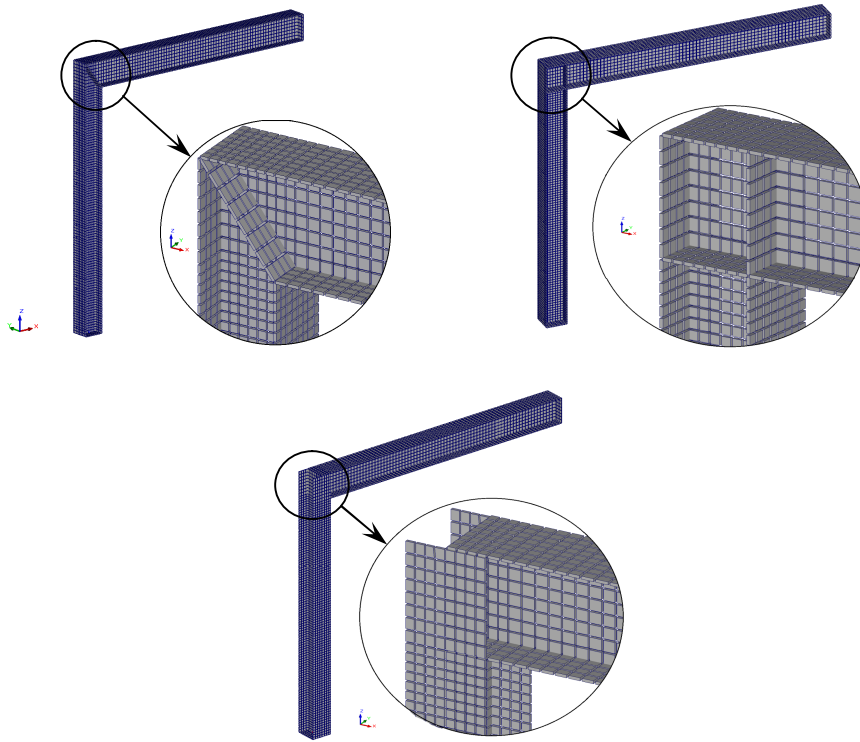


Рис. 1. Скінченно-елементні моделі вузлів рамних конструкцій

Відповідно до основних гіпотез теорії Власова щодо поведінки тонкостінних стержнів відкритого профілю поздовжнє переміщення кожної  $i$ -ї точки поперечного перерізу таких стержнів запишеться за допомогою рівняння,  $i = 1, \dots, n$ :

$$u_i(x, \zeta) = \xi(x) - \eta'(x)y_i(\zeta) - \zeta'(x)z_i(\zeta) - \theta'(x)\omega_i(\zeta), \quad (2.1)$$

де перші три доданки рівняння відповідають гіпотезі плоских перерізів, а саме:  $\xi(x)$  – поздовжнє переміщення центру ваги як функції поздовжньої координати  $x$  розглядуваного перерізу;  $\eta(x), \zeta(x)$  – поперечні переміщення центру згину розглядуваного перерізу;  $y_i(\zeta), z_i(\zeta)$  – координати розглядуваної  $i$ -ї точки у перерізі як функції дугової координати  $\zeta$ . Останній доданок рівняння (2.1) відповідає за депланаційну складову переміщень точок перерізу у напрямку поздовжньої осі стержня  $x-x$ , у ньому  $\theta(x)$  і  $\omega_i(\zeta)$  – відповідно кут повороту розглядуваного перерізу навколо полюсу та секторіальна координата  $i$ -ї точки перерізу.

Відповідні нормальні напружень для кожної  $i$ -ї точки перерізу тонкостінного стержня обчислюються з врахуванням впливу бімоменту:

$$\sigma_i(x, \zeta) = \frac{N(x)}{A} + \frac{M_y(x)}{I_y} z_i(\zeta) + \frac{M_z(x)}{I_z} y_i(\zeta) + \frac{B_\omega(x)}{I_\omega} \omega_i(\zeta), \quad (2.2)$$

де  $y_i(\zeta)$ ,  $z_i(\zeta)$ ,  $\omega_i(\zeta)$  – координати та секторіальна координата розглядуваної точки у перерізі тонкостінного стержня;  $N$  – поздовжня сила,  $M_y$  і  $M_z$  – згинальні моменти,  $B_\omega$  – бімомент;  $A$ ,  $I_y$ ,  $I_z$ ,  $I_\omega$  – інтегральні геометричні характеристики перерізу.

Порівняння результатів числового розрахунку (поздовжні переміщення точок перерізів стержнів  $\hat{u}_i$  і поздовжні напруження у цих точках  $\hat{\sigma}_i$ ) із теоретичними значеннями поздовжніх переміщень  $u_i$  та напружень  $\sigma_i$ , обчисленими відповідно за (2.1) і (2.2), дозволило оцінити величину депланації перерізів, що примикають до вузлів, обчислити значення бімоментів та оцінити їх розподіл для тонкостінних стержневих систем.

З використанням ідеології методу найменших квадратів проблема оцінки депланацій була зведена до задачі мінімізації функціоналу сумарних відхилень результатів числового розрахунку від теоретичного рівняння Власова (2.1):

$$\mathbf{E}_u = \sum_{i=1}^n (\xi(x) - \eta'(x) y_i(\zeta) - \zeta'(x) z_i(\zeta) - \theta'(x) \omega_i(\zeta) - \hat{u}_i)^2 \rightarrow \min. \quad (2.3)$$

а проблема оцінки бімоментів була зведена до задачі мінімізації функціоналу сумарних відхилень результатів числового розрахунку від теоретичного рівняння (2.2):

$$\mathbf{E}_\sigma = \sum_{i=1}^n \left( \frac{N(x)}{A} + \frac{M_y(x)}{I_y} z_i(\zeta) + \frac{M_z(x)}{I_z} y_i(\zeta) + \frac{B_\omega(x)}{I_\omega} \omega_i(\zeta) - \hat{\sigma}_i \right)^2 \rightarrow \min. \quad (2.4)$$

При цьому, необхідні умови мінімуму цих функціоналів дали дві системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів рівняння (2.1) і (2.2):

$$\begin{cases} -\eta' \sum_{i=1}^n (y_i)^2 - \zeta' \sum_{i=1}^n y_i z_i - \theta' \sum_{i=1}^n y_i \omega_i + \xi \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n y_i \hat{u}_i = 0, \\ -\eta' \sum_{i=1}^n z_i y_i - \zeta' \sum_{i=1}^n (z_i)^2 - \theta' \sum_{i=1}^n z_i \omega_i + \xi \sum_{i=1}^n z_i - \sum_{i=1}^n z_i \hat{u}_i = 0, \\ -\eta' \sum_{i=1}^n \omega_i y_i - \zeta' \sum_{i=1}^n \omega_i z_i - \theta' \sum_{i=1}^n (\omega_i)^2 + \xi \sum_{i=1}^n \omega_i - \sum_{i=1}^n \omega_i \hat{u}_i = 0, \\ -\eta' \sum_{i=1}^n y_i - \zeta' \sum_{i=1}^n z_i - \theta' \sum_{i=1}^n \omega_i + n\xi - \sum_{i=1}^n \hat{u}_i = 0; \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I_z} \sum_{i=1}^n y_i + \frac{M_y}{I_y} \sum_{i=1}^n z_i + \frac{B_\omega}{I_\omega} \sum_{i=1}^n \omega_i - \sum_{i=1}^n \hat{\sigma}_i = 0, \\ \frac{N}{A} \sum_{i=1}^n y_i + \frac{M_z}{I_z} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 + \frac{M_y}{I_y} \sum_{i=1}^n y_i z_i + \frac{B_\omega}{I_\omega} \sum_{i=1}^n y_i \omega_i - \sum_{i=1}^n y_i \hat{\sigma}_i = 0, \\ \frac{N}{A} \sum_{i=1}^n z_i + \frac{M_z}{I_z} \sum_{i=1}^n z_i y_i + \frac{M_y}{I_y} \sum_{i=1}^n (z_i)^2 + \frac{B_\omega}{I_\omega} \sum_{i=1}^n z_i \omega_i - \sum_{i=1}^n z_i \hat{\sigma}_i = 0, \\ \frac{N}{A} \sum_{i=1}^n \omega_i + \frac{M_z}{I_z} \sum_{i=1}^n \omega_i y_i + \frac{M_y}{I_y} \sum_{i=1}^n \omega_i z_i + \frac{B_\omega}{I_\omega} \sum_{i=1}^n (\omega_i)^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i \hat{\sigma}_i = 0; \end{array} \right. \quad (2.6)$$

тут для спрощення записів вказівку на залежність від поздовжньої  $x$  або дугової  $\zeta$  координат опущено з використанням лише позначень  $\eta$ ,  $\zeta$  і  $y_i$ ,  $z_i$ .

Складаючи и розв'язуючи системи лінійних алгебраїчних рівнянь (2.5) і (2.6) для кожного із перерізів тонкостінного стержня, що примикають до розрахункової моделі вузла, обчислювались значення депланації  $\theta'(x)$  та бімоментів  $B_\omega(x)$  у цих перерізах, що дало змогу оцінити депланації та розподіл бімоментів у тонкостінних стержневих системах.

Відповідно до запропонованої методики досліджень був проведений ряд числових експериментів по оцінці депланацій перерізів, що примикають до вузлів. Результати виконаних числових досліджень засвідчили, що зміна конструктивного оформлення жорсткого вузла спряження помітно впливає на розподіл депланацій та бімоментів у системі. Виявлено, що зміна схеми навантаження на конструкцію спричинює суттєву зміну не лише значень депланацій, але й співвідношень депланацій у перерізах елементів, що примикають до конструкції вузла.

В результаті реалізації числових експериментів доведено, що дійсну взаємодію тонкостінних стержнів у вузлі їх спряження може відобразити лише детальна скінченно-елементна модель тонкостінної стержневої системи, коли тонкостінні стержні представляються набором плоских скінченних елементів. Обґрунтована необхідність використання методик скінченно-елементного аналізу тонкостінних стержневих систем, спрямованих на зменшення змінних методу скінченних елементів, які за своєю суттю представляють аналог суперелементного моделювання, що забезпечує виконання геометричних гіпотез про поведінку торцевого перерізу тонкостінного стержня.

**У третьому розділі** розглянута задача визначення дотичних напружень для довільного перерізу тонкостінного стержня, що може складатися з декількох замкнених (зв'язаних та/або незв'язаних) контурів, а також із незамкнених ділянок. У загальному випадку тонкостінний стержень підлягає дії поздовжньої сили  $N$ , згинальних моментів  $M_y$  і  $M_z$  та бімоменту  $B_\omega$ , прикладених у центрі ваги перерізу, які обумовлюють нормальні напруження у перерізі  $\sigma_i(x, \zeta)$  (2.2), а також дії поперечних сил  $Q_y$  і  $Q_z$ , моменту чистого

кручення  $M_x$  та моменту стисненого кручення  $M_\sigma$ , прикладених у центрі згину перерізу, які обумовлюють дотичні напруження у перерізі  $\tau_j(x, \zeta)$  та записуються в термінах потоків дотичних напружень  $T_j(x, \zeta)$  як:

$$\tau_j(\zeta) = \frac{T_j(\zeta)}{\delta_j(\zeta)} = \frac{1}{\delta_j(\zeta)} \left( T_{S,j} - \frac{Q_z}{I_y} S_{oy,j}(\zeta) - \frac{Q_y}{I_z} S_{oz,j}(\zeta) - \frac{M_\sigma}{I_\sigma} S_{o\sigma,j}(\zeta) \right), \quad (3.1)$$

тут  $\delta_j(\zeta)$  – товщина  $j$ -го розглядуваного елемента перерізу;  $T_{S,j}$  – потік дотичних напружень у початковій точці  $j$ -ої ділянки перерізу, що не розгалужується.

Довільний переріз тонкостінного стержня асоціювався з планарним зв'язним неорієнтованим графом  $\mathbf{G} = \{\mathbf{V}, \mathbf{R}\}$ . Вершини графа асоціювалися лише з характерними точками перерізу – точки розгалуження перерізу і кінцеві точки перерізу ( $n_v$  – кількість вершин графа), а ребра графа асоціювалися з ділянками перерізу, що не розгалужуються ( $n_r$  – кількість ребер графа,  $j = \overline{1, n_r}$ ).

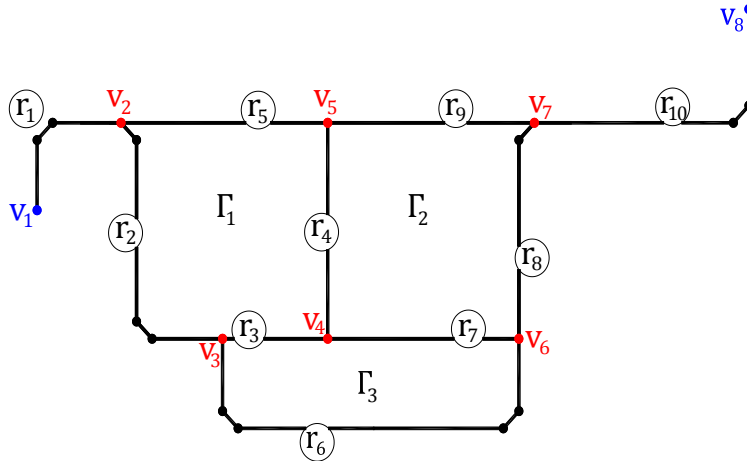


Рис. 2. Граф  $\mathbf{G} = \{\mathbf{V}, \mathbf{R}\}$ , що асоціюється з перерізом тонкостінного стержня (червоним кольором показані вершини графа, що відповідають точкам розгалуження перерізу, синім – вершини, що відповідають кінцевим точкам перерізу).

Для побудованого графа складалась матриця інциденцій  $\mathbf{I}$  та матриця базисних циклів графа  $\mathbf{F}$ , визначались: вага ділянки перерізу, що не розгалужується (тут  $\delta_\kappa^\zeta$  і  $l_\kappa^\zeta$  – товщина і довжина  $\kappa$ -го сегменту перерізу):

$$p_j = \int_{l_{r_j}^\zeta} \frac{d\zeta}{\delta(\zeta)} = \sum_{r=1}^{n_{\zeta r_j}} \frac{l_\kappa^\zeta}{\delta_\kappa^\zeta}, \quad \forall \kappa: \vec{s}_\kappa^\zeta \in \mathbf{R}_j^\zeta \wedge \vec{s}_\kappa^\zeta \in \mathbf{S}^\zeta, \quad (3.2)$$

обчислювались вага замкнутого контуру перерізу:

$$\tilde{p}_k = \oint_{\Gamma_k^{r_\zeta}} \frac{d\zeta}{\delta(\zeta)} = \int_{\mathbf{R}_j^\zeta \subseteq \Gamma_k^{r_\zeta}} \frac{d\zeta}{\delta(\zeta)} = \sum_{j=1}^{n_{r_\zeta k}} |f_{kj}| p_j, \quad f_{kj} \in \mathbf{F}; \quad (3.3)$$

складалась вагова матриця нерозгалужених ділянок перерізу (ребер графа  $\mathbf{G}$ ) – квадратна матриця  $\mathbf{W}$  розміром  $n_r \times n_r$  з діагональними елементами  $p_j$ .

Задачу пошуку потоків дотичних зусиль для довільного перерізу тонкостінного стержня зведена до задачі мінімізації функціоналу Кастільяно при забезпеченні обмежень-рівностей, що описують умови рівноваги потоків в точках розгалуження перерізу, а також при забезпеченні рівняння рівноваги усього перерізу відносно поздовжньої осі тонкостінного стержня. При цьому, функціонал Кастільяно ототожнювався з енергією деформацій, сформульованою в термінах напружень:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{2G} \left( \sum_{j=1}^{n_r} \left( \int_{\ell_j} \frac{(\sigma(\zeta))^2}{2(1+\nu)} \delta(\zeta) d\zeta + \int_{\ell_j} (\tau(\zeta))^2 \delta(\zeta) d\zeta \right) \right),$$

або з врахуванням (2.2) і (3.1) та залишаючи тільки ті доданки, що залежать від значень потоків дотичних напружень:

$$\mathbf{C} = \sum_{j=1}^{n_r} \left( \int_{\ell_j} \left( \frac{T_{S,j}^2}{2G} - T_{S,j} \frac{Q_z}{GI_y} S_{oy,j} - T_{S,j} \frac{Q_y}{GI_z} S_{oz,j} - T_{S,j} \frac{M_{\varpi}}{GI_{\varpi}} S_{o\varpi,j} \right) \frac{d\zeta}{\delta_j} + \dots \right); \quad (3.4)$$

тут  $\vec{T}_S = \{T_{S,j}\}^T$ ,  $j = \overline{1, n_r}$  – вектор потоків дотичних напружень у початкових точках ділянок перерізу, що не розгалужуються; або у векторно-матричній формі:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{2G} \vec{T}_S^T \mathbf{W} \vec{T}_S - \vec{T}_S^T \frac{Q_y}{GI_z} \vec{S}_{hz} - \vec{T}_S^T \frac{Q_z}{GI_y} \vec{S}_{hy} - \vec{T}_S^T \frac{M_{\varpi}}{GI_{\varpi}} \vec{S}_{h\varpi} + \dots; \quad (3.5)$$

тут компоненти векторів  $\vec{S}_{hz}$ ,  $\vec{S}_{hy}$  і  $\vec{S}_{h\varpi}$  обчислюються як:

$$S_{hz,j} = \int_{\ell_{rj}} \frac{S_{oz,j}^{\zeta}(\zeta) d\zeta}{\delta(\zeta)}; \quad S_{hy,j} = \int_{\ell_{rj}} \frac{S_{oy,j}^{\zeta}(\zeta) d\zeta}{\delta(\zeta)}; \quad S_{h\varpi,j} = \int_{\ell_{rj}} \frac{S_{o\varpi,j}^{\zeta}(\zeta) d\zeta}{\delta(\zeta)}.$$

Для кожної точки розгалуження перерізу склалися рівняння рівноваги потоків дотичних напружень (рис. 3). Для загального випадку такі рівняння записувались із використанням матриці інцидентій  $\mathbf{I}$  графа  $\mathbf{G}$ , що відображають топологічну структуру перерізу тонкостінного стержня:

$$2\mathbf{I}' \vec{T}_S + (|\mathbf{I}'| - \mathbf{I}') \left( \frac{Q_y}{I_z} \vec{S}_{z,j} + \frac{Q_z}{I_y} \vec{S}_{y,j} + \frac{M_{\varpi}}{I_{\varpi}} \vec{S}_{\varpi,j} \right) = \mathbf{0}, \quad (3.6)$$

де  $\mathbf{I}'$  – усічена за рахунок останнього рядка матриця інцидентій графа  $\mathbf{G}$  розміром  $(n_v - 1) \times n_r$ ;  $|\mathbf{I}'|$  – матриця, складена з абсолютних величин компонент матриці  $\mathbf{I}'$ ; а компоненти векторів  $\vec{S}_{z,j}$ ,  $\vec{S}_{y,j}$  і  $\vec{S}_{\varpi,j}$  обчислюються як:

$$S_{z,j} = \int_{\ell_{rj}} y^{\zeta}(\zeta) \delta(\zeta) d\zeta; \quad S_{y,j} = \int_{\ell_{rj}} z^{\zeta}(\zeta) \delta(\zeta) d\zeta; \quad S_{\varpi,j} = \int_{\ell_{rj}} \varpi^{\zeta}(\zeta) \delta(\zeta) d\zeta.$$



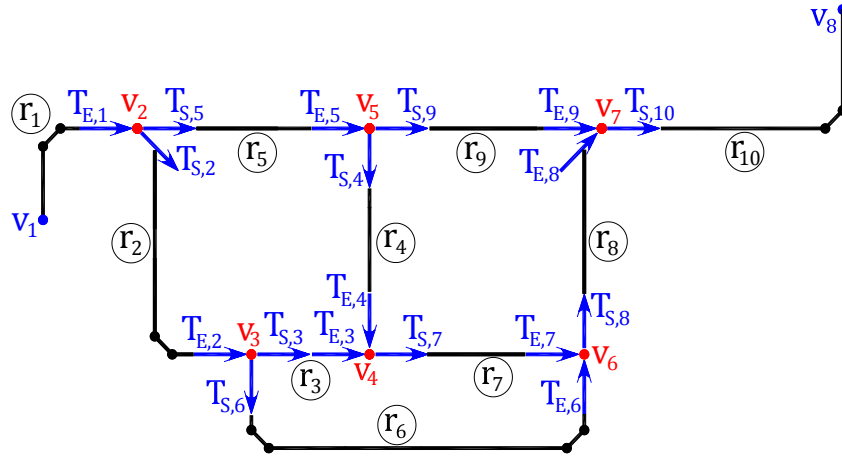


Рис. 3. До складання рівнянь рівноваги потоків дотичних напружень у точках розгалуження перерізу тонкостінного стержня

Склалися також рівняння рівноваги відносно поздовжньої осі стержня як умова статичної еквівалентності крутного моменту, що створюється потоками дотичних напружень, до моменту вільного кручення, що діє у перерізі тонкостінного стержня:

$$M_x - \sum_{j=1}^{n_r} \int_{\ell_j} T_j(\zeta) d\omega = 0, \quad (3.7)$$

або з врахуванням (3.1):

$$\sum_{j=1}^{n_r} T_{S,j} \int_{\ell_j} \rho d\zeta - \frac{Q_y}{I_z} \sum_{j=1}^{n_r} \int_{\ell_j} S_{oz,j} \rho d\zeta - \frac{Q_z}{I_y} \sum_{j=1}^{n_r} \int_{\ell_j} S_{oy,j} \rho d\zeta - \frac{M_{\varpi}}{I_{\varpi}} \sum_{j=1}^{n_r} \int_{\ell_j} S_{o\varpi,j} \rho d\zeta - M_x = 0;$$

або у векторній формі:

$$\vec{\omega}^T \vec{T}_S - \frac{Q_y}{I_z} S_{\rho z} - \frac{Q_z}{I_y} S_{\rho y} - \frac{M_{\varpi}}{I_{\varpi}} S_{\rho\varpi} - M_x = 0. \quad (3.8)$$

$$\text{тут } S_{\rho z} = \sum_{j=1}^{n_r} \int_{\ell_{rj}} S_{oz,j}^{\zeta}(\omega) \rho d\zeta; \quad S_{\rho y} = \sum_{j=1}^{n_r} \int_{\ell_{rj}} S_{oy,j}^{\zeta}(\omega) \rho d\zeta; \quad S_{\rho\varpi} = \sum_{j=1}^{n_r} \int_{\ell_{rj}} S_{o\varpi,j}^{\zeta}(\omega) \rho d\zeta.$$

Сформульована задача представлена як багатопараметрична у вигляді задачі нелінійного програмування, а саме задачі пошуку таких значень невідомих потоків дотичних напружень у початкових точках ділянок перерізу, що не розгалужуються  $\vec{T}_S = \{T_{S,j}\}^T, j = \overline{1, n_r}$ , які забезпечують найменше значення критерію оптимальності – функціоналу Кастильяно  $S$  (3.5) при забезпеченні умов рівноваги (3.6) та (3.8).

Із використанням методу множників Лагранжа сформульована задача зведена до задачі пошуку точки стаціонарності модифікованого функціоналу

$$\Lambda(\vec{T}_S, \vec{\lambda}^T, \lambda_{n_r}):$$

$$\Lambda(\vec{T}_S, \vec{\lambda}^T, \lambda_{n_v}) = \frac{1}{2G} \vec{T}_S^T \mathbf{W} \vec{T}_S - \vec{T}_S^T \frac{Q_y}{GI_z} \vec{S}_{hz} - \vec{T}_S^T \frac{Q_z}{GI_y} \vec{S}_{hy} - \vec{T}_S^T \frac{M_{\varpi}}{GI_{\varpi}} \vec{S}_{h\varpi} +$$

$$+ \vec{\lambda}^T \left[ 2\mathbf{i}'^T \vec{T}_S + (|\mathbf{i}'| - \mathbf{i}') \left( \frac{Q_y}{I_z} \vec{S}_{z,j} + \frac{Q_z}{I_y} \vec{S}_{y,j} + \frac{M_{\varpi}}{I_{\varpi}} \vec{S}_{\varpi,j} \right) \right] +$$

$$+ \lambda_{n_v} \left[ \vec{\omega}^T \vec{T}_S - \frac{Q_y}{I_z} S_{\rho z} - \frac{Q_z}{I_y} S_{\rho y} - \frac{M_{\varpi}}{I_{\varpi}} S_{\rho \varpi} - M_x \right] \rightarrow \min.$$

Умови стаціонарності модифікованого функціоналу дозволили отримати систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих потоків дотичних напружень у початкових точках ділянок перерізу, що не розгалужуються.

Розроблене детальне алгоритмічне забезпечення числового розв'язку сформульованої задачі, орієнтоване на програмну реалізацію в системах автоматизованого проектування тонкостінних стержневих систем. Виконана програмна реалізація запропонованого алгоритму у середовищі програми ТОНУС, що функціонує в складі обчислювального комплексу SCAD Office.

Програма TONUS дозволяє розглядати довільні (у тому числі відкрито-замкнені) поперечні перерізи тонкостінних стержневих елементів (рис. 4). Поперечний переріз тонкостінного стержня формується із сегментів (стрічок) шляхом задавання координат вузлів, що визначають розташування початку та кінця сегментів, а також призначення товщин сегментів.

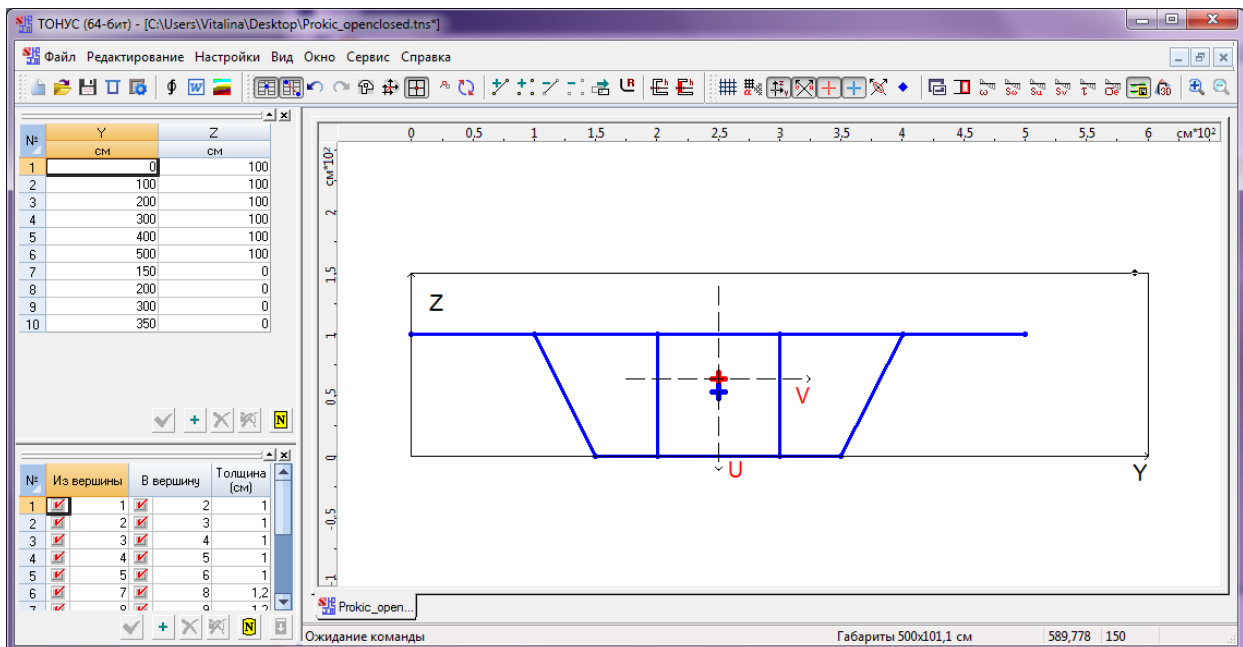


Рис. 4. Головне вікно програми ТОНУС

З метою верифікації розробленого алгоритму та перевірки точності обчислень геометричних характеристик та дотичних напружень, розглянуто приклади розрахунку тонкостінних стержнів відкритого та відкрито-

замкненого багатоконтурного перерізів. На розглянутих прикладах доведена достовірність результатів, отриманих за допомогою розробленого алгоритмічного забезпечення.

У четвертому розділі розглянуто нормативний розрахунок тонкостінних елементів стержневих конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням закритичної роботи стиснутих елементів перерізу. Методика нормативного розрахунку несучої здатності стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи полягає у побудові редукованих поперечних перерізів стержнів, що визначають втрату місцевої стійкості стиснутих елементів перерізу та втрату стійкості форми поперечного перерізу.

На першому етапі (рис. 5, а) виконують розрахунок редукованих ширин стиснутих елементів перерізу, що враховує їх місцеву втрату стійкості. На другому етапі (рис. 5, б) виконують розрахунок редукованих (зменшених) товщин елементів перерізу, що враховує втрату стійкості форми поперечного перерізу (або втрату стійкості внаслідок викривлення перерізу).

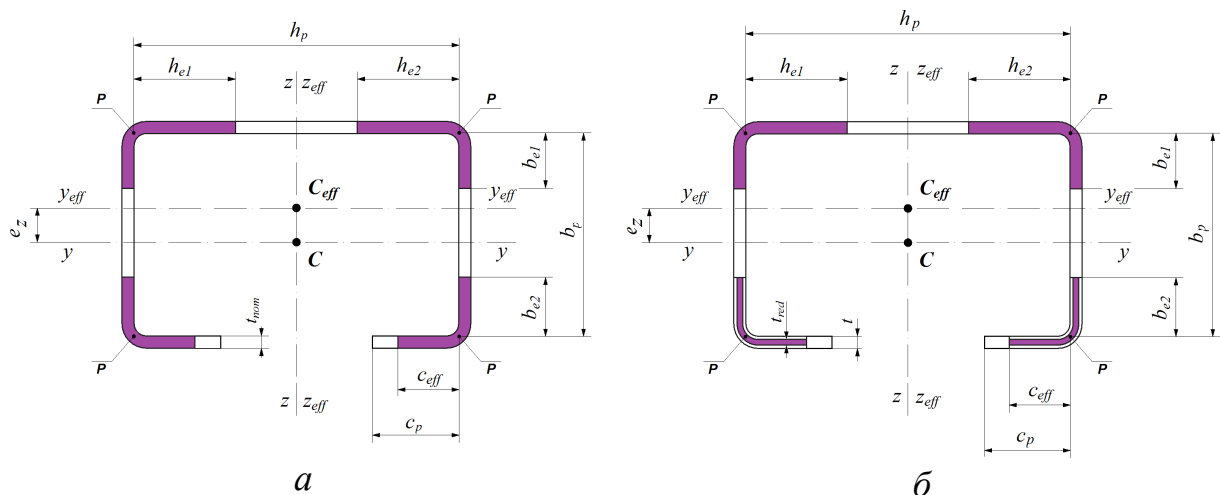


Рис. 5. Двоетапна схема нормативного розрахунку редукованого поперечного перерізу стержневого елементу із С-подібного холодногнутого профілю: а – визначення редукованих ширин стиснутих елементів перерізу; б – визначення редукованих товщин елементів жорсткості.

Поперечний переріз тонкостінного стержня з холодногнутого профілю утворюється і відповідно описується скінченим набором плоских елементів перерізу. У роботі розглядаються: плоский елемент перерізу, підкріплений з обох боків; плоский елемент перерізу, підкріплений з одного боку; плоский елемент перерізу, підкріплений з одного боку та напівпідкріплений з іншого боку за допомогою одинарного чи подвійного відгину.

Для плоских елементів перерізу, підкріплених з обох боків, гнучкість елементу та його редукована ширина визначаються залежно від коефіцієнту стійкості, для якого запропонована апроксимація поліноміальною залежністю від розподілу нормальних напружень за шириною елемента

$$\psi_{jkm} = \Psi(N_{jkm}, M_{y,jkm}, A_j, I_{y,jkm}, b_{p,j}):$$

$$\tilde{\mathbf{k}}_{\sigma 1}(\psi_{h,jkm}) = \sum_{i=0}^6 a_i \psi_{h,jkm}^i = \quad (4.1)$$

$$a_6 \psi_{h,jkm}^6 + a_5 \psi_{h,jkm}^5 + a_4 \psi_{h,jkm}^4 + a_3 \psi_{h,jkm}^3 + a_2 \psi_{h,jkm}^2 + a_1 \psi_{h,jkm} + a_0;$$

де коефіцієнти поліному:

$$a_5 = -0,391179147271941;$$

$$a_6 = -0,0314890667091277;$$

$$a_4 = -1,51390412654064;$$

$$a_3 = -1,71677537020696; \quad a_2 = 7,63960522542266; \quad a_1 = -7,84837320114548;$$

$$a_0 = 7,64132631918665, \text{ залишкова дисперсія } R = 0,99998.$$

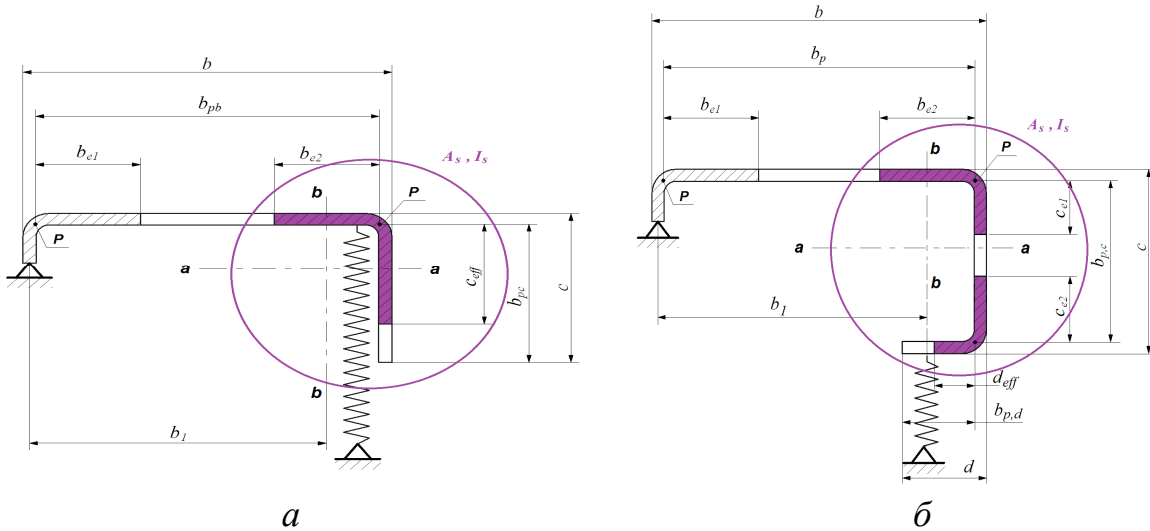


Рис. 6. Елементи жорсткості, що підкріплюють плоский елемент перерізу (полицю): *a* – одинарний відгин ( $b \leq 60t$ ); *б* – подвійний відгини ( $b \leq 90t$ ),  $t$  – товщина профілю.

Для одинарного відгину (рис. 6, *a*), що підкріплює плоский елемент перерізу, гнучкість плоского елемента, його редукована ширина та геометричні характеристики елемента жорсткості визначаються в залежності від коефіцієнту стійкості, для якого запропонована апроксимація поліноміальною залежністю від співвідношення розмірів відгину та полицки, яку він підкріплює, визначену на області варіації значень аргументу  $0,05 < b_{pc,j} / b_{pb,j} \leq 0,6$ :

$$\tilde{\mathbf{k}}_{\sigma c} \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right) = \sum_{i=0}^6 a_i \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right)^i = a_6 \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right)^6 + a_5 \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right)^5 +$$

$$+ a_4 \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right)^4 + a_3 \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right)^3 + a_2 \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right)^2 + a_1 \left( \frac{b_{pc,j}}{b_{pb,j}} \right) + a_0; \quad (4.2)$$

тут коефіцієнти поліному:  $a_6 = 910,227213092148$ ;  $a_5 = -1767,14304974302$ ;  $a_4 = 1298,86943370057$ ;  $a_3 = -449,402084568981$ ;  $a_2 = 76,1019907432876$ ;  $a_1 = -5,89875484033565$ ;  $a_0 = 0,661274391280184$ , залишкова дисперсія  $R = 0,995$ .

Для елементів жорсткості (одинарного або подвійного відгину) (рис. 6, *a* і *б*) понижуючий коефіцієнт, що визначає втрату стійкості форми поперечного перерізу визначається за запропонованою апроксимацією поліноміальною залежністю від гнучкості елемента жорсткості:

$$\begin{aligned} \tilde{\Xi}(\bar{\lambda}_{d,jkm}) = \sum_{i=0}^6 a_i (\bar{\lambda}_{d,jkm})^i = a_6 (\bar{\lambda}_{d,jkm})^6 + a_5 (\bar{\lambda}_{d,jkm})^5 + \\ + a_4 (\bar{\lambda}_{d,jkm})^4 + a_3 (\bar{\lambda}_{d,jkm})^3 + a_2 (\bar{\lambda}_{d,jkm})^2 + a_1 \bar{\lambda}_{d,jkm} + a_0; \end{aligned} \quad (4.3)$$

тут коефіцієнти поліному:  $a_6 = 0,224518105436346$ ;  $a_5 = -1,81140384686515$ ;  $a_4 = 5,45071010301213$ ;  $a_3 = -7,29749759236533$ ;  $a_2 = 3,88283814058589$ ;  $a_1 = -0,731477932171104$ ;  $a_0 = 1,03122861927553$ ; та залишкова дисперсія  $R = 0,999$ .

Методика нормативного розрахунку несучої здатності стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи, яка полягає у побудові редукованих поперечних перерізів стержнів, що визначають втрату місцевої стійкості стиснутих елементів перерізу та втрату стійкості форми поперечного перерізу, адаптована для її використання в складі математичної моделі задачі оптимального проектування досліджуваного класу конструкцій.

**П'ятий розділ** дисертації присвячено розробці математичної моделі задачі оптимального проектування тонкостінних стержневих конструкцій із холодногнутих профілів.

Постановку задачі оптимізації стержневих конструкцій із холодногнутих профілів здійснювали з врахуванням класичних теоретичних міркувань, які використовуються в багатьох задачах будівельної механіки: матеріал конструкції є ідеально пружним, а стержнева система є лінійно-деформованою; зовнішні навантаження, прикладені до стержневої системи, є квазістатичними.

Сформульовані також такі розрахункові передумови:

1) поперечні перерізи стержневих елементів системи не змінюються за їх довжиною;

2) забезпечено підкріплення стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів у розрахункових перерізах, де діє поперечне зосереджене навантаження (опорні реакції);

3) навантаження на стержневі елементи конструкцій прикладається без ексцентриситету по відношенню до центру зсуву їх поперечних перерізів;

4) стержневі елементи конструкції закріплені від горизонтальних переміщень із площини поперечної рами, явище втрати стійкості плоскої форми згину не виникає;

5) міцність монтажних стиків та вузлів з'єднання стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів між собою є забезпеченою.

Сформульованим передумовам відповідає більшість конструктивних рішень поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів.

Задача оптимізації досліджуваного класу конструкцій формулюється як: **при заданих топології стержневої конструкції із холодногнутих профілів, типах поперечних перерізів її елементів, умовах закріплення на опорах та схемі розрахункових навантажень визначити оптимальні параметри геометричної схеми та розміри поперечних перерізів з врахуванням закритичної роботи стержневих елементів, обмежень функціонального об'єму та конструктивних вимог.**

Сформульовану задачу представимо як багатопараметричну у вигляді задачі нелінійного програмування, а саме задачі пошуку таких значень невідомих параметрів системи:

$$\vec{X} = \{X_i\}^T, \quad i = \overline{1, N_X}; \quad (5.1)$$

які забезпечують найменше (або найбільше) значення вибраного (детермінованого) критерію оптимальності:

$$f^* = f(\vec{X}^*) = \min_{\vec{x} \in \mathbf{D}} f(\vec{X}); \quad (5.2)$$

в області допустимих проектних рішень  $\mathbf{D}$ , окресленій системою обмежень-рівностей та обмежень-нерівностей:

$$\Psi(\vec{X}) = \{ \psi_\kappa(\vec{X}) = 0 \mid \kappa = \overline{1, N_{EC}} \}; \quad (5.3)$$

$$\Phi(\vec{X}) = \{ \phi_\eta(\vec{X}) \leq 0 \mid \eta = \overline{N_{EC} + 1, N_{IC}} \}; \quad (5.4)$$

$$\Pi(\vec{X}) = \{ X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \mid i = \overline{N_{EC} + N_{IC} + 1, N_{LUC}} \}; \quad (5.5)$$

де  $\vec{X}$  – вектор змінних проектування (шуканих параметрів конструкції);  $N_X$  – кількість невідомих параметрів системи (змінних проектування);  $\vec{X}^*$  – оптимальний розв'язок задачі;  $f^*$  – найменше значення критерію оптимальності;  $f$ ,  $\psi_\kappa$ ,  $\phi_\eta$ ,  $\pi_i^U$ ,  $\pi_i^L$  – функції векторного аргументу;  $N_{EC}$ ,  $N_{IC}$ ,  $N_{LUC}$  – відповідно кількість обмежень-рівностей  $\psi_\kappa(\vec{X})$ , обмежень-нерівностей  $\phi_\eta(\vec{X})$  та обмежень-нерівностей  $\pi_i(\vec{X})$ , які визначають відповідно гіперплощини та область допустимих проектних рішень у просторі пошуку  $\mathbf{D}$ .

Як компоненти вектору змінних проектування розглянуті: 1) параметри, що задають розташування (координати) вузлів спряження стержневих елементів досліджуваної конструктивної форми  $\vec{X}_G = (\vec{x}_{g,i})^T$  (рис. 7, а), де  $i$  – номер вузла стержневої системи,  $i = \overline{1, NN}$ ,  $NN$  – загальна кількість вузлів стержневої системи; 2) розміри поперечних перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів  $\vec{X}_{CS} = (\vec{x}_{cs,j})^T$  (рис. 7, б),  $j$  – номер стержня стержневої системи,  $j = \overline{1, NB}$ ,  $NB$  – загальна кількість стержнів системи:

$$\vec{X} = (\vec{X}_G, \vec{X}_{CS})^T. \quad (5.6)$$

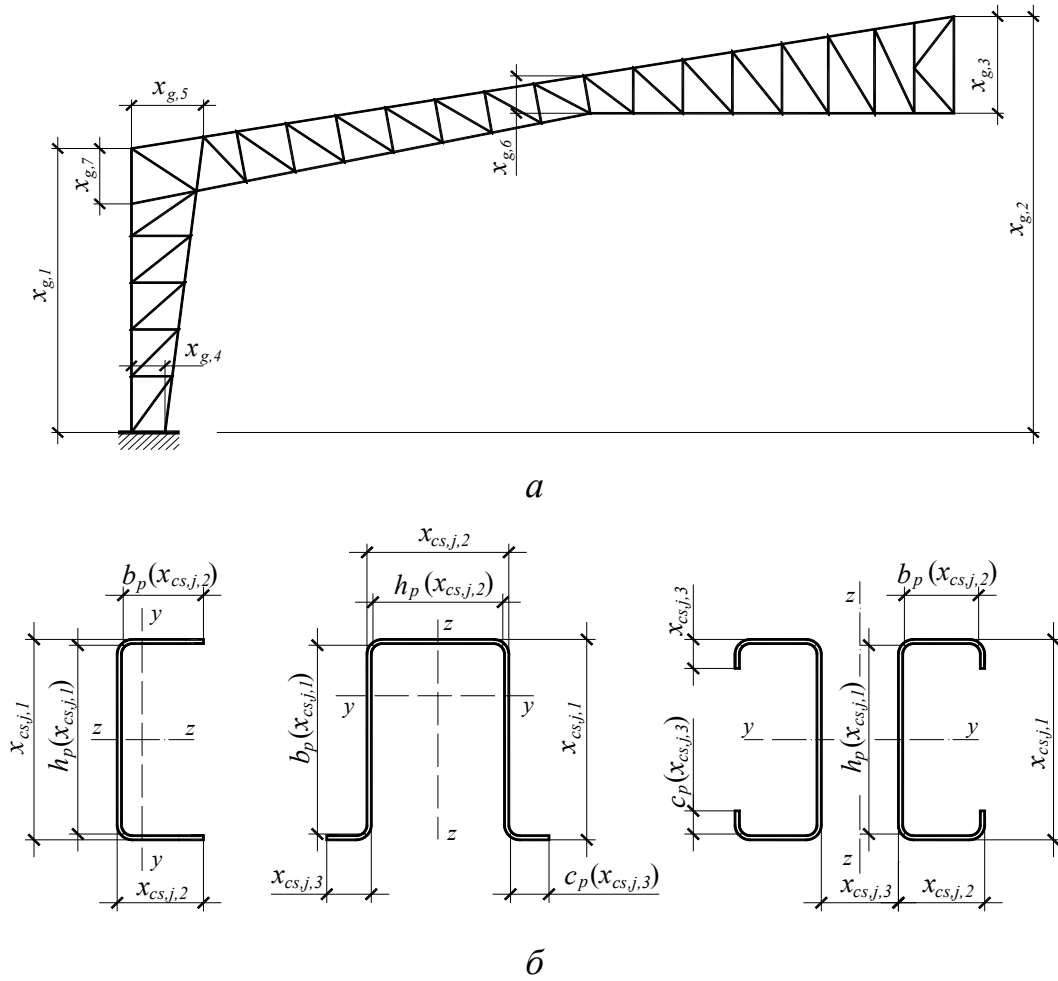


Рис. 7. Змінні проектування задачі пошуку оптимальної конструктивної форми стержневих систем із холодногнутих профілів: *a* – параметри геометричної схеми; *б* – розміри поперечних перерізів стержневих елементів.

В якості *змінних стану* розглянуті розрахункові навантаження, що діють на конструкцію та залежать від змінних параметрів геометричної схеми. Числові значення розрахункових навантажень для першої та другої групи граничних станів представляються за допомогою виразів, що описують їх функціональну залежність від змінних параметрів геометричної схеми  $\vec{X}_G = (\vec{x}_{g,i})^T$  задачі оптимізації.

Внутрішні зусилля в стержневих елементах конструкції із холодногнутих профілів, що використовуються в обмеженнях міцності та стійкості, визначаються з розв'язку системи лінійних рівнянь методу скінченних елементів, сформованих для першої групи граничних станів:

$$\mathbf{K}(\vec{X}_{CS}, \vec{X}_G) \times \vec{z}_{ULS} = \vec{p}_{ULS}(\vec{X}_G), \quad (5.7)$$

де  $\mathbf{K}(\vec{X}_{CS}, \vec{X}_G)$  – матриця жорсткості скінченно-елементної моделі, що залежить від змінних проектування  $\vec{X}$  математичної моделі;  $\vec{p}_{ULS}(\vec{X}_G)$  – вектор-стовпець вузлових сил зовнішнього навантаження для 1-ої групи

граничних станів, що залежить від змінних параметрів геометричної схеми;  
 $\vec{z}_{ULS}$  – вектор-стовпець вузлових переміщень,  $\vec{z}_{ULS} = \mathbf{Z}_{FEM}^{ULS} \left( \vec{X}_G, \vec{X}_{CS} \right)$ .

Переміщення вузлів стержневої системи конструкції із холодногнутих профілів, що використовуються в обмеженнях прогинів та переміщень, визначаються з розв'язку системи лінійних рівнянь методу скінченних елементів, сформованих для другої групи граничних станів:

$$\mathbf{K} \left( \vec{X}_{CS}, \vec{X}_G \right) \times \vec{z}_{SLS} = \vec{p}_{SLS} \left( \vec{X}_G \right), \quad (5.8)$$

де  $\vec{p}_{SLS} \left( \vec{X}_G \right)$  – вектор-стовпець вузлових сил зовнішнього навантаження для 2-ої групи граничних станів;  $\vec{z}_{SLS}$  – вектор-стовпець вузлових переміщень розрахункової схеми стержневої системи на дію розрахункових навантажень 2-ої групи граничних станів,  $\vec{z}_{SLS} = \mathbf{Z}_{FEM}^{SLS} \left( \vec{X}_G, \vec{X}_{CS} \right)$ .

До складу *системи обмежень* залучено умови, що описують перший та другий граничні стани, покладені в основу перевірного розрахунку досліджуваного класу конструкцій та регламентовані будівельними нормами: обмеження міцності при центральному розтягу; обмеження міцності при центральному стискові; обмеження загальної стійкості при центральному стискові, що враховують згинальне, крутильне та згинально-крутильне випучування стержневого елемента; обмеження міцності при одночасній дії поздовжньої сили та згинального моменту; обмеження загальної стійкості при одночасній дії поздовжньої сили стиску та згинального моменту; обмеження міцності та місцевої стійкості при дії поперечних сил; обмеження міцності при одночасній дії поздовжньої сили, згинального моменту та поперечної сили; обмеження прогинів та переміщень.

До складу системи обмежень також залучено додаткові обмеження, які описують: архітектурно-компонувальні вимоги, що відображають функціональне призначення будівлі, обмеження будівельної висоти покриття, а також конструктивні вимоги, що відображають прийняті конструктивні рішення вузлів спряжень стержневих елементів із холодногнутих профілів.

Для оцінки проектних рішень поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів запропоновано *критерій оптимальності*, який відображає ринкову вартість матеріалів для каркасу будівлі у цілому, розрахований на одну поперечну раму та представлений у залежності від змінних проектування  $\vec{X} = \left( \vec{X}_G, \vec{X}_{CS} \right)^T$ :

$$\begin{aligned} C \left( \vec{X}_G, \vec{X}_{CS} \right) = & 1,22 \mathbf{M} \left( \vec{X}_G, \vec{X}_{CS} \right) c_{1,m}^{prof} + \\ & + 1,22 \left( \mathbf{L}_{\Sigma purl}^{roof} \left( \vec{X}_G \right) c_{1,m}^{purl.roof} + \mathbf{L}_{\Sigma purl}^{wall} \left( \vec{X}_G \right) c_{1,m}^{purl.wall} \right) + \\ & + 1,21 \left( \mathbf{S}_{\Sigma sheet}^{roof} \left( \vec{X}_G \right) c_{1,m}^{sheet.roof} + \mathbf{S}_{\Sigma sheet}^{wall} \left( \vec{X}_G \right) c_{1,m}^{sheet.wall} \right) \rightarrow \min ; \end{aligned} \quad (5.9)$$

тут  $c_{1,m}^{prof}$  – вартість одиниці маси несучих елементів поперечних рам, тис. грн./Т;  $c_{1,m}^{purl.roof}$  і  $c_{1,m}^{purl.wall}$  – вартості одиниці довжини елементів каркасу



фахверку (стінових та покрівельних прогонів), тис. грн./м;  $c_{1,m}^{sheet.roof}$  і  $c_{1,m}^{sheet.wall}$  – вартості одиниці площі профільованого настилу для огороження стін та покрівлі, тис. грн./м<sup>2</sup>;  $S_{\Sigma sheet}^{roof}$  і  $S_{\Sigma sheet}^{wall}$  – загальна площа покрівельного та стінового профільованого настилу, розрахована на одну поперечну раму, м<sup>2</sup>;  $L_{\Sigma purl}^{roof}$  і  $L_{\Sigma purl}^{wall}$  – загальна довжина прогонів покрівельного та стінового фахверку, м;  $M(\vec{X}_G, \vec{X}_{CS})$  – вага поперечної рами, т:

$$M(\vec{X}_G, \vec{X}_{CS}) = \varphi \rho \sum_{j=1}^{NB} A_{g,j}(\vec{X}_{CS}) \ell_j(\vec{X}_G). \quad (5.10)$$

Для поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів розроблена нова математично і механічно коректна модель задачі оптимального проектування при змінних параметрах геометричної схеми та розмірах поперечних перерізів, що враховує закритичну роботу стержневих елементів, обмеження функціонального об'єму та конструктивні вимоги.

В рамках розробленої математичної моделі вперше побудовано область несучої здатності  $\Omega_s$  стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів, що враховують усі вимоги будівельних норм для першої групи граничних станів (рис. 8).

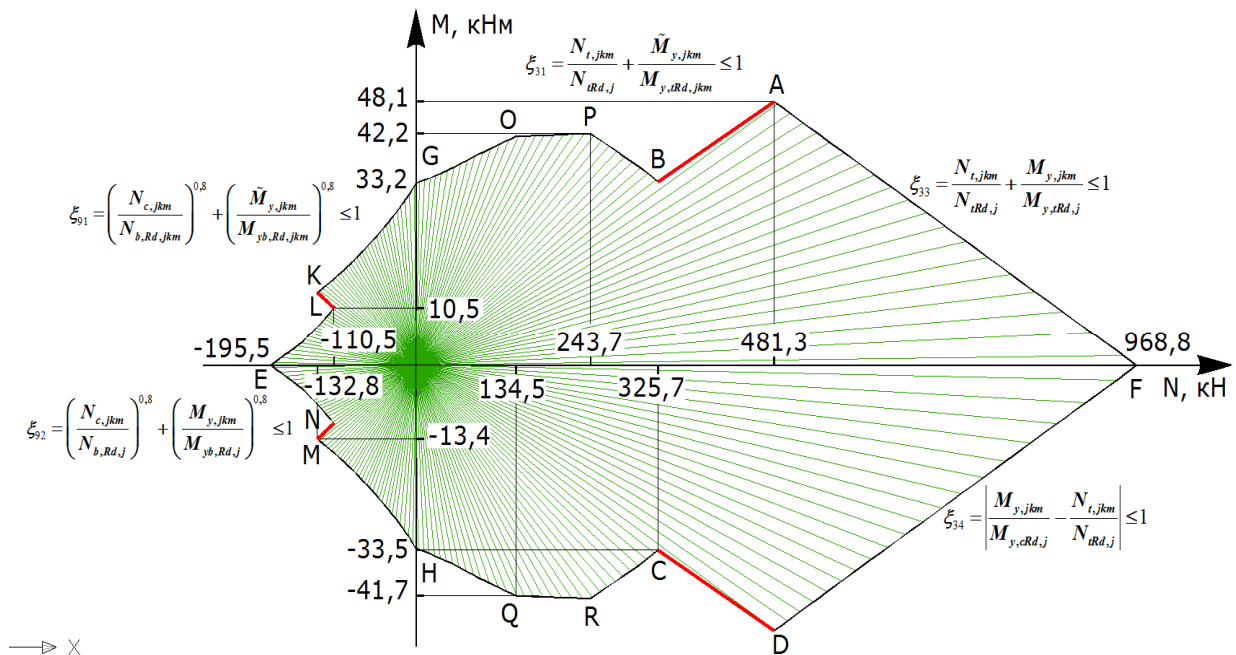


Рис. 8. Ортогональна проекція області несучої здатності  $\Omega_s$  складеного перерізу із двох холодногнутих швелерних профілів в координатній системі «поздовжнє зусилля  $N$  – згинальний момент  $M$ »

Побудована область дозволяє дослідити область пошуку оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів. Аналіз області несучої здатності для перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів засвідчив її невивуклість, пов'язану із стрибкоподібним зменшення несучої здатності перерізів у випадках, коли

вони переходять до закритичної стадії роботи, яка характеризується настанням явища втрати місцевої стійкості елементів перерізу та/або втрати стійкості форми перерізу. Стрибкоподібне зменшення несучої здатності перерізів спостерігається також при коригуванні розрахункових згинальних моментів за рахунок зміщення центру ваги редукованого поперечного перерізу по відношенню до центру ваги поперечного перерізу бруто.

Виконані дослідження засвідчили, що область пошуку оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів, яка описується системою обмежень розробленої математичної моделі, не є гладкою. Окремі її підобласті утворені різним набором обмежень, перехід між якими призводить до стрибкоподібної зміни несучої здатності перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів.

Для параметричної оптимізації поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів в якості ефективного методу розв'язку запропоновано генетичні алгоритми, які реалізують цілеспрямований перебір скінченної множини варіантів проектних рішень та дозволяють врахувати особливості області пошуку оптимальних проектних рішень досліджуваного класу конструкцій.

**Шостий розділ** роботи присвячено розробці методів та алгоритмів пошуку оптимальних проектних рішень тонкостінних стержневих конструкцій із холодногнутих профілів.

Для розв'язання сформульованої задачі оптимізації за допомогою генетичних алгоритмів запропоновано спосіб кодування будь-якого проектного рішення конструкції  $\vec{X}_k \in \Xi^{N_K}$  у вигляді лінійної послідовності рядків  $\mathbf{B}_k \in \Theta^{N_K}$ , які формують скінчену множину бінарних представлень  $\Theta^{N_K} = \left\{ \mathbf{B}_k = \left( \beta_{i,k} \mid i_k = \overline{1, N_{X,K}} \right) \mid k = \overline{1, N_K} \right\}$  досліджуваного класу конструкцій:

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{e}(\vec{X}_k), \quad (6.1)$$

тут  $\Xi^{N_K}$  – скінченна множина варіантів проектних рішень конструкції  $\Xi^{N_K} = \left\{ \vec{X}_k = \left( X_{i,k} \mid i_k = \overline{1, N_{X,K}} \right) \mid k = \overline{1, N_K} \right\}$ , де  $N_K$  – кількість варіантів,  $N_{X,K}$  – кількість змінних проектування для відповідного варіанту проектного рішення.

Розроблена функція оцінки кодованих проектних рішень  $\mu(\mathbf{B}_k)$ , що визначає показник якості рядка  $\mathbf{B}_k$ , яка у випадку критеріальної мінімізації (5.2) записується як:

$$\mu(\mathbf{B}_k) = -\zeta \cdot f(\vec{X}_k); \quad (6.2)$$

тут  $\zeta$  – штрафний множник, за допомогою якого враховуються порушені обмеження задачі оптимізації у формі рівностей (5.3) та нерівностей (5.4):

$$\zeta = \prod_{\kappa=1}^{N_{EC}} (1 + V_{\kappa})^{o_{\kappa}} \times \prod_{\eta=1}^{N_{IC}} (1 + V_{\eta})^{o_{\eta}}, \quad (6.3)$$

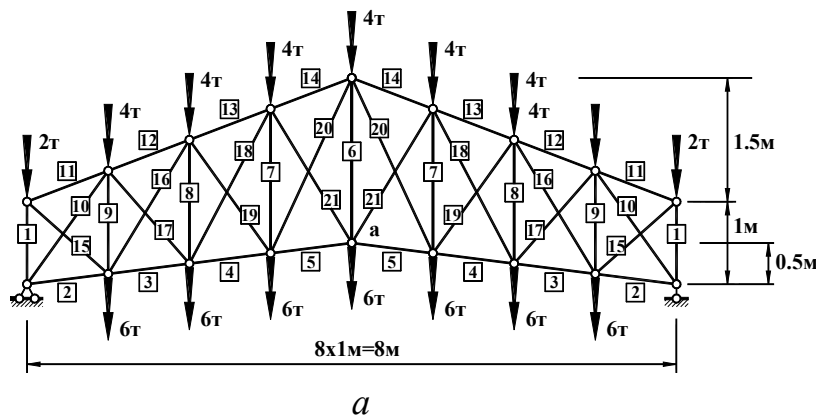
де  $o$  – порядок, за допомогою якого задається пріоритет обмеження;  $V_{\kappa}$ ,  $V_{\eta}$  –

числові значення нев'язок в обмеженнях типу (5.3) і (5.4) відповідно:  
 $V_{\kappa} = |\psi_{\kappa}(\vec{X})|$ ,  $V_{\eta} = \langle \phi_{\eta}(\vec{X}) \rangle$ , де кутові дужки  $\langle \rangle$  визначають оператор зрізки:

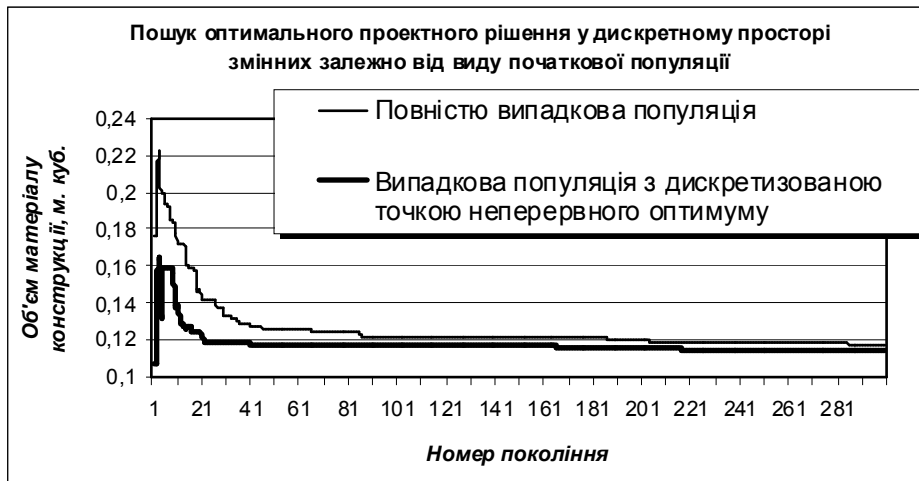
$$\langle \phi_{\eta}(\vec{X}) \rangle = \begin{cases} 0, & \text{при } \phi_{\eta}(\vec{X}) \leq 0; \\ \phi_{\eta}(\vec{X}), & \text{при } \phi_{\eta}(\vec{X}) > 0. \end{cases} \quad (6.4)$$

Це дозволило застосувати еволюційні методи оптимізації, що формалізуються за допомогою генетичних алгоритмів, для розв'язку задачі оптимального проектування досліджуваного класу конструкцій у системах їх автоматизованого проектування.

Запропонована модифікація генетичного алгоритму шляхом його гібридизації із застосуванням методу проєкції градієнта функції мети на поверхню активних обмежень з одночасною ліквідацією порушених обмежень. Наприкінці кожної ітерації найкраща особина популяції (проектне рішення конструкції, закодоване символьним рядком найкращої особини) уточнюється відповідно до методології пошуку, що описується проєкційно-градієнтним методом.



а



б

Рис. 9.  
 Дослідження зміни критерію оптимальності в процесі пошуку оптимального рішення:  
 а – розрахункова схема конструкції;  
 б – графік залежності критерію оптимальності.

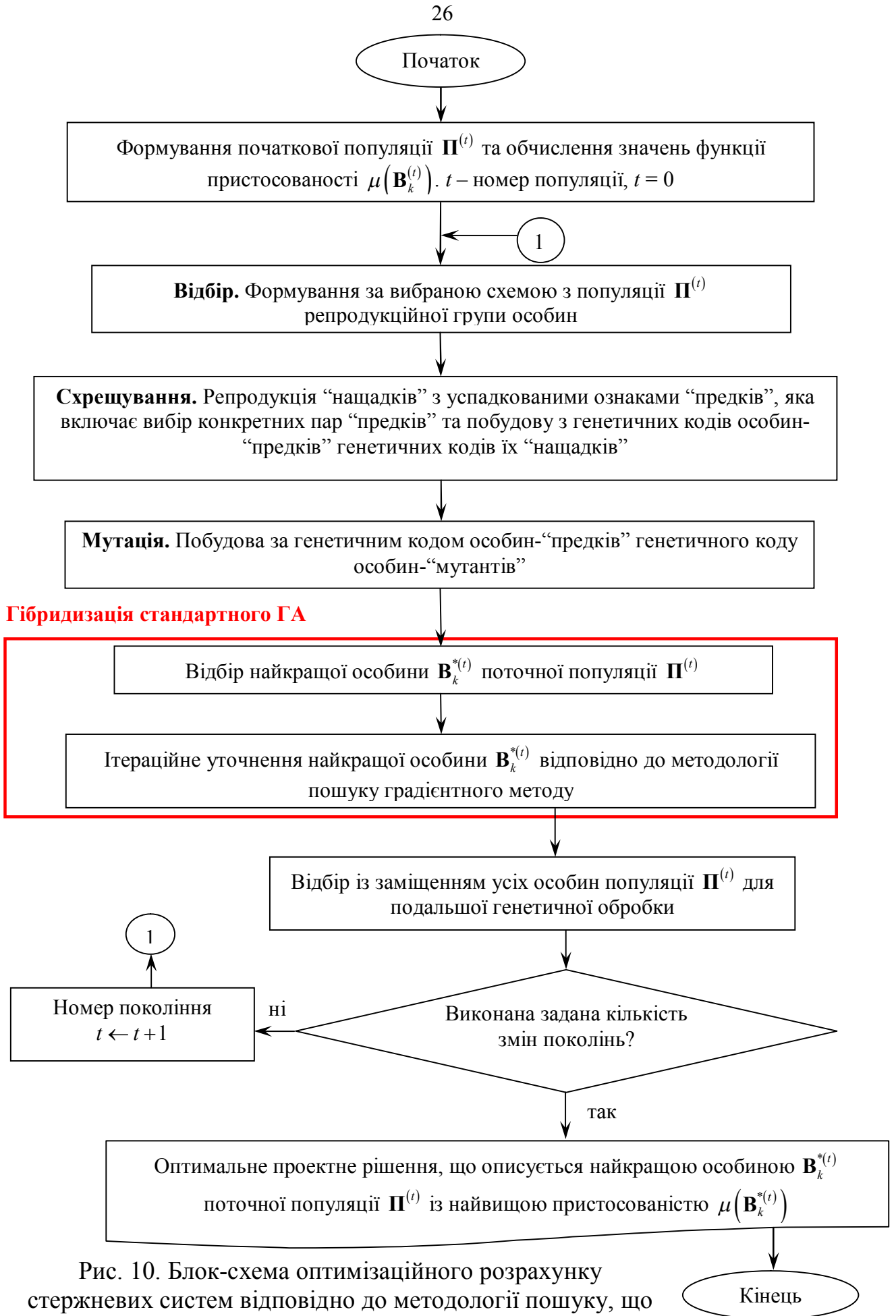


Рис. 10. Блок-схема оптимізаційного розрахунку стержневих систем відповідно до методології пошуку, що описується гібридним генетичним алгоритмом.

Алгоритми кодування змінних проектування та стандартний і гібридний генетичні алгоритми залучено до програмного забезпечення OptCAD, призначеного для оптимального проектування металевих стержневих систем. Виконана апробація запропонованого гібридного генетичного алгоритму на тестових задачах оптимізації стержневих металевих систем зі змінними проектування неперервного та дискретного типів (рис. 9, а). На числових прикладах доведено, що запропонована модифікація стандартного генетичного алгоритму підвищує обчислювальну ефективність алгоритму оптимізації, розробленого на його основі, за рахунок пришвидшення збіжності ітераційного процесу та підвищення точності отриманого оптимуму (рис. 9, б).

Таким чином, побудовано новий ефективний алгоритм пошуку оптимальної конструктивної форми поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів з оптимізацією параметрів геометричної схеми та розмірів поперечних перерізів з врахуванням закритичної роботи стержневих елементів, обмежень функціонального об'єму та конструктивних вимог. При цьому в якості змінних стану розглянуті розрахункові навантаження, що діють на конструкцію та залежать від змінних параметрів геометричної схеми.

Блок-схема оптимізаційного розрахунку тонкостінних стержневих систем із холодногнутих профілів відповідно до методології пошуку, що описується гібридним генетичним алгоритмом, представлена на рис. 10.

**Сьомий розділ** дисертаційної роботи присвячений розробці нових ефективних конструкцій та закономірностей формоутворення оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів.

В рамках запропонованої пошукової методології розглянута задача пошуку оптимальних розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профілю (рис. 11). З огляду на особливості розрахунку та конструювання, а також з врахуванням практичного попиту, задача параметричної оптимізації розмірів поперечних перерізів холодногнутих профілів формулювалась як: при заданих ширині та товщині заготовки (штрипси) для виготовлення холодногнутого профілю, а також типі поперечного перерізу визначити його оптимальні розміри з врахуванням закритичної роботи та конструктивних вимог.

Задача оптимізації розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профілю формулюється як: при заданих ширині та товщині заготовки (штрипси) для виготовлення холодногнутого профілю визначити його оптимальні розміри, які забезпечують найбільше значення критерію оптимальності в області допустимих рішень, окресленій системою обмежень-нерівностей.

В якості змінних проектування (5.1) приймалися габаритні розміри С-подібного холодногнутого профілю: висота стінки, ширина полиці та довжина відгину.

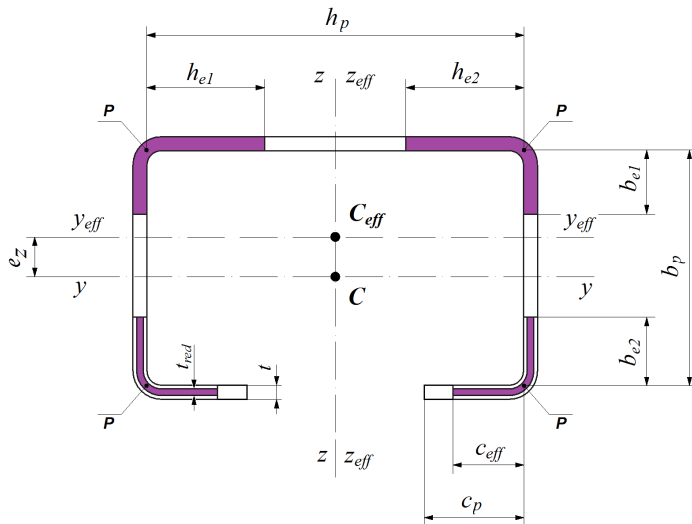


Рис. 11. До задачі оптимізації розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профілю

Вихідними даними для оптимізаційного розрахунку служили товщина профілю та внутрішній радіус спряження елементів перерізу; базова межа текучості та модуль пружності сталі, а також розрахункові довжини стержневого елемента, що відповідають втраті загальної стійкості за згинальними та крутильно формами випучування.

Як критерій оптимальності (5.2) розглянуто критерій максимізації несучої здатності профілю на втрату загальної стійкості при центральному стиску, представлений у формі лінійної згортки несучих здатностей, що враховують згинальне, крутильне та згинально-крутильне випучування стержневого елемента, визначені відповідно до вимог ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 та ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012.

До системи обмежень (5.4) сформульованої задачі залучено обмеження на периметр профілю; обмеження, що відображають вимоги ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 щодо граничної гнучкості елементів перерізу С-подібного холодногнутого профілю, полиці якого підкріплені одинарними відгинами; а також обмеження на мінімальний просвіт між торцями відгинів, обумовлений необхідністю забезпечення доступу до внутрішньої поверхні профілю (наприклад, з метою організації болтового з'єднання по полицкам профілю).

Сформульована задача параметричної оптимізації вирішена в рамках запропонованої пошукової методології із застосуванням програми OptCAD, що дозволило реалізувати пошук оптимальних розмірів поперечних перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням місцевої втрати стійкості елементів перерізу (поличок та стінки) та втрати стійкості форми перерізу.

В результаті оптимізаційного розрахунку отримані С-подібні холодногнуті профілі, які характеризуються більшою несучою здатністю порівняно з холодногнутими профілями вітчизняних виробників холодногнутих профілів (групи компаній «Blachy Pruszyński», компаній БФ ЗАВОД та STEELCO) при одній і тій самій ширині заготовки (штрипси). Так, наприклад, при одній і тій самій ширині заготовки розміром 25,8 см отримано С-подібний холодногнутий профіль з оптимальними розмірами  $h = 8,914$  см,  $b = 6,171$  см,  $c = 2,272$  см або  $88 \times 62 \times 23 \times 1,5$ , який

характеризується несучою здатністю  $N_{b,Rd,min} = N_{bTF,Rd} = 8,093$  кН, що на 9,67% більша, за несучу здатність  $N_{b,Rd,min} = N_{bTF,Rd} = 7,373$  кН вихідного профілю з розмірами  $100 \times 60 \times 19 \times 1,5$ , який виготовляється компанією «Blachy Pruszyński», тут  $N_{bTF,Rd}$  – несуча здатність профілю на втрату стійкості за згинально-крутильною формою випучування.

Усі оптимальні рішення поперечних перерізів С-подібних холодногнутих профілів, що перебувають в умовах центрального стиску, працюють у закритичній стадії, що характеризується явищем втрати місцевої стійкості стінки, втрати місцевої стійкості полицки профілю, а також втратою стійкості форми поперечного перерізу при забезпеченні місцевої стійкості одинарного відгину. Для всіх оптимальних рішень поперечних перерізів С-подібного холодногнутого профілю є визначальною несуча здатність на втрату стійкості за згинально-крутильною формою.

Вперше виявлено, що розмір одинарного відгину чинить визначальну роль на несучу здатність перерізу С-подібного холодногнутого профілю. У всіх оптимальних проектних рішеннях оптимальний розмір одинарного відгину був більшим, порівняно до розмірів відгинів С-подібних холодногнутих профілів, що виготовляються компаніями-виробниками «STEELCO», «БФ ЗАВОД» та групою компаній «Blachy Pruszyński». При цьому явище втрати місцевої стійкості одинарного відгину у всіх оптимальних рішеннях було відсутнім. Це дозволяє обґрунтовано рекомендувати призначати розміри одинарних відгинів з умови забезпечення відсутності явища втрати його місцевої стійкості.

При зменшенні розміру необхідного просвіту між торцями відгинів з умови забезпечення необхідного доступу до внутрішньої поверхні профілю несуча здатність профілю збільшується.

Таким чином, результати оптимізаційних розрахунків дозволили розробити рекомендації стосовно оптимального розподілу матеріалу в перерізах несучих елементів досліджуваного класу конструкцій та служать базою для створення ефективних національних сортamentів стандартних гнутих профілів.

У подальшому сформульована і розв'язана задача пошуку оптимальної конструктивної форми великопрольотної поперечної рами каркасу будівлі із холодногнутих профілів та виявлена техніко-економічна ефективність отриманого оптимального проектного рішення (рис. 12).

Змінними параметрами геометричної схеми були обрані висота будівлі у карнизному та гребеновому вузлах, відстань між поясами ригеля у гребеновому вузлі, у чверті прольоту та у карнизному вузлі, відстань між поясами колони в опорному та карнизному вузлах рами (рис. 13). Як змінні проектування також розглядалися розміри поперечних перерізів стержневих елементів поперечної рами для кожного типу жорсткості.

Критерієм оптимізації було розглянуто мінімум ринкової вартості матеріалів для каркасу будівлі у цілому. При цьому, вартості одиниці маси несучих елементів із холодногнутих профілів, одиниці площі стінового та покрівельного профільованого настилів та одиниці довжини стінових та

покрівельних прогонів приймалися усередненими в цінах 2018 р. серед підприємств-виробників холодногнутих профілів по Україні.



Рис. 12. Поперечна рама каркасу будівлі із тонкостінних холодногнутих профілів

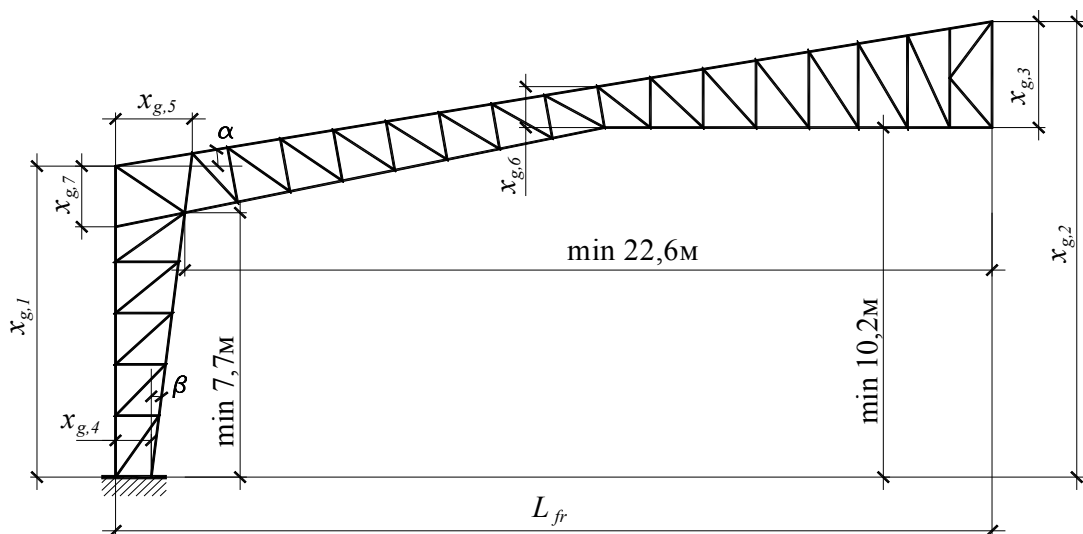


Рис. 13. Розрахункова схема поперечної рами із холодногнутих профілів із змінними параметрами геометричної схеми та зазначенням обмежень функціонального об'єму будівлі

Усі отримані оптимальні проектні рішення поперечної рами із холодногнутих профілів характеризуються більшими відмітками карнизних та гребневих вузлів (близько 6,6%). Отримана оптимальна геометрична схема (рис. 14, 15) відрізняється від вихідного проектного рішення непаралельністю поясів ригеля у чвертях прольоту, а також більшою відстанню між поясами наскрізних елементів у карнизних та опорних вузлах рами та меншою відстанню між поясами ригеля у гребневому вузлі, що



відповідає оптимальному розподілу згинальних моментів по довжині наскрізних елементів.

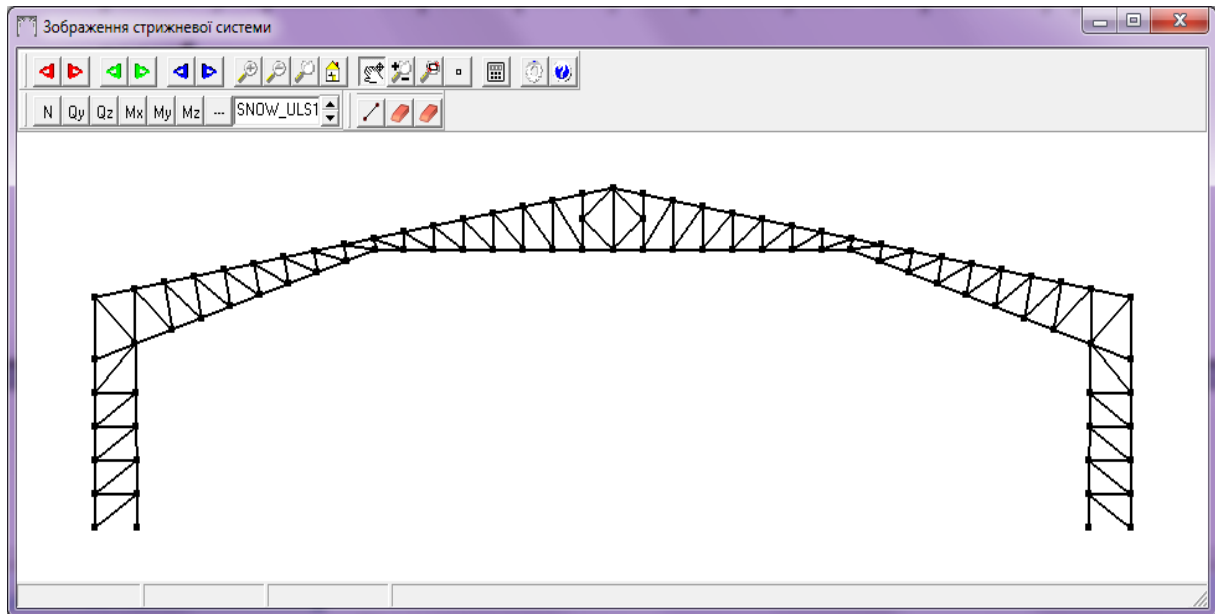


Рис. 14. Результати оптимізаційного розрахунку (графічне представлення в інтерфейсі програми OptCAD).

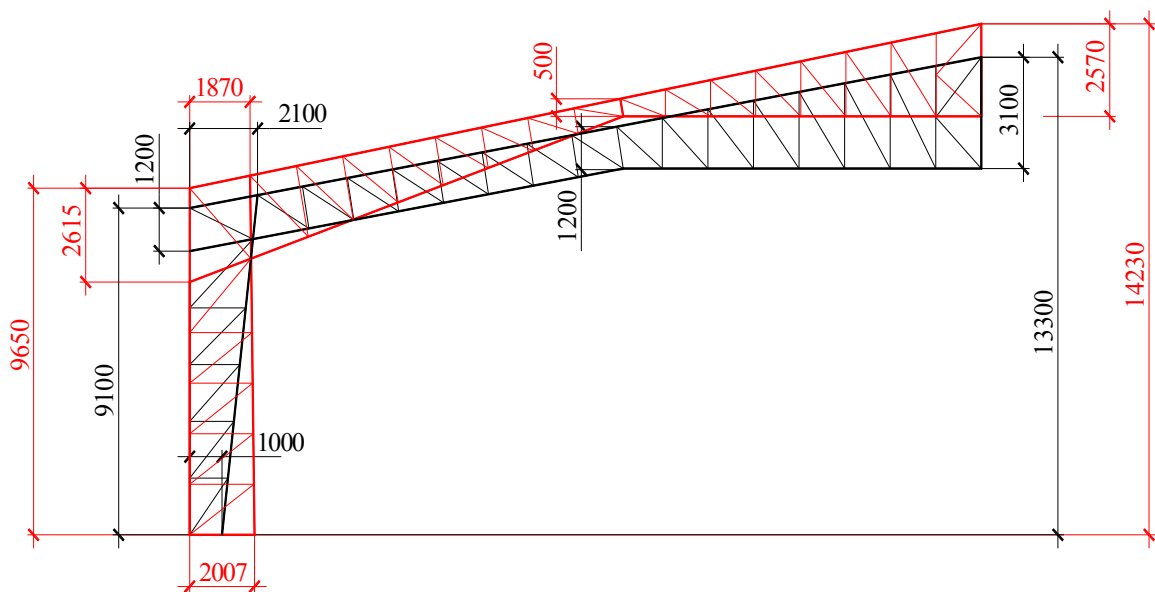


Рис. 15. Результати оптимізаційного розрахунку (червоним кольором показані оптимальні параметри геометричної схеми, чорним – геометричні параметри, що відповідають вихідному проектному рішенню).

У випадку, коли з прийнятих умов проектування обмежувалась відстань між поясами наскрізної колони в опорному перерізі (наприклад, при слабких ґрунтах), оптимальна геометрична схема поперечної рами характеризується суттєво більшою (на 14,4%) відстанню між поясами ригеля у гребеневому вузлі рами (рис. 16).

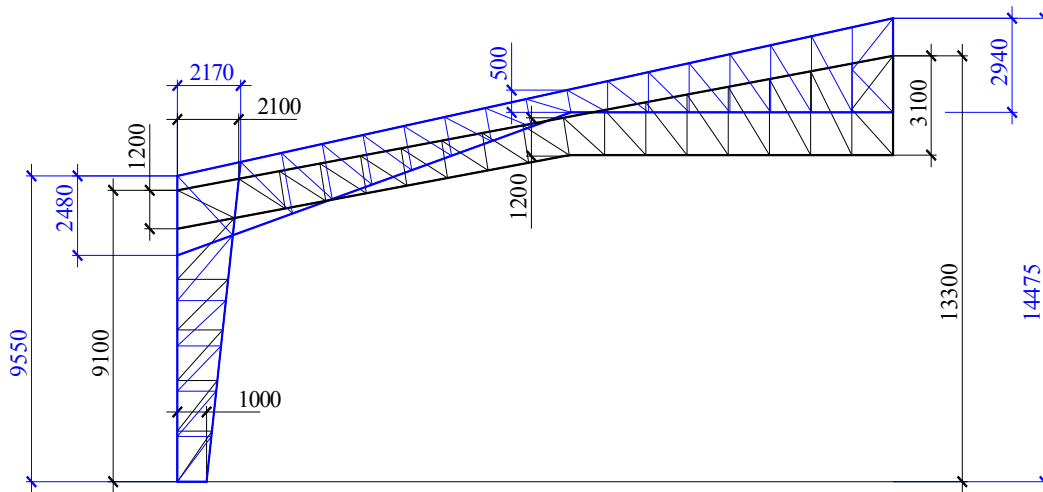


Рис. 16. Результати оптимізаційного розрахунку з врахуванням обмеження висоти опорного перерізу колони: (синім кольором показані оптимальні параметри геометричної схеми, чорним – геометричні параметри, що відповідають вихідному проектному рішенняю).

Досліджено вплив вибору критерію оптимальності, вплив функціонального призначення будівлі та ринкової ціни утеплювача на оптимальні параметри геометричної схеми поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів. Як результат виконаних досліджень виявлені нові закономірності формоутворення оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна науково-технічна проблема створення оптимальних конструктивних форм легких поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи, що відкриває шлях до зниження матеріаломісткості, енерго- та ресурсозбереження і має важливе народногосподарське значення.

Основні результати, що отримані в дисертаційній роботі, такі:

1. Виконані числові дослідження, присвячені оцінці депланацій перерізів, що примикають до вузлів, та розподілу депланацій та бімоментів у тонкостінних стержневих системах. Виявлено суттєвий вплив конструктивного рішення вузлів та схеми навантаження на розподіл депланацій та бімоментів у тонкостінних стержневих системах, а також співвідношення депланацій у перерізах тонкостінних стержневих елементів, що примикають до вузла.

2. Обґрунтована необхідність використання методики скінченно-елементного аналізу тонкостінних стержневих систем, яка за своєю суттю представляє аналог суперелементного моделювання, що забезпечує

виконання геометричних гіпотез про поведінку торцевого перерізу тонкостінного стержня.

3. Для тонкостінного стержня довільного перерізу розроблений детальний алгоритм числового розв'язку задачі пошуку потоків дотичних напружень, які забезпечують найменше значення функціоналу Кастільяно при задоволенні обмежень рівноваги потоків у точках розгалуження перерізу, а також при задоволенні рівняння рівноваги усього перерізу тонкостінного стержня відносно поздовжньої осі. Виконана програмна реалізація запропонованого алгоритму та доведена достовірність результатів, отриманих за допомогою запропонованого алгоритму.

4. Методика нормативного розрахунку несучої здатності стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи, яка полягає у побудові редукованих поперечних перерізів стержнів, що визначають втрату місцевої стійкості стиснутих елементів перерізу та втрату стійкості форми поперечного перерізу, адаптована для її використання в складі математичної моделі задачі оптимального проектування досліджуваного класу конструкцій.

5. Для поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів розроблена нова математично і механічно коректна модель задачі оптимального проектування при змінних параметрах геометричної схеми та розмірах поперечних перерізів, що враховує закритичну роботу стержневих елементів, обмеження функціонального об'єму та конструктивні вимоги.

6. Вперше побудовано область несучої здатності поперечних перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням їх закритичної роботи. Виконані дослідження області дозволили виявити раніше не відому поведінку її границь, що характеризується стрибкоподібною зміною несучої здатності при переході до закритичної стадії роботи.

7. Запропоновано ефективні методи розв'язку сформульованої задачі параметричної оптимізації поперечних рам каркасів із холодногнутих профілів – еволюційні методи, які реалізують цілеспрямований перебір скінченної множини варіантів проектних рішень та дозволяють врахувати особливості області пошуку оптимальних проектних рішень досліджуваного класу конструкцій.

8. Побудовано новий ефективний алгоритм пошуку оптимальної конструктивної форми поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів з оптимізацією параметрів геометричної схеми та розмірів поперечних перерізів з врахуванням закритичної роботи стержневих елементів, обмежень функціонального об'єму та конструктивних вимог. Розроблена модифікація стандартного генетичного алгоритму підвищує обчислювальну ефективність алгоритму за рахунок пришвидшення збіжності ітераційного процесу та підвищення точності оптимуму.

9. Реалізований пошук оптимальних розмірів поперечних перерізів стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів з врахуванням

їх закритичної роботи. Результати оптимізаційних розрахунків дозволили розробити рекомендації стосовно оптимального розподілу матеріалу в перерізах несучих елементів досліджуваного класу конструкцій та служать базою для створення ефективних національних сортаментів стандартних гнутих профілів.

10. Сформульовані і розв'язані задачі пошуку оптимальної конструктивної форми поперечних рам каркасів будівель із холодногнутих профілів та виявлена їх техніко-економічна ефективність. В рамках запропонованої пошукової методології виявлені нові закономірності формоутворення оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### а) монографії:

1. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций / [Пермяков В. А., Перельмутер А. В., Юрченко В. В.] – К.: ТОВ «Издательство «Сталь», 2008. – 538 с.: ил.
2. SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах / [В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, М. А. Микитаренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, В. Г. Федоровский, В. В. Юрченко] – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2018. – 576 с.

### б) статті в наукових фахових виданнях України:

3. Пермяков В. О. Оптимальне проектування металевих стержневих конструкцій на базі гібридного генетичного алгоритму / В. О. Пермяков, В. В. Юрченко, І. Д. Пелешко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Ч. 2. – Вип. 16. – Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування, 2008. – С. 303 – 310.
4. Пелешко І. Д. Оптимізація топології металевих стержневих конструкцій (огляд праць) / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // «Современные строительные конструкции из металла и древесины». Сборник научных трудов / ОГАСА. – Ч.1 – Одесса, ООО «Внешрекламсервис», 2008. – С. 229 – 234.
5. Пелешко І. Д. Оптимальне проектування металевих конструкцій на сучасному етапі (огляд праць) / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // Металеві конструкції. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 13–21.
6. Оптимальне проектування двохшарових поперечних рам з елементами наскрізного перерізу для критого складу зі збереження технічної сірки / І. Д. Пелешко, М. М. Пальчик, В. В. Юрченко, М. А. Біляєв // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського / Під заг. ред. О. В. Шимановського. – Випуск 3, 2009. – К.: Вид-во «Сталь», 2009. – С. 55 – 70.

7. Випробування конструкції ферми із гнутих тонкостінних елементів відкритого профілю / І. Д. Белов, О. Б. Глітін, В. В. Юрченко [та ін.] // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського / Під заг. ред. О. В. Шимановського. – Випуск 3, 2009. – К.: Вид-во «Сталь», 2009. – С. 136 – 145.
8. Пелешко І. Д. Удосконалення математичної моделі стрижневих металевих конструкцій для систем автоматизованого проектування / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко, Ю. Є. Ковальчук // Вісник ДонНАБА. – Макіївка, 2009. – Вип. 4 (78): Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 155 – 160.
9. Оптимальне проектування поперечних рам каркасу критого складу для збереження технічної сірки / І. Д. Пелешко, М. М. Пальчик, В. В. Юрченко, М. А. Біляєв // Металеві конструкції. – 2009. – Т. 15, № 3. – УАМК, ДонНАБіА. – С. 189 – 200.
10. Белов І. Д. Розробка та впровадження ефективних конструкцій будівель із тонкостінних холодногнутих профілів: сучасний стан проблеми та програма досліджень / І. Д. Белов, В. В. Юрченко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 20. – Рівне, 2010. – С. 364 – 369.
11. Перельмутер А. В. Проектирование болтовых фланцевых соединений согласно EuroCode и украинским нормам: согласованность и противоречия / А. В. Перельмутер, Э. З. Криксунов, В. В. Юрченко // Металеві конструкції, т. 16. – 2010. – № 2. – УАМК, ДонНАБіА. – С. 93 – 104.
12. Белов І. Д. Про перевірку стійкості центрально-стиснутих стержнів з одиночних тонкостінних холодногнутих профілів відкритого перерізу / І. Д. Белов, В. В. Юрченко // Металеві конструкції, т. 16. – 2010. – № 4. – УАМК, ДонНАБіА. – С. 239 – 250.
13. Юрченко В. В. Розробка аналітичних залежностей для оцінки значень критичних сил втрати місцевої стійкості та втрати стійкості форми перерізу тонкостінних стержнів відкритого профілю / В. В. Юрченко // Металеві конструкції, т. 18. – 2012. – № 3. – УАМК, ДонНАБіА. – С. 185 – 196.
14. Юрченко В. В. Дослідження втрати місцевої стійкості та втрати стійкості форми перерізу тонкостінних стержнів відкритого профілю / В. В. Юрченко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 25. – Рівне, 2013. – С. 488 – 499.
15. Пелешко І. Д. Змінні проектування для формулювання задач оптимізації топології стрижневих конструкцій / І. Д. Пелешко, В. М. Іванейко, В. В. Юрченко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки. – Рівне, 2013. – №3(63). – С. 365 – 373.
16. Перельмутер А. В. До питання розрахунку просторових конструкцій із тонкостінних стрижнів відкритого профілю / А. В. Перельмутер,

- В. В. Юрченко // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського / Під заг. ред. О. В. Шимановського. – К.: Вид-во «Сталь», 2014. – Вип. 13. – С. 12 – 26.
17. Perelmuter A. On the Issue of Structural Analysis of Spatial Systems from Thin-Walled Bars with Open Profiles / A. Perelmuter, V. Yurchenko // *Металеві конструкції*, т. 20. – 2014. – № 3. – УАМК, ДонНАБіА. – С. 179 – 190.
  18. Юрченко В. В. Розподіл потоків дотичних зусиль вздовж замкнених контурів перерізу тонкостінного стержня: розробка числового алгоритму з використанням теорії графів / В. В. Юрченко // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 30.* – Рівне, 2015. – С. 306 – 316.
  19. Юрченко В. В. Узагальнені секторіальні координати для довільного перерізу тонкостінного стержня: розробка числового алгоритму з використанням теорії графів / В. В. Юрченко // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 31.* – Рівне, 2015. – С. 538 – 549.
  20. Білик С. І. Оптимізація розмірів відгинів, що підкріплюють полиці, для стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів / С. І. Білик, В. В. Юрченко // *«Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки».* Том 30 (69) № 3, 2019. – С. 198 – 205.
  21. Перельмутер А. В. Дослідження області несучої здатності тонкостінних стержневих елементів із холодногнутих профілів / А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць.* – Вип. № 75. – Одеса, ОДАБА, 2019. – С. 53 – 60.

*в) статті, що включені до наукових періодичних видань інших держав, та у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз матеріалів:*

22. Peleshko I. D. Computer-aided design and optimization of steel structural systems / I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko, N. A. Beliaev // *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej “Budownictwo i inżynieria środowiska”*, Nr. 264. – 2009. – z. 52. – Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2009. – P. 145 – 154.
23. Криксунов Э. З. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в «SCAD Office» / Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко // *Бюллетень строительной техники.* – №1, 2010. – С. 56 – 59.
24. Криксунов Э. З. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в «SCAD Office» / Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко // *CAD master.* – №3, 2010. – С. 110 – 115.
25. Криксунов Э. З. Проектирование фланцевых соединений рамных узлов /

- Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко // Промышленное и гражданское строительство. – №2, 2010. – С. 53 – 57.
26. Проектирование болтовых фланцевых соединений согласно EuroCode и украинским нормам: согласованность и противоречия / А. В. Перельмутер, Э. З. Криксунов, И. С. Гавриленко, В. В. Юрченко // International journal for computational civil and structural engineering. – 6 (1&2), 2010. – С.175 - 176.
  27. Юрченко В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office» / В. В. Юрченко // Инженерно-строительный журнал, № 8, 2010. – С. 38 – 46.
  28. Перельмутер А. В. О расчете пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля / А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко // Строительная механика и расчет сооружений. – №6. – 2012. – С. 18 – 25.
  29. Perelmuter A. Parametric optimization of steel shell towers of high-power wind turbines / A. Perelmuter, V. Yurchenko // Procedia Engineering, 57, 2013. – P. 895 – 905. (10.1016/j.proeng.2013.04.114).
  30. Yurchenko V. Searching shear forces flows for an arbitrary cross-section of a thin-walled bar: development of numerical algorithm based on the graph theory / V. Yurchenko // International journal for computational civil and structural engineering. – 15(1), 2019. – P. 153 – 170.

*г) основні публікації по доповідям на міжнародних і вітчизняних конференціях:*

31. Peleshko I. An optimum structural computer-aided design using update gradient method / I. Peleshko, V. Yurchenko // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” (Lithuania, Vilnius, May 19-21, 2004), Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University. – P. 860 – 865.
32. Пелешко І. Д. Застосування генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних проектних рішень металевих конструкцій / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // VIII Українська науково-технічна конференція “Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее” (18-22 октября 2004 г., Киев, Украина) / Сборник докладов, часть 1. / Под общ. Ред. Шимановского А. В. – К.: “Сталь”, 2004. – С. 250 – 260.
33. Permyakov V. O. An optimum structural computer-aided design using hybrid genetic algorithm / V. O. Permyakov, V. V. Yurchenko, I. D. Peleshko // Proceeding of the International Conference “Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures” / Gizejowski, Kozlowski, Slecza & Ziolk (eds.) / Taylor & Francis Group, London, 2006. – P. 819 – 826.
34. Юрченко В. В. Генетичний алгоритм для пошуку оптимальних проектних рішень металевих конструкцій / В. В. Юрченко // Тези доповідей наукової конференції молодих вчених, аспірантів та студентів КНУБА / Відп. за випуск П. П. Лізунов. – К.: КНУБА, 2006. – С. 20 – 21.
35. Юрченко В. В. До питання оптимізації топології стрижневої системи /

- В. В. Юрченко // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА: Тези доповідей. – К.: КНУБА, 2007. – С. 33 – 34.
36. Пелешко І. Д. Оптимізація топології металевих стержневих конструкцій з використанням гібридного генетичного алгоритму / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // Металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку / Тези доповідей конференції. – К.: Видавництво «Сталь», 2008. – С. 63 – 65.
37. Юрченко В. В. Статичний аналіз поперечних рам каркасів з тонкостінних холодногнутих стержнів відкритого профілю / В. В. Юрченко, С. В. Короткий // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА: тези доповідей. – в 2-х частинах. – Ч.1. – К.: КНУБА, 2009. – С. 48 – 49.
38. Peleshko I. D. Hybrid genetic algorithm with gradient learning of the best individual for optimum computer-aided design of steel structural systems / I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko // 8<sup>th</sup> World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (1-5 June 2009, LNEC, Lisboa, Portugal). Books of abstracts and CD-ROM Proceedings / Eds. H. C. Rodrigues, J. M. Guedes, P. R. Fernandes, J. O. Folgado, M. M. Neves. – ISSMO, 2009. – P. 40.
39. Пелешко І. Д. Об оптимальном закреплении поперечных сечений за стержнями металлических конструкций / И. Д. Пелешко, В. В. Юрченко, И. М. Балук // Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство): Сб. науч. тр. междунар. симпозиума, г. Брест, 15-18 июня 2009 г. / Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС» [и др.]. – Брест: ОАО «Брестская типография», 2009. – С. 222 – 227.
40. Peleshko I. D. Computer-aided design and optimization of steel structural systems / I. D. Peleshko, V. V. Yurchenko, N. A. Beliaev // Proceedings of XII International Scientific Conference “Current issues of civil and environmental engineering” Rzeszów-Lviv-Kosice (17-19 September 2009, Rzeszów, Poland). Book of abstracts. – Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2009. – P. 49.
41. Юрченко В. В. Розробка аналітичних залежностей критичних сил для локальних форм пружного випучування центрально-стиснутого тонкостінного стержня відкритого профілю / В. В. Юрченко, С. В. Короткий // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА: тези доповідей. – в 2-х частинах. – Ч.1. – К.: КНУБА, 2010. – С. 44 – 45.
42. Статичний аналіз каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів у середовищі обчислювального комплексу «SCAD Office» / В. В. Юрченко, М. В. Кірлаш, А. М. Коваленко, Є. В. Киричек // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА: тези доповідей. – в 2-х частинах. – Ч.1. – К.: КНУБА, 2010. – С. 46 – 47.
43. Designing bolted end-plate connections in compliance with Eurocode and



- Ukrainian codes: consistency and contradictions / A. Perelmuter, E. Kriksunov, I. Gavrilenko, V. Yurchenko // Selected papers of the 10<sup>th</sup> International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”. Vol. II / Ed. by P. Vainiūnas, E. K. Zavadskas. – Vilnius: Technika, 2010. – P. 733 – 743.
44. Проектирование болтовых фланцевых соединений согласно EuroCode и украинским нормам: согласованность и противоречия / А. В. Перельмутер, Э. З. Криксунов, И. С. Гавриленко, В. В. Юрченко // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: материалы III Международного симпозиума / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. (НПИ). – Новочеркасск, 2010. – С.11 – 12.
  45. Розрахунок каркасів будівель із тонкостінних холодногнутих профілів у середовищі обчислювального комплексу «SCAD Office» / Є. В. Киричек, С. Г. Хрущ, С. В. Короткий, В. В. Юрченко // Збірник тез студентських доповідей. Відп. за випуск П. П. Лізунов. – К.: КНУБА, 2010. – С. 166 – 167.
  46. Короткий С. В. Визначення критичних сил для локальних форм пружного випучування центрально-стиснутого тонкостінного стержня відкритого профілю / С. В. Короткий, В. В. Юрченко // Збірник тез студентських доповідей. Відп. за випуск П. П. Лізунов. – К.: КНУБА, 2010. – С. 164 – 166.
  47. Перельмутер А. В. О расчете пространственных систем из тонкостенных стержней открытого профиля / А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов IV Международного симпозиума – Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2012. – С. 117 – 118.
  48. Юрченко В. В. Численное решение задачи о распределении касательных напряжений в сечений тонкостенного стержня произвольной конфигурации / В. В. Юрченко // Строительная механика и строительные конструкции: Сборник статей. – М.: Издательство СКАД СОФТ, 2013. – С. 487 – 505.
  49. Yurchenko V. Parametric optimization of steel truss with hollow structural members based on update gradient method / V. Yurchenko, I. Peleshko, N. Beliaev // Proceedings of International Conference “Design, Fabrication and Economy of Metal Structures” (Miskolc, Hungary, April 24-26, 2013). – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 103 – 109.
  50. Perelmuter A. Optimization of steel towers for large wind turbines / A. Perelmuter, V. Yurchenko // Proceedings of the METNET Seminar 2013 in Luleå / Eds. by Kuldeep Viridi & Lauri Tenhunen. – HAMK University of Applied Science, 2013. – P. 120 – 124.
  51. Perelmuter A. Shear stresses in hybrid thin-walled section: development of detail numerical algorithm based on the graph theory / A. Perelmuter, V. Yurchenko // Proceedings of 3<sup>rd</sup> Polish Congress of Mechanics and 21<sup>st</sup> International Conference on Computer Methods in Mechanics. Short Papers. – Vol. 2. – Gdańsk, 2015. – P. 943 – 944.

52. Perelmuter A. On the issue of structural analysis of spatial systems from thin-walled bars with open profiles / A. Perelmuter, V. Yurchenko // Proceedings of the METNET Seminar 2015 in Budapest / Eds. by Kuldeep Viridi & Lauri Tenhunen. – HAMK University of Applied Science, 2015. – P. 68 – 80.
53. Область несущей способности как интерактивный инструмент анализа в SCAD Office / Гавриленко И. С., Гиренко С. В., Перельмутер А. В. [та ін.] // Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 25-26 жовтня 2017. – К.: Талком. – С. 39 – 42.
54. Software development experience in designing of steel structural joints / V. S. Karpilovsky, E. Z. Kryksunov, A. V. Perelmuter [et al.] // Proceedings of the METNET Seminar 2017 in Cottbus / Eds. by Kuldeep Viridi & Lauri Tenhunen. – Häme University of Applied Science, 2018. – P. 69 – 82.
55. Load-bearing capacity as an interactive analysis tool in SCAD Office / I. S. Gavrilenko, S. V. Girenko, A. V. Perelmuter [et al.] // Proceedings of the METNET Seminar 2017 in Cottbus / Eds. by Kuldeep Viridi & Lauri Tenhunen. – Häme University of Applied Science, 2018. – P. 112 – 127.
56. Рудь Д. Н. Программная реализация поиска потоков касательных усилий в сечении тонкостенного стержня произвольной конфигурации / Д. Н. Рудь, В. В. Юрченко // Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: Тези доповідей другої міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 26-27 вересня, 2018. – С. 109 – 111.
57. Юрченко В. В. Методика експериментальних досліджень несучої здатності профільованих листів / В. В. Юрченко, М. О. Вабіщевич, І. О. Охтеня [та ін.] // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА: тези доповідей. – в 2-х частинах. – Ч.1. – К.: КНУБА, 2009. – С. 49 – 50.
58. Юрченко В. В. Пошук оптимальних розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профілю, що працює в умовах центрального стиску / В. В. Юрченко // Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: Тези доповідей третьої міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 24-25 вересня, 2019.

## АНОТАЦІЯ

**Юрченко В. В. Удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів на базі рішення задачі оптимального проектування.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробці методології пошуку оптимальних проектних рішень поперечних рам каркасів будівель, виготовлених із холодногнутих профілів, що об'єднує математичну модель задачі оптимізації досліджуваного класу конструкцій, а також методи і алгоритми пошуку їх оптимальних проектних рішень, орієнтовані на програмну реалізацію в системах автоматизованого проектування.

Виконані числові дослідження по оцінці депланацій перерізів тонкостінних стержневих елементів, що примикають до конструкції вузла, та розподілу депланацій та бімоментів у тонкостінних стержневих системах.

Розглянута задача визначення дотичних напружень для довільного перерізу тонкостінного стержня, розроблене детальне алгоритмічне забезпечення цієї задачі та виконана його програмна реалізація.

Запропонована модифікація генетичного алгоритму та побудовано новий ефективний алгоритм пошуку оптимальної конструктивної форми поперечних рам із холодногнутих профілів з оптимізацією параметрів геометричної схеми та розмірів перерізів з врахуванням їх закритичної роботи, обмежень функціонального об'єму та конструктивних вимог.

В рамках запропонованої пошукової методології розроблені нові ефективні конструкції та закономірності формоутворення оптимальних проектних рішень поперечних рам із холодногнутих профілів.

**Ключові слова:** поперечні рами каркасів будівель із холодногнутих профілів, тонкостінний стержень, депланація, бімомент, теорія графів, потік дотичних напружень, функціонал Кастільяно, метод множників Лагранжа, закритична робота, втрата місцевої стійкості, втрата стійкості форми перерізу, задача оптимізації, математична модель, область несучої здатності, генетичний алгоритм, метод проекції градієнта, алгоритм, програмне забезпечення, оптимальна конструктивна форма.

## АННОТАЦИЯ

**Юрченко В. В. Усовершенствование конструктивной формы легких каркасов зданий из холодногнутых профилей на базе решения задачи оптимального проектирования.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и

сооружения (19 – Архитектура и строительство). – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена разработке методологии поиска оптимальных проектных решений поперечных рам каркасов зданий из холодногнутых профилей, охватывающей математическую модель задачи оптимального проектирования исследуемого класса конструкций, а также методы и алгоритмы поиска их оптимальных проектных решений, ориентированные на программную реализацию в системах автоматизированного проектирования.

**Содержание диссертации.** В первом разделе диссертации освещено современное состояние проблемы разработки и внедрения рамных конструкций зданий из холодногнутых профилей, сформулированы цель и задачи исследований.

Второй раздел работы посвящен выполнению численных исследований по оценке депланаций сечений, примыкающих к конструкции узла, и распределению депланаций и бимоментов в тонкостенных стержневых системах.

В третьем разделе рассмотрена задача определения касательных напряжений на внешних гранях произвольного сечения тонкостенного стержня, которая сведена к задаче минимизации функционала Кастильяно при обеспечении ограничений-равенств, описывающих условия равновесия потоков в точках ветвления сечения, а также при обеспечении уравнения равновесия всего сечения относительно продольной оси тонкостенного стержня.

В четвертом разделе рассмотрен нормативный расчет несущих элементов из холодногнутых профилей с учетом закритической работы сжатых элементов сечения. Методика нормативного расчета несущей способности таких элементов, состоящая в построении редуцированных поперечных сечений стержней, определяющих потерю местной устойчивости сжатых элементов сечения и потерю устойчивости формы поперечного сечения, адаптирована для использования в составе математической модели задачи оптимального проектирования исследуемого класса конструкций.

Пятый раздел посвящен разработке математической модели задачи оптимального проектирования тонкостенных стержневых конструкций из холодногнутых профилей. Задача оптимизации исследуемого класса конструкций формулируется как: при заданных топологии стержневой системы, типах поперечных сечений ее элементов, условиях закрепления на опорах и схеме расчетных нагрузжений определить оптимальные параметры геометрической схемы и размеры поперечных сечений с учетом закритической работы стержневых элементов, ограничений функционального объема и конструктивных требований.

В рамках разработанной математической модели впервые построена область несущей способности стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей, которая позволила исследовать область поиска оптимальных проектных решений поперечных рам каркасов из

холодногнутых профилей.

Шестой раздел диссертации посвящен разработке алгоритмов поиска оптимальных проектных решений тонкостенных стержневых конструкций из холодногнутых профилей на базе эволюционных методов оптимизации, которые формализуются с помощью генетических алгоритмов, ориентированных на их программную реализацию в системах автоматизированного проектирования.

Предложена модификация генетического алгоритма путем его гибридизации с использованием метода проекции градиента функции цели на поверхность активных ограничений. Построен новый эффективный алгоритм поиска оптимальной конструктивной формы поперечных рам каркасов зданий из холодногнутых профилей с оптимизацией параметров геометрической схемы и размеров поперечных сечений с учетом закритической работы стержневых элементов, ограничений функционального объема и конструктивных требований.

Седьмой раздел диссертационной работы посвящен разработке новых эффективных конструкций и закономерностей формообразования оптимальных проектных решений поперечных рам каркасов зданий из холодногнутых профилей.

В рамках предложенной поисковой методологии рассмотрена задача поиска оптимальных размеров поперечного сечения С-образного холодногнутого профиля. Реализован поиск оптимальных размеров поперечных сечений стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей с учетом их закритической работы. В результате оптимизационного расчета получены С-образные холодногнутые профили, которые при одной и той же ширине заготовки характеризуются большей несущей способностью по сравнению с холодногнутыми профилями отечественных производителей. Результаты оптимизационных расчетов служат базой для создания эффективных национальных сортов стандартных холодногнутых профилей.

Сформулирована и решена задача поиска оптимальной конструктивной формы большепролетной поперечной рамы каркаса здания из холодногнутых профилей и выявлена технико-экономическая эффективность оптимального проектного решения. Исследовано влияние выбора критерия оптимальности, влияние функционального назначения здания и рыночной стоимости утеплителя на оптимальные параметры геометрической схемы поперечных рам каркасов из холодногнутых профилей. Как результат выполненных исследований выявлены новые закономерности формообразования оптимальных проектных решений поперечных рам каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей.

**Ключевые слова:** поперечные рамы каркасов зданий из холодногнутых профилей, тонкостенный стержень, депланация, бимомент, теория графов, поток касательных напряжений, функционал Кастильяно, метод множителей Лагранжа, закритическая работа, потеря местной устойчивости, потеря устойчивости формы сечения, задача оптимизации,

математическая модель, область несущей способности, генетический алгоритм, метод проекции градиента, алгоритм, программное обеспечение, оптимальная конструктивная форма.

## SUMMARY

**Yurchenko V. V. Development of steel frames structural form made from cold-formed profiles based on the optimization problem solution.** – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The thesis is for taking the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.23.01 – civil engineering constructions, buildings and structures. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to development of searching methodology for optimum design decisions of cold-formed steel frames and trusses, which covers mathematical model of optimization problem of the structures under consideration as well as methods and searching algorithms for optimum design decisions oriented on software implementation in computer-aided systems.

Numerical researches devoted to estimation of warping deformations of thin-walled bar cross-sections adjacent to the structural joint and redistribution of warping and bi-moments in thin-walled bar structures has been performed.

Shear stresses searching problem for an arbitrary cross-section of a thin-walled bar has been considered. Detail numerical algorithm for this problem has been elaborated and corresponded software implementation has been performed.

Modification of the standard genetic algorithm has been proposed. New effective searching algorithm for optimum structural form of cold-formed steel frames and trusses has been constructed with optimization of geometrical scheme parameters and cross-section sizes of structural members taking into account post-buckling behaviour, constraints of functional volume as well as structural requirements.

New effective structures have been developed as well as new shaping regularities for optimum structural design decisions of cold-formed steel frames and trusses have been obtained in scope of proposed searching methodology.

**Key words:** steel portal frames and trusses from cold-formed profiles, thin-walled bar, warping, bi-moment, graph theory, shear forces flows, Castigliano's functional, Lagrangian's multipliers method, post-buckling behaviour, local buckling, distortional buckling, optimization problem, mathematical model, load-bearing capacity region, genetic algorithm, gradient projection method, algorithm, software, optimum steel structure.

Підписано до друку 30.08.2019 р. Формат 148×210 мм.  
Папір офісний. Друк цифровий. Тираж 100 прим.  
Видавництво по вул. А. Антонова, 5а, оф. 105а, 03186, м. Київ  
Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
Серія В03 №465168 від 11.09.2008 р.