

Національний університет “Львівська політехніка”

На правах рукопису

Балук Ігор Мирославович

УДК 624.014.04

**ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА
ПІДСИЛЕННЯ СТРИЖНЕВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

**Науковий керівник,
кандидат технічних наук,
доцент ПЕЛЕСЬКО І. Д.**

Львів – 2015 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ СТРИЖНЕВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ (СМК).....	10
1.1. Аналіз досліджень у галузі проектування реконструкції та підсилення металевих конструкцій.....	10
1.2. Сучасний стан оптимального проектування і математичного моделювання реконструкції та підсилення СМК.....	20
1.3. Системи автоматизованого проектування СМК.....	28
1.4. Мета та задачі дослідження.....	36
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ СТРИЖНЕВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	37
2.1. Основні розрахункові передумови й означення.....	37
2.2. Аналіз і формалізація основних способів реконструкції та підсилення СМК.....	38
2.3. Формування етапів реконструкції.....	41
2.4. Формалізація процесу реконструкції, змін розрахункових схем і навантажень.....	47
2.5. Математична модель реконструкції та підсилення СМК.....	52
2.6. Висновки до розділу 2.....	55
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СМК ПІД ЧАС ЇХНЬОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ.....	56
3.1. Основні положення визначення НДС СМК під час реконструкції та підсилення.....	56
3.2. Розробка алгоритму визначення НДС СМК.....	64

3.3. Формування систем рівнянь, що використовуються для визначення НДС СМК.....	69
3.3.1. Загальні положення формування систем рівнянь.....	69
3.3.2. Визначення зусиль від одиничних навантажень.....	72
3.3.3. Вплив підсилення стрижнів на зусилля в навантажених СМК.....	75
3.3.4. Визначення зусиль від зовнішніх навантажень і регулювання зусиль.....	81
3.4. Методика визначення НДС СМК під час реконструкції та підсилення.....	83
3.5. Висновки до розділу 3.....	90
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ СМК	92
4.1. Вибір змінних проектування.....	92
4.2. Формулювання системи обмежень.....	96
4.3. Критерії оптимальності реконструкції та підсилення.....	99
4.4. Удосконалення мови для запису задач оптимізації СМК.....	101
4.5. Методика оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК	110
4.6. Висновки до розділу 4.....	111
РОЗДІЛ 5. ПІДСИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ Й ОЦІНКА ЇЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	113
5.1. Задавання базової розрахункової схеми й процесу реконструкції в програмі OptCAD.....	113
5.2. Особливості задавання елементів математичної моделі задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК.....	117
5.3. Аналіз роботи підсистеми автоматизованого проектування	

реконструкції та підсилення СМК.....	118
5.4. Виявлення резервів несучої здатності сталевий стрижневої конструкції покриття торгово-розважального комплексу “Екватор” в м. Рівне	126
5.5. Оптимальне проектування реконструкції надземного переходу нафтогазопроводів через р. Стрий.....	134
5.6. Висновки до розділу 5.....	147
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	150
ДОДАТОК А. Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи	169
ДОДАТОК Б. Вікна програми OptCAD.....	172

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток промислового виробництва нерозривно пов'язаний з реконструкцією, розширенням і технічним переозброєнням діючих підприємств. Ринкові вимоги приводять до постійного збільшення частки капітальних вкладень на реконструкцію й переозброєння промислових підприємств. Тенденція до збільшення витрат ресурсів зберігатиметься й надалі. Споруджувані виробничі підприємства, промислові комплекси й окремі цехи через порівняно короткий час можуть потребувати модернізації. Все це, як правило, пов'язане зі зміною експлуатаційних навантажень на конструкції будинків та споруд і часто вимагає їхнього підсилення.

Необхідність підсилення конструкцій у процесі експлуатації виникає також у результаті не передбачених проектом змін умов технології виробництва на діючому устаткуванні, при корозійному або механічному зношенні конструкцій, різних ушкодженнях тощо.

Серед будівельних конструкцій, які застосовуються у промислових об'єктах, значне місце посідають металеві, обсяг яких у цілому по країні обчислюється десятками мільйонів тонн [65]. Тому розробка й практичне застосування ефективних методів проектування металевих конструкцій має велике значення.

Важливим напрямком, що дає змогу уникнути перевитрат ресурсів, є розробка і використання обчислювальних алгоритмів та програм оптимізації, що дозволяють визначати оптимальні параметри під час проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій (СМК) з урахуванням повного набору обмежень, що без спрощень відображають специфіку конструювання СМК, їх виготовлення і монтаж. Це сприятиме широкому використанню методів оптимізації в практиці реконструкції та підсилення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з тематикою наукових досліджень

кафедри «Будівельне виробництво» Національного університету «Львівська політехніка»: «Технологія будівництва, дослідження прогресивних конструкцій і методів зведення будівель і споруд, сучасні технології енергоефективного будівництва, бетонів поліфункціонального призначення та ефективних оздоблювальних, гідроізоляційних, антикорозійних матеріалів».

Окремі дослідження виконані в межах держбюджетної науково-дослідної роботи № БВ-2 “Оптимальне проектування стержневих металевих конструкцій”, виконаної на замовлення Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, номер державної реєстрації НДР 0107U009437. У зазначеній темі автору належить розробка елементів підсистеми автоматизованого проектування реконструкції та підсилення СМК.

Мета роботи та задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка методики оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК з урахуванням конструктивних, технологічних, експлуатаційних і економічних вимог.

Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням таких задач:

- розробити математичну модель процесу реконструкції та підсилення СМК будівель та споруд;
- удосконалити методики визначення напружено-деформованого стану СМК та оптимізації параметрів конструкції підсилення і регулювання зусиль з урахуванням змін розрахункової схеми, способів і послідовності реконструкції та підсилення;
- розробити програмне забезпечення для оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК, яке реалізує запропоновані методики;
- виконати числові дослідження для виявлення техніко-економічної ефективності використання розробленої методики оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК.

Об’єкт досліджень – плоскі і просторові СМК в процесі їхньої реконструкції та підсилення.

Предмет дослідження – пошук оптимальної геометрії, розподілу зусиль, матеріалу, способу реконструкції та послідовності виконання робіт з урахуванням конструктивних, технологічних, експлуатаційних і економічних вимог.

Методи дослідження. Одержані в дисертаційній роботі наукові результати отримано на основі аналізу літературних джерел, здійснення теоретичних досліджень з використанням методів класичної механіки та математичного моделювання, а також проведених числових досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів:

- уперше розроблено математичну модель процесу реконструкції та підсилення СМК у вигляді діаграм, які відображають можливі поєднання змін розрахункової схеми, поперечних перерізів стрижнів і навантажень;

- удосконалено методику визначення напружено-деформованого стану СМК, що враховує зміни розрахункової схеми у процесі реконструкції та підсилення, розв'язуючи одну систему рівнянь методу скінченних елементів;

- набула подальшого розвитку мова запису задач оптимізації СМК залученням нових елементів, що забезпечують формулювання задач оптимізації реконструкції та підсилення;

- розроблено математичну модель задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК, що при заданих параметрах існуючої СМК дозволяє розраховувати оптимальні параметри конструкції підсилення, елементів підсилення, регулювань зусиль і навантажень, а також параметрів, що задають способи підсилення і послідовність виконання будівельно-монтажних робіт.

Вірогідність та обґрунтування наукових результатів, висновків і рекомендацій, що сформульовані в дисертаційній роботі, підтверджені чисельними та аналітичними дослідженнями із застосуванням апробованих гіпотез будівельної механіки, а також порівняльним аналізом одержаних результатів з аналогічними результатами інших авторів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці програмного забезпечення, призначеного для автоматизованого проектування та оптимізації реконструкції та підсилення СМК.

Програмне забезпечення та результати оптимізації реконструкції СМК використані під час реконструкції надземного переходу нафтогазопроводів через р. Стрий. Окремі результати впроваджено у навчальний процес на кафедрі будівельного виробництва Національного університету “Львівська політехніка” при викладанні дисципліни “Розрахункові методи в технології зведення будівель та споруд” для спеціальності 8.006010103 “Міське будівництво та господарство”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно, зокрема: розробка математичних моделей реконструкції та підсилення СМК і задачі їхньої оптимізації, методики оптимального проектування реконструкції та підсилення цих конструкцій, формулювання і розв’язування задач оптимізації, аналіз результатів числових досліджень.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на II міжнародній науковій конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Геодезія, архітектура та будівництво – 2009” (Львів, 14-16 травня 2009 р.), колоквіумі “Розрахунок та проектування просторових конструкцій” (Скадовськ, 7-10 вересня 2009 р.), третій Всеукраїнській науково-технічній конференції “Сучасні технології бетону” (Київ, 19-22 травня 2009 р.), міжнародному симпозіуму “Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)” (Брест, 15-18 июня 2009 г.), VI міжнародній науково-технічній конференції “Будівельні конструкції спортивних та просторових споруд: сьогодення та перспективи розвитку” (Київ, 6-10 вересня 2010 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції “Сучасні будівельні матеріали, конструкції та інноваційні технології зведення будівель і споруд” (Макіївка, 7-9 жовтня 2010 р.), III міжнародній

науковій конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Геодезія, архітектура та будівництво – 2010” (Львів, 25-27 листопада 2010 р.), шостій Всеукраїнській науково-технічній конференції “Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону” (Одеса, 24-27 травня 2011 р.), міжнародній конференції “Будівельні конструкції будівель і споруд: проектування, виготовлення, реконструкція, обслуговування” (Макіївка, 6-8 вересня 2011 р.), V міжнародній науковій конференції молодих вчених “Геодезія, архітектура та будівництво 2013” (Львів, 21-23 листопада 2013 р.).

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковані в 14 наукових працях, з яких 7 статей у фахових науково-технічних виданнях України і 2 статті у виданнях України, які входять до міжнародної наукометричної бази даних ICONDA.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг дисертації становить 176 сторінок і містить 10 таблиць, 39 рисунків, список використаних джерел із 171 найменування.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ СТРИЖНЕВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ (СМК)

1.1. Аналіз досліджень у галузі проектування реконструкції та підсилення металевих конструкцій

В Україні експлуатуються понад 35 мільйонів тонн будівельних металевих конструкцій [65], значну частину яких становлять стрижневі металеві конструкції (СМК), що перебувають в процесі тривалої експлуатації і під впливом природних умов та технологічних чинників поступово втрачають свої експлуатаційні властивості (надійність, безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність тощо). Для забезпечення необхідного рівня цих властивостей проводять заходи з технічної експлуатації, а при технічному переозброєнні підприємств, зміні їхнього функціонального призначення, встановленні нового обладнання, що призводить до збільшення навантаження і до зміни схеми його прикладання, виконують підсилення і реконструкцію.

Під час реконструкції капітальні вкладення окуповуються швидше, а затрати часу менші, ніж під час капітального будівництва [20, 24, 120]. Обґрунтуванням для проведення реконструкції є кращі параметри техніко-економічного аналізу порівняно з відповідними параметрами для нового будівництва.

Розвитку реконструкції і підсилення СМК та методів їхнього проектування присвячено праці М.С. Барабаш [6-8], М.Р. Більського [14, 18, 140], В.В. Бірюльова [19, 70], З.Я. Бліхарського [20], Б.Г. Гнідця [25], М.В. Гоголя [110, 111, 115], В.М. Гордєєва [3, 28], В.В. Горєва [69, 70], Є.В. Горохова [29, 144, 158], Б.Г. Демчини [43], І.Г. Іваника [75], В.Г. Кваші [54], Р.І. Кінаша [126, 140], Є.В. Клименка [56], В.П. Корольова [59], М.В. Котіва [116, 137, 140], В.В. Кузнецова [70], М.М. Лашенка [61, 62], Л.С. Мошкіна

[73], І.Д. Пелешка [92, 94], А.В. Перельмутера [70, 100, 101], С.Ф. Пічугіна [28], Б.С. Поповича [146], І.С. Реброва [113, 114], А.Г. Ройтмана [123, 127], Н.Д. Сергєєва [130, 131], А.В. Сильвестрова [19, 132], О.В. Шимановського [3, 68, 150] та інших.

Особливу увагу науковці приділяють визначенню реального напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, зокрема з праць [24, 52, 55, 58, 68, 100, 108, 113, 136, 144, 146] видно, що розрахунок НДС є складною частиною процесу проектування підсилення й реконструкції СМК. Під час використання комп'ютерних програм для проектування СМК задають вихідні дані, які описують СМК на різних етапах підсилення й експлуатації – параметри однієї чи декількох розрахункових схем конструкції і відповідних навантажень та впливів. Ці дані об'єднують у дві групи параметрів: 1) параметри, які описують конструкцію, що експлуатується і підлягає подальшій реконструкції й підсиленню; 2) параметри, які визначають у процесі проектування для задавання відповідної конструкції та технології підсилення у проекті.

Множина параметрів другої групи залежить від застосованих способів підсилення. Узагальнену класифікацію способів підсилення та ремонту СМК з поділом на декілька груп представлено на рис. 1.1. Подібні класифікації основних способів реконструкції і підсилення наведені у багатьох працях, зокрема [19, 41, 68, 70, 113]. Різноманітність наявних способів ускладнює їх вибір під час проектування і обумовлює необхідність проведення аналізу їхніх параметрів. Особливий інтерес представляють параметри, значення яких розраховуються під час проектування, вказуються у проекті і впливають на НДС СМК у цілому, а не локально.

Під час проектування реконструкції і підсилення СМК способами, що змінюють умови експлуатації конструкції чи її окремих елементів (рис. 1.1), задають такий рівень і розміщення навантажень, при якому забезпечується несуча здатність конструкції, тобто до шуканих параметрів відносять послідовність прикладання та величину навантажень.

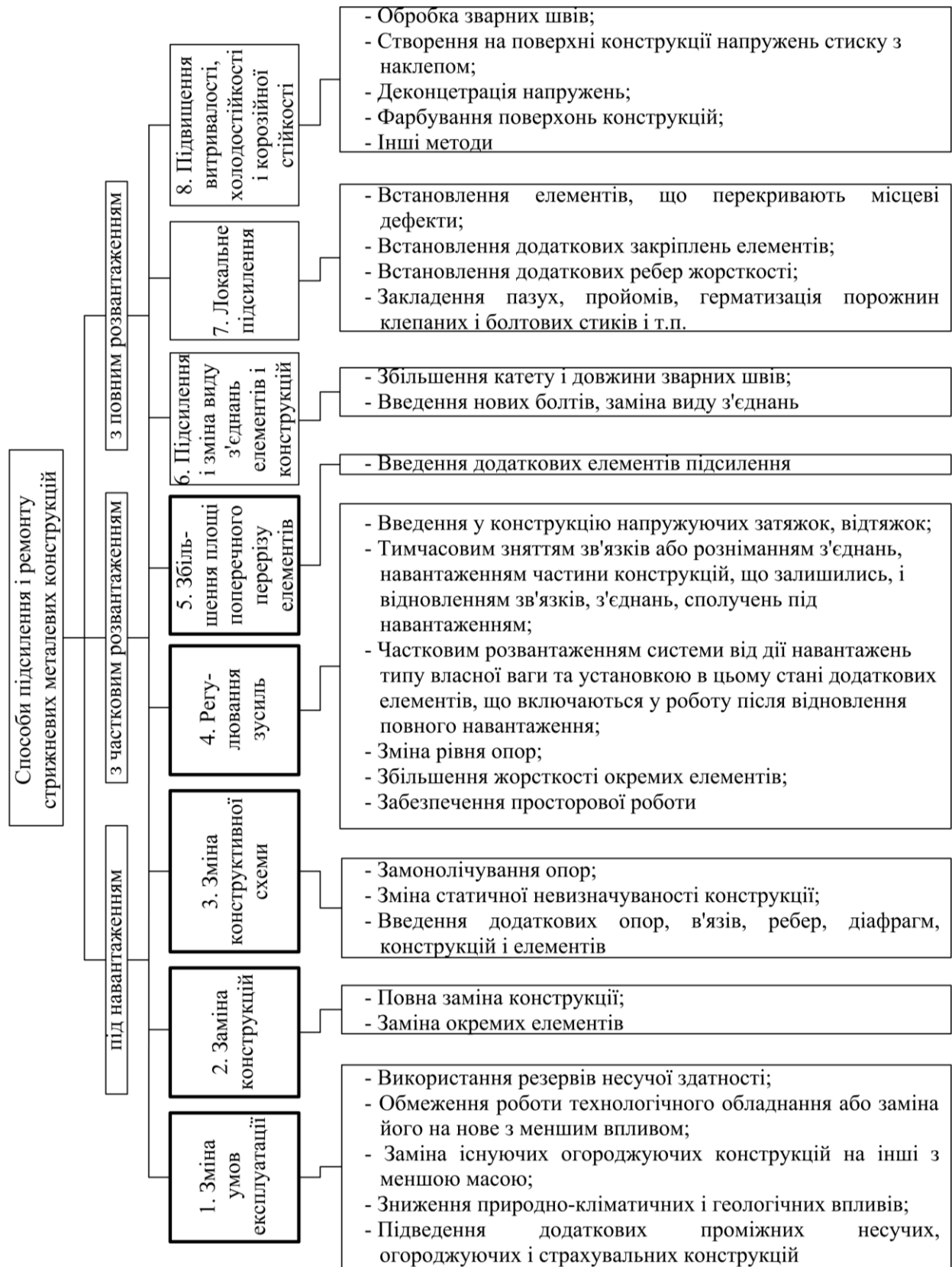


Рис. 1.1. Класифікація основних способів підсилення і ремонту СМК

Під час проектування підведення додаткових проміжних несучих, огорожуючих і страхувальних конструкцій, визначають кількість додаткових конструкцій, їхнє розміщення і розміри поперечних перерізів тощо.

Заміна конструкцій передбачає визначення параметрів нових конструкцій з урахуванням впливу на НДС СМК змін розрахункової схеми, навантажень і послідовності виконання робіт.

Під час проектування реконструкції і підсилення СМК за способами зміни конструктивної схеми визначають кількість, розміщення і типи в'язей, які треба накласти чи ліквідувати, а також кількість, розміщення і типи додаткових елементів, розміри їхніх поперечних перерізів. Заміну конструкцій можна розглядати як послідовність змін конструктивної схеми, що відбуваються у процесі демонтажу і монтажу конструкцій.

Метод регулювання зусиль передбачає збільшення несучої здатності елементів конструкції шляхом штучного контрольованого перерозподілу їхніх зусиль [62, 73, 92, 94, 100, 115, 116, 126, 137]. У цьому разі під час проектування реконструкції і підсилення СМК до невідомих параметрів відносять значення регульованих зусиль і переміщень, а також визначають місця регулювання.

Під час проектування підсилення елементів збільшенням площі їхнього поперечного перерізу визначають розміри поперечних перерізів додаткових елементів підсилення, а також параметри, що описують їхнє розташування відносно існуючих елементів поперечного перерізу.

Способи, що належать до груп 6, 7, 8 згідно з рис. 1.1, пов'язані, в основному, з місцевим підсиленням стрижнів і вузлів, підвищенням витривалості, холодостійкості сталі і корозійної стійкості СМК. Деякі із цих способів можна віднести до заходів із ремонту конструкцій і їхніх елементів і аналогічно до [113] у подальшому не розглядати, оскільки вони мають локальний або незначний вплив на розподіл зусиль і переміщень у конструкції.

Виконаний аналіз показав значну кількість типів параметрів, які треба визначати для застосування різних способів підсилення: величини навантажень; кількість і типи в'язей, які треба накласти чи ліквідувати; кількість і типи поперечних перерізів додаткових стрижнів; розміри поперечних перерізів додаткових стрижнів та елементів підсилення окремих стрижнів, а також параметри, що описують розташування елементів підсилення відносно існуючих елементів перерізу; значення регульованих зусиль і переміщень. Окремо виділено геометричні параметри – прив'язки до конструкцій навантажень, в'язей, які треба накласти чи ліквідувати, місць кріплення додаткових стрижнів, прив'язки місць регулювання зусиль і переміщень.

Наведений перелік параметрів, що визначаються під час проектування реконструкції й підсилення СМК, може доповнюватись іншими, але і в такій кількості свідчить про складність розв'язування задач визначення їхніх оптимальних значень.

На прийняття рішення щодо процесу реконструкції і підсилення СМК, зокрема, щодо можливих способів підсилення, впливає їхній технічний стан – сукупність властивостей, що характеризують відповідність конструкцій вимогам норм [36-41, 107, 133-135] і умовам забезпечення технологічного процесу [70].

Дослідженню технічного стану конструкцій, їхній діагностиці і моніторингу присвячені праці багатьох вчених, зокрема А.В. Перельмутера [70], Є.В. Денисова [42], Д.Г. Гладішева [24], Г.М. Гладішева [24], А.Я. Барашикова [12, 13], А.І. Лантух-Лященко [28], В.П. Корольова [59] та інших.

Технічний стан конструкції визначають на основі результатів її натурних обстежень, які включають [36, 70]: ознайомлення із проектними даними, огляд конструкцій із метою виявлення відповідності їх проекту і кількісного визначення їхніх технічних параметрів з виявленням місць, виду, кількісної оцінки величини і причин появи відхилень, дефектів і пошкоджень, уточнення властивостей металу, прогнозування майбутніх і уточнення

діючих навантажень та впливів, визначення зусиль в елементах, складання висновків про фактичний стан обстежених конструкцій, їх навантаження й умови експлуатації.

Під час проектування реконструкції і підсилення СМК, як і під час оцінки їхнього технічного стану і здійснення перевірних розрахунків, необхідно враховувати уточнену розрахункову схему [36]. Зусилля в елементах СМК визначають розрахунком, який виконують за такою схемою і за фактичними величинами діючих навантажень і впливів [68].

Уточнена розрахункова схема повинна враховувати виявлені під час обстеження дефекти і пошкодження, властивості матеріалів, розлад вузлових сполучень, просторову роботу конструкцій, геометричні розміри елементів конструкції, умови обпирання її на опори, спряження елементів між собою тощо.

Для забезпечення надійності СМК у процесі подальшої її експлуатації необхідно під час проектування її реконструкції і підсилення враховувати також вплив корозії, майбутні навантаження та впливи, технічне обслуговування тощо. В [32] запропоновано використовувати коефіцієнт запасу з несучої здатності, значення якого становить 1,2..1,3, залежно від швидкості узагальненого зносу і необхідного терміну служби споруди. Цей коефіцієнт рекомендується враховувати під час призначення перерізів елементів.

Використання коефіцієнта запасу з несучої здатності у [32] відповідає запропонованій і обґрунтованій в [49] моделі кородованих балкових конструкцій. Ця модель дозволяє розв'язувати задачу оптимізації за критерієм мінімуму маси без урахування агресивного середовища, з подальшим збільшенням отриманих оптимальних параметрів поперечних перерізів на величину, що компенсує корозійні втрати [49]. Такий підхід створює передумови для спрощення задачі оптимізації конструкцій, що експлуатуються в агресивному середовищі, і, відповідно, розширює можливості для застосування методів оптимального проектування.

Під час розроблення проекту реконструкції та підсилення розглядаються три стадії роботи СМК [68]: до підсилення, у процесі виконання робіт із підсилення та після їхнього завершення. Відповідно до розглянутих стадій прийнято поділяти навантаження й впливи на три групи: початкові; ті, що прикладаються в процесі підсилення; ті, що прикладаються після підсилення [113].

Початкові навантаження, що діють на конструкцію перед початком виконання будівельно-монтажних робіт із реконструкції й підсилення [113], визначають згідно з вимогами норм [36] за результатами обстеження і обмірів конструкцій з використанням робочих креслень і контрольних замірів поперечних перерізів.

Реконструкція і підсилення СМК може відбуватись як під навантаженням, так і з повним чи частковим розвантаженням конструкцій [41, 68, 113, 118, 119, 122]. Ступінь розвантаження конструкцій є параметром, що впливає на НДС, і повинен відображатися в проекті реконструкції і підсилення.

Якщо значення навантаження під час підсилення складно визначити достовірно або воно може змінюватися, то під час проектування розрахункове значення цього навантаження потрібно визначати з урахуванням коефіцієнтів надійності за навантаженням як більших, так і менших за одиницю. Тоді виникає необхідність розрахунку конструкції за декількома варіантами її початкового навантаження [113]. Наприклад, у [113] при визначенні розрахункових значень навантажень від попереднього напруження коефіцієнти перевантаження рекомендовано приймати рівними $n_1 = 1,1$ і $n_2 = 0,9$ (як при попередньому напруженні звичайних конструкцій), а можливість додаткових втрат попереднього напруження у результаті зминання і обтиснення конструкцій враховувати введенням відповідних коефіцієнтів умов роботи.

До навантажень і впливів, що прикладаються в процесі підсилення, відносять зусилля від попереднього напруження в результаті натягування

гнучких елементів, зміни положення опор, піддомкращування тощо і навантаження від баластного вантажу, ваги нових і тимчасових елементів конструкції, ваги монтажного обладнання тощо.

До навантажень і впливів, що прикладаються після підсилення, можна віднести навантаження від нового обладнання, складованих матеріалів тощо і від змінних короткочасних навантажень. Розрахункові значення цих навантажень визначаються згідно з [38] і використовуються під час формування сполучень навантажень.

Як відомо, різні види навантажень відрізняються тривалістю дії відносно встановленого терміну експлуатації конструкції T_{ef} і частотою їхньої реалізації [38]. Термін виконання робіт із реконструкції й підсилення T_{rec} за одним робочим проектом значно менший за T_{ef} . Це дозволяє перевіряти конструкції на дію монтажних навантажень, враховуючи фактичні значення постійних і змінних тривалих навантажень. Значення навантажень з норм [38] використовуються для перевірки роботи конструкції в умовах експлуатації після завершення реконструкції й підсилення.

Значення й місце прикладання деяких постійних і змінних тривалих навантажень іноді можна регулювати під час реконструкції і підсилення СМК із метою утримання необхідних зусиль і переміщень вузлів в конкретних і завчасно заданих межах на деяких стадіях монтажу [100]. Наприклад, можна тимчасово зменшувати чи збільшувати вагу складських матеріалів і рідин, прикладати баластні вантажі, обмежувати роботу мостових і підвісних кранів і вагу вантажу тощо. Значення й місця прикладання таких навантажень повинні бути контрольованими і фіксованими під час виконання будівельних робіт, що пов'язані із забезпеченням необхідного розподілу зусиль у поперечних перерізах підсилених стрижнів, накладанням в'язей чи регулюванням зусиль за допомогою натяжних пристроїв, домкратів тощо. Такі роботи виконують за

відсутності практичного впливу на НДС змінних короточасних навантажень від вітру, рухомого підйомно-транспортного устаткування тощо.

Навантаження, для яких значення і місця прикладання повинні контролюватися і бути фіксованими (практично незмінними) на деяких проміжках часу під час реконструкції і підсилення, надалі названо контрольованими, а всі інші, наприклад, вітрові – неконтрольованими. Значення контрольованих навантажень треба вказувати у проекті.

Виконаний аналіз навантажень і впливів на конструкцію до, під час і після її реконструкції і підсилення показав необхідність врахування зв'язку їхніх змін зі змінами розрахункової схеми у відповідній математичній моделі процесу реконструкції СМК.

У [39] зазначено, що “у проекті слід указувати послідовність монтажу елементів і виконання вузлів, а також допустимі монтажні навантаження, якщо зазначені чинники враховувались під час визначення розрахункових зусиль”. У [41] зазначено, що в робочих кресленнях підсилення конструкції необхідно відобразити “послідовність виконання робіт із підсилення конструкції в цілому і її окремих елементів, якщо ця послідовність позначається на напружено-деформованому стані конструкції”. Із наведеного випливає, що в перевірочних розрахунках підсилення конструкцій треба враховувати послідовність робіт, що виконувались під час зведення і можливої раніше здійсненої реконструкції, застосовані способи підсилення і відповідну технологію виконання робіт.

Загалом реконструкцію можна розглядати як комплексний будівельний процес, що є єдиною взаємообумовленою і взаємозв'язаною сукупністю цілеспрямованих дій, регламентованих певною послідовністю і режимами їхнього виконання [141]. Тоді кожний обраний спосіб реконструкції і підсилення можна розглядати як сукупність послідовних взаємозв'язаних дій, що змінюють параметри СМК і діючі навантаження і, таким чином, впливають на НДС СМК.

Для моделювання послідовностей використовують різного роду діаграми. На рис. 1.2 представлено діаграму процесу реконструкції СМК, що розроблена на підставі виконаного аналізу. Діаграма є подібною до синтаксичних діаграм мов програмування, що використовуються для задавання правильних послідовностей символів – виразів мови [85]. Запропонована діаграма описує процес реконструкції як певну послідовність її елементів.



Рис. 1.2. Діаграма процесу реконструкції й підсилення СМК

Елементами діаграми є обрані групи способів реконструкції й підсилення СМК, розвантаження і завантаження конструкцій. За допомогою переходів від початку діаграми (ліворуч) по лініях діаграми можна відтворити всі можливі варіанти поєднання цих елементів для конкретного процесу реконструкції. У діаграмі є лінії циклу, що дозволяють декілька разів залучати її складові елементи до процесу реконструкції. Таким чином діаграма відображає можливість виконання процесу реконструкції під навантаженням, із частковим або повним розвантаженням, з використанням одного чи декількох способів реконструкції й підсилення.

Виконаний аналіз сучасного стану досліджень реконструкції й підсилення СМК показав таке:

1. Процес реконструкції і підсилення СМК характеризується наявністю різноманітних параметрів, що впливають на розподіл зусиль у СМК, визначаються під час проектування і вказуються у проектній документації.

2. Основні способи реконструкції будівель і споруд та підсилення конструкцій передбачають, зазвичай, зміни розрахункової схеми й навантажень під час виконання будівельно-монтажних робіт.

3. Практично відсутні дослідження, що спрямовані на формалізацію представлення змін розрахункової схеми і навантажень у процесі реконструкції і підсилення СМК.

1.2. Сучасний стан оптимального проектування і математичного моделювання реконструкції та підсилення СМК

Значну роль у розвитку теорії оптимального проектування відіграли праці В. А. Баженова [4, 23], В.О. Бараненка [9-11], А. С. Білика [16, 17], В. В. Бірюльова [15], А. І. Віноградова [21, 22], А. В. Геммерлінга [23], В. М. Гордєєва [26, 27, 151], Є. В. Горохова [2, 29], Г. І. Гребенюка [30, 31], В. І. Гуляєва [33], В. Л. Кошкіна [33, 60], Я. І. Олькова [74], І.Д. Пелешка [77, 79, 82, 85, 92, 94, 96], А. В. Перельмутера [102], В. О. Пермькова [102, 104-106], Ю. М. Почтмана [109], М. І. Рейтмана [117], В. В. Трофимовича [142, 143], І. С. Холопова [74], Є. В. Шевченка [29, 149], В. М. Шимановського [151], В.В. Юрченко [77, 79, 82, 96, 102, 165], Є. Хога [147], К.Ј. Majid [66], J. Farkas [155], W. R. Spillers [164], E. Mezura-Montes [166], N. Noilublao [167], Н. Т. Ozturk [168], A. Schumacher [169], M. Sonmez [170], X. S. Yang [171], Kumar Rajesh [161], Flagera Forest [156] та інших.

Оптимальне проектування передбачає пошук такого проекту об'єкта проектування (проекту реконструкції і підсилення СМК) серед багатьох його проектів, що забезпечує узгодженість, збалансованість техніко-економічних показників як самого об'єкта, так і загалом системи, елементом якої є цей об'єкт [111, 162].

До техніко-економічних показників реконструкції і підсилення СМК відносять: масу елементів підсилення, вартість елементів підсилення, трудомісткість і вартість виготовлення, вартість транспортування готового виробу до місця монтажу, трудомісткість і вартість виконання робіт з

підсилення, втрати прибутку через зупинку виробництва на ділянці виконання робіт з підсилення, приведені затрати [71, 121, 138, 144]. Ці показники можуть бути як самостійними критеріями, так і складовими комплексних критеріїв, таких як приведені затрати. Згідно із [72] ці показники треба визначати за методикою [63] і враховувати під час вибору способу і конструктивного рішення підсилення.

За критерій для вибору варіантів реконструкції і підсилення СМК беруть один із визначених техніко-економічних показників ефективності конструкції, який служить для оцінювання якості проекту [103]. Згідно із [113] часто за критерій вибору беруть технологічність комплексу робіт з підсилення – можливість проведення цих робіт без зупинки виробництва і за мінімальні терміни з метою зниження економічних втрат підприємства під час реконструкції і підсилення. За значних витрат необхідно перевіряти економічну доцільність підсилення і реконструкції будівель порівняно з будівництвом нової [20, 144, 145].

У процесі оптимального проектування реконструкції і підсилення СМК формують і розв’язують задачі оптимізації.

Розрізняють одно- і багатокритеріальні задачі оптимізації [102, 111]. У багатокритеріальних задачах неможливе одночасне досягнення екстремальних значень усіма враховуваними критеріями оптимальності. Для розв’язування цих задач використовують методи векторної оптимізації, в яких, зазвичай, розв’язується послідовність однокритеріальних задач.

У загальному вигляді задачу однокритеріальної оптимізації формують, зазвичай, так [33, 66, 102]: знайти таке значення $\bar{X}^{Opt} = (x_1^{Opt}, x_2^{Opt}, \dots, x_n^{Opt})^T$ векторного аргументу $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, при якому

$$f(\bar{X}) \rightarrow \min \quad (1.1)$$

за таких обмежень:

$$\psi_z(\bar{X}) = 0 \quad (i = \overline{1, m}); \quad (1.2)$$

$$\psi_j(\bar{X}) \leq 0 \quad (j = \overline{m+1, p}), \quad (1.3)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ – змінні проектування, n – кількість змінних проектування, m, p – кількість обмежень-рівностей та загальна кількість обмежень відповідно, $f(\bar{X})$ – цільова функція, $\psi_z(\bar{X})$ – функція обмеження.

У задачі оптимізації виділяють такі складові: змінні проектування $\bar{X}$; система обмежень (1.2)-(1.3), що враховує висунуті вимоги до об'єкта проектування; цільова функція $f(\bar{X})$.

Розглядають змінні проектування неперервного (дійсного) або дискретного (цілочислового) типів. Неперервні змінні довільно варіюють в межах деякого визначеного інтервалу можливих значень. До них відносять, зокрема, координати вузлів конструкції підсилення, неперервні розміри поперечних перерізів нових стрижнів чи елементів підсилення існуючих стрижнів, значення регулювання зусиль. Дискретні змінні варіюють відповідно до визначеного скінченного набору їхніх можливих значень [102, 111, 153].

Система обмежень містить нормативні обмеження, що відображають вимоги будівельних норм [36-41, 45, 46], і додаткові обмеження. Джерелом виникнення додаткових обмежень можуть слугувати деякі вимоги завдання на проектування конкретного об'єкта, результати аналізу взаємодії об'єкта проектування з елементами технічної системи вищого рівня та рішення, що прийняті проектувальником [111].

Задачі оптимізації (1.1) – (1.3) з різними видами змінних проектування, обмежень $\psi_z(\bar{X})$ і $\psi_j(\bar{X})$, типами функцій мети $f(\bar{X})$ використані під час проектування металевих конструкцій, зокрема в [142, 143].

З урахуванням особливостей розрахунку, конструювання СМК і практичних потреб у [143] наведено формулювання узагальненої задачі їхнього оптимального проектування: за заданими топологією стрижневої системи, умовами закріплення на опорах і зовнішніми навантаженнями визначити параметри геометричної схеми, розподіл внутрішніх зусиль і

розміри поперечних перерізів елементів за умови досягнення мінімуму показників якості проекту і виконання заданих вимог, що висуваються до конструкції. У рамках узагальненої задачі оптимізації розглядають її часткові випадки, що характерні для практики проектування [143].

В умовах реконструкції і підсилення СМК у відповідній задачі оптимального проектування необхідно за заданими даними щодо існуючої конструкції і прикладених навантажень визначити спосіб і геометричну схему елементів підсилення, розподіл зусиль і розміри поперечних перерізів елементів підсилення.

Для розв'язування задач оптимізації конструкцій використовують різні методи оптимізації, зокрема симплекс-метод [34], градієнтний метод [95, 102, 163], генетичний алгоритм [10, 82], метод пошуку гармонії [93] та інші.

Симплекс-метод був розроблений математиком Джорджем Данцигом ще в 1947 році і використовується для розв'язування задач лінійного програмування [34] шляхом перебору вершин опуклого багатогранника в багатовимірному просторі.

Градієнтний метод є одним з найефективніших методів умовної оптимізації, що використовується під час проектування конструкцій. Цей метод був розроблений Д. Розеном [163] і представляє собою узагальнення методів найшвидшого спуску з поєднанням ортогонального проектування антиградієнта функції мети на поверхню обмежень.

Градієнтний метод забезпечує пошук розв'язку задачі оптимізації за ітераційною формулою

$$\bar{X}_{k+1} = \bar{X}_k + \Delta \bar{X}_k, \quad (1.4)$$

де $\bar{X}_k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)^T$ – поточне наближення до розв'язку задачі оптимізації перед виконанням k -го кроку (поточна точка); $\bar{X}_{k+1} = (x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_n^{k+1})^T$ – шукане наближення до розв'язку задачі оптимізації після виконання k -го кроку; $\Delta \bar{X}_k = (\Delta x_1^k, \Delta x_2^k, \dots, \Delta x_N^k)^T$ – вектор

приросту поточних змінних проектування під час виконання k -го кроку [102].

До недоліків градієнтного методу можна віднести: можливість збіжності розв'язку до локального екстремуму, змінні проектування мають бути неперервними, а функції обмежень і критеріїв оптимальності – нерозривними.

Критеріями зупинки градієнтного методу є здійснення заданої кількості кроків та виконання всіх обмежень (1.2)-(1.3) при $\Delta \bar{X}_k \rightarrow 0$.

У [95] представлено удосконалення градієнтного методу для розв'язування задач параметричної оптимізації, що використовує еквівалентні перетворення рівнянь методу за допомогою ортогональної матриці елементарного відбиття при збереженні довжин градієнтів обмежень і функції мети.

Генетичний алгоритм застосовується для розв'язування задач оптимізації з дискретними змінними проектування. Він моделює природний еволюційний процес і використовує бінарне представлення змінних проектування та ітеративний спрямований випадковий пошук [10, 84].

Метод пошуку гармонії (Harmony Search) розроблено Зонгом Ву Джімом (Zong Woo Geem) у 2001 році і може бути використаним для розв'язування задач оптимізації з дискретними змінними проектування [93]. Метод пошуку гармонії моделює процес пошуку музикантами такого поєднання нот, при якому отримується найкраще звучання музики. У порівнянні з генетичним алгоритмом цей метод має декілька переваг, серед яких можливість розгляду кожної змінної проектування незалежно одна від одної і відсутність бінарних представлень для значень змінних проектування.

Розглянуті методи оптимізації можна використовувати під час розв'язування задач оптимального проектування реконструкції і підсилення СМК у залежності від типу змінних проектування. Для розв'язування задачі оптимізації з неперервними змінними проектування можна використовувати градієнтний метод [95]. При цьому розміри поперечних перерізів

сортаментних металопрофілів можна задавати через неперевні змінні проектування, а після розв'язування задачі оптимізації дискретизувати отримані оптимальні значення цих змінних. Для розв'язування задачі оптимізації з дискретними змінними проектування можна використовувати генетичний алгоритм, а для задачі з дискретними і неперервними змінними проектування – метод пошуку гармонії.

Для забезпечення можливості розроблення програм оптимального проектування реконструкції й підсилення СМК необхідно формувати математичну модель цього процесу, яка формально описує цей процес у вигляді математичних залежностей та алгоритмів.

Математичну модель об'єкта проектування вважають заданою, якщо описано вихідні дані (параметри входу), змінні стану (параметри виходу) і алгоритм аналізу цього об'єкта (рис. 1.3) [102, 111].

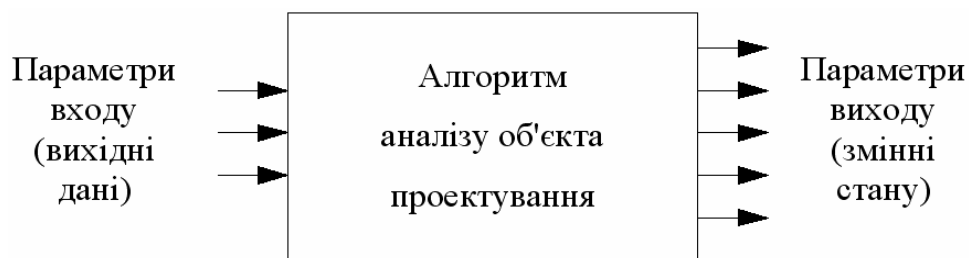


Рис. 1.3. Схема математичної моделі об'єкта проектування

Для моделювання реконструкції й підсилення стрижневих металевих конструкцій потрібно детально розглянути процес реконструкції й підсилення і визначити вихідні дані, змінні стану й алгоритм аналізу об'єкта проектування.

Оскільки під час оптимального проектування реконструкції і підсилення СМК відбувається багаторазовий розрахунок подібних розрахункових схем на задані навантаження, то необхідно ефективно розраховувати НДС.

Встановлено, що частка часу, що витрачається програмою OptCAD на розв'язування системи рівнянь методу скінченних елементів (МСЕ), в загальному часі, що витрачається на розв'язування задач оптимізації деяких СМК градієнтним методом, становить до 25%. Цей результат отримано на

основі аналізу задачі оптимізації перехресної системи балок перекриття, описаної в [153], рамної системи [160] і 10-елементної ферми [159]. Для аналізу використано засіб Performance Profiler програми AQtime (версія 5), що розроблена AutomatedQA Corp [47].

За потреби розраховувати п'ять систем рівнянь МСЕ для однієї точки простору змінних проектування за умови екстраполяції і збереження часу на інші операції частка затрат часу на розв'язування цих систем може досягати 62,5 %. Тому для скорочення затрат комп'ютерного часу на розв'язування задач оптимізації реконструкції і підсилення необхідно використовувати ефективні методи розрахунку НДС.

Аналізу об'єкта проектування – СМК – присвячені праці [66, 94, 99, 100, 113, 128-130, 131, 157], що дозволяють ефективно розраховувати НДС.

Теореми про структурні зміни для лінійних пружних шарнірно-стрижневих конструкцій сформульовано й обґрунтовано в [66]. За допомогою цих теорем можна визначити зусилля й переміщення, які виникають при зміні площі поперечного перерізу або видаленні одного чи декількох стрижнів. Ці теореми не охоплюють типи металевих конструкцій, що відрізняються від шарнірно-стрижневих.

У [130, 131] запропоновано використовувати схеми послідовного перерахунку статично невизначуваної стрижневої системи при поетапній зміні розрахункової схеми конструкції у вигляді зміни відносної жорсткості її елементів, видаленні деяких існуючих і приєднанні нових стрижнів. Ці схеми можуть бути використані замість багаторазового виконання повного розрахунку стрижневої системи, при проектуванні в режимі діалогу людина – машина. Під час застосування цих схем із збільшенням ступеня невизначуваності конструкції і кількості її модифікацій збільшується економія комп'ютерного часу [130]. Проте алгоритм не враховує у комплексі всі види змін конструктивної схеми під час її реконструкції і підсилення (видалення й приєднання стрижнів, накладання в'язей, введення шарнірів, зміну жорсткості стрижнів) і регулювання зусиль.

У [100] зазначено, що процес створення та контролю попереднього напруження у СМК являється багатоетапним і тісно пов'язаним з послідовністю операцій по формуванню системи. При цьому можуть бути здійснені зміни розрахункової схеми у вигляді монтажу або демонтажу певних елементів конструкції, регулювання їхніх довжин, введення шарнірів, накладання в'язей, опор і зміни навантажень. Одна операція формує певну стадію монтажу, а їх сукупність без зміни розрахункової схеми – етап монтажу. У процесі розрахунку систем зміна розрахункової схеми відображається відповідною зміною матриці жорсткості.

У [100] представлено методику, що враховує такий фактор, як можливість неточного задавання вихідних даних. Цей фактор пов'язаний із тим, що в достатньо складних системах може бути невідомо завчасно, чи буде досягнуто необхідний стан попереднього напруження. Також розглянуто приклад із різними варіантами введення попереднього напруження в стрижневі елементи й представлено можливість отримати необхідні значення попереднього напруження в елементах за різними послідовностями монтажу й значень попередніх напружень. Отримані результати свідчать про значну роль послідовності монтажу і дозволяють поставити питання про вибір найкращої послідовності за деяким техніко-економічним показником [100].

Спосіб визначення зусиль від попереднього напруження “зайвих” в'язей у статично невизначуваних стрижневих конструкціях загального виду розроблено й обґрунтовано в [94]. Показано, що для розрахунку НДС конструкції від регулювання зусиль у “зайвих” в'язях конструкції, можна формувати й розв'язувати лише одну систему рівнянь методу скінченних елементів (МСЕ) з декількома правими частинами. Такий спосіб є перспективним для використання під час реконструкції і підсилення СМК, якщо врахувати перехід до подібних розрахункових схем, що незначно відрізняються одна від одної.

Виконаний аналіз джерел, які описують способи, методики і теореми для врахування змін розрахункової схеми СМК під час визначення її напружено-деформованого стану, свідчить про їхні певні недоліки – вони не охоплюють усіх типів змін конструкції, що виконуються у процесі реконструкції та підсилення СМК, або передбачають зміни матриці жорсткості з повторним розв’язуванням системи рівнянь методу скінченних елементів, що під час оптимального проектування вимагає значних затрат часу. Тому необхідні подальші дослідження алгоритмів визначення напружено-деформованого стану СМК у процесі її реконструкції і підсилення для забезпечення ефективного використання їх разом із методами оптимізації.

За результатами аналізу сучасного стану оптимального проектування і математичного моделювання реконструкції і підсилення СМК можна стверджувати таке:

1. Дослідження оптимального проектування реконструкції і підсилення СМК є епізодичними і несистемними, що свідчить про необхідність розширити множину задач оптимізації, які можна формулювати і розв’язувати під час реконструкції і підсилення СМК.

2. Для розв’язування цих задач доцільно використовувати градієнтний метод, генетичний алгоритм чи метод пошуку гармонії у залежності від типу змінних проектування.

3. Необхідно удосконалити математичну модель реконструкції і підсилення СМК, яка би враховувала увесь комплекс змін конструктивної схеми конструкції і поперечних перерізів її стрижнів, регулювання зусиль.

4. Необхідно удосконалити методику розрахунку НДС СМК, що реконструюються чи підсилюються, для ефективного використання її разом з методами оптимізації.

Розрахунок НДС СМК у процесі її реконструкції і підсилення у поєднанні з методами оптимізації, що використовують для пошуку найкращого рішення, мають значний обсяг обчислень, який неможливо

виконати вручну. Для проектування реконструкції та підсилення СМК потрібно використовувати системи автоматизованого проектування (САПР).

1.3 Системи автоматизованого проектування СМК

Сучасний розвиток методів будівельної механіки і комп'ютерних технологій дозволяє розробляти і активно застосовувати програми для автоматизованого проектування стрижневих металевих конструкцій, що зменшують трудомісткість і затрати часу на проектування конструкцій.

Для визначення НДС конструкцій у системах автоматизованого проектування використовують, зазвичай, метод скінченних елементів у формі переміщень [124, 125].

Для аналізу НДС СМК і їхнього проектування використовують різні програми, зокрема SCAD Office [53, 101], ЛІРА-САПР [7], ВК РАСК [152], NASTRAN, Femap, STAAD.Pro, FEM models, Robot Millennium. Ці програми дозволяють визначити НДС конструкцій від статичних і динамічних впливів, здійснити підбір і перевірку поперечних перерізів елементів конструкцій і можуть надавати ескізи робочих креслень тощо.

Для оптимального проектування СМК використовують вітчизняні програми САПР-ЦНИИПСК [26, 27], "ПОИСК-1" [105], "ПОИСК-2" [106], СКБ-6, "Лист-1", OptCAD [77, 79, 82], систему автоматизованого проектування конструкцій опор високовольтних ліній електропередач [149] і закордонні програми SODA, DesignSpace, COSMOS/Works 5.0, NASTRAN, ANSYS (CivilFEM), SOFiSTiK тощо.

Розвиток програмного забезпечення для розв'язування будівельних інженерних задач можна умовно поділити на три етапи.

До першого етапу розвитку програмного забезпечення віднесемо програмні системи "Каркас", "Лист-1", SODA, САПР-ЦНИИПСК [26, 27], ЛІРА-ПСМК, що були призначені для оптимального проектування поперечних перерізів деяких металевих конструкцій. Наприклад, програмні системи "Каркас", "Лист-1" визначали оптимальні параметри поперечних

перерізів колон і балок. За критерій оптимальності брали мінімум маси конструкцій.

Однією з перших програмних розробок для оптимального проектування конструкцій була відповідна підсистема програмного комплексу САПР-ЦНИИПСК, що була здана в постійну експлуатацію в 1981 р. Ця підсистема включала оптимізаційний комплекс з програм “Балка”, “Колона”, “Ферма” і “Башня” для автоматизованого проектування відповідних конструкцій і також була використана для розв’язування задач оптимізації інших конструкцій, зокрема сталевих настилів і прямокутних пластин. Оптимізаційний комплекс призначений для розв’язування двох типів задач: пошуку мінімуму функції мети в заданій області і оптимальної уніфікації і типізації СМК [26]. Для розв’язування задач першого типу використовують процедури безумовної оптимізації, лінійного і нелінійного програмування з дослідженням області оптимального розв’язку, розробленим В.М. Гордєєвим [27].

Програмний комплекс ЛІРА-ПСМК було доповнено програмним комплексом ОСС (оптимізація системи), який призначений для визначення оптимальних жорсткостей і їхніх відношень на основі моделей, що включають модулярні форми і аут-форми об’єму і вартості [74].

Програмні системи “Каркас”, “Лист-1”, SODA, САПР-ЦНИИПСК, ЛІРА-ПСМК не дозволяли визначати оптимальні параметри СМК, в тому числі для реконструкції і підсилення.

Перелік і коротку характеристику програмного забезпечення першого етапу розвитку програмного забезпечення наведено в [67].

На другому етапі розвитку програмного забезпечення можна було відшукувати оптимальні форми або геометричні параметри СМК і розміри поперечних перерізів стрижнів [50, 51, 105, 106]. До такого програмного забезпечення належить програмний комплекс, що включає стандартну програму статичного розрахунку “Міраж”, програму підбору оптимальних перерізів ПСМК і керуючу програму «Пошук Оптимальною Форми

Структурних Конструкцій» (ПОФСК). Результати оптимального проектування сталевих каркасів на основі багатокритеріальних оптимізаційних моделей у вигляді модулярних форм показали економію маси і вартості конструкції на 10-15 %.

Комплекси програм “ПОИСК-1” [105] і “ПОИСК-2” [106] призначені для оптимального проектування плоских і просторових СМК відповідно. За функцію мети автоматично приймалася маса конструкції, а інші техніко-економічні показники при необхідності вводились додатково з використанням значень площ поперечних перерізів. Для розв’язування задач оптимізації застосовувався метод неортогонального проектування градієнта з врахуванням активних обмежень і компенсації нев’язки в цих обмеженнях.

Комплекс програм “ПОИСК-2” дозволяв розв’язувати задачі оптимізації з необмеженою кількістю змінних проектування, нормативних і конструктивних (додатково введених у код програми) обмежень. За допомогою цього комплексу програм можна було здійснювати пошук нової топології системи в інтерактивному режимі: із системи послідовно вилучали вузли, що наближалися один до одного на деяку визначену невелику відстань; стрижні, осі яких зливаються або поперечні перерізи яких практично нульові [106].

У наведених програмних комплексах другого етапу розвитку не враховувались технологія і послідовність проведення будівельних робіт, зокрема з регулювання зусиль у “зайвих” в’язях СМК.

Для формулювання систем обмежень несучої здатності статично невизначуваних СМК, що враховують технологію і послідовність регулювання зусиль у “зайвих” в’язях цих конструкцій, розміри напружуючих пристроїв і розв’язування відповідних задач оптимізації були запропоновані і реалізовані на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ) алгоритми, які зменшують витрати часу проектувальника і ЕОМ на пошук розв’язку цих задач [92].

До третього етапу розвитку програм можна віднести систему

автоматизованого проектування конструкцій опор високовольтних ліній електропередач [149], об'єктно-орієнтовану експертну систему [16, 17], програмний комплекс SCAD Office [53, 101], ЛІРА-САПР [7], OptCAD [77, 79, 82] та інші.

Система автоматизованого проектування конструкцій опор високовольтних ліній електропередач була розроблена протягом 1975-1997 рр. в Донбаській Національній академії будівництва та архітектури. Ця система являє собою програмний комплекс, до якої входить підсистема розрахунку і оптимізації несучих металевих конструкцій опор у складі єдиної мережі [149]. При розрахунку проміжних і анкерно-кутових опор враховувались різні режими роботи конструкцій електромережі, зокрема – монтажні режими.

У [16, 17] представлено об'єктно-орієнтовану експертну систему, що дозволяє автоматизовано знаходити оптимальні параметри конструкцій та здійснювати вибір серед множини можливих альтернатив за обраним критерієм якості, коли ще тільки йде стадія варіантного проектування. Ця система реалізовує методику вибору оптимальних сталевих конструкцій ферм з урахуванням конструктивних, технологічних, експлуатаційних та економічних вимог, який здійснюється серед множини можливих альтернатив, що можуть відрізнятися топологією, геометрією, типами поперечних перерізів, сполученням елементів у вузлах, але мають однакові параметри, зумовлені технічним завданням.

Режим «Монтаж» програмного комплексу SCAD Office призначений для моделювання поведінки конструкції (визначення її НДС) в процесі зведення [53]. Процес зведення споруди і, відповідно розрахунків, розбивається на кілька етапів (стадій монтажу). Розрахунок кожного наступного етапу виконується з урахуванням НДС конструкції, визначеного за результатами розрахунку попередніх етапів. При переході від однієї стадії до іншої в програмі передбачена можливість включення та виключення з

моделі елементів конструкції, облік різного виду статичних і динамічних навантажень, зміна модуля пружності матеріалу, умов примикання.

Система МОНТАЖ-плюс програмного комплексу ЛІРА-САПР дозволяє провести комп'ютерне моделювання процесу зведення конструкції, простеживши послідовні зміни конструктивної схеми, установку і зняття монтажних навантажень. Інформацію про монтаж задають за допомогою трьох наборів даних: стадії, групи і додаткові навантаження. У результаті роботи системи МОНТАЖ-плюс для елементів вираховуються зусилля і напруження, що є накопиченими у процесі зведення.

Наведені програми визначають НДС і проектують СМК з урахуванням введених даних, в тому числі і геометричних параметрів конструкції, що не змінюються у процесі пошуку розв'язку. Це обмежує множину шуканих величин до підбору розмірів поперечних перерізів елементів конструкцій, типи яких наперед задано проектувальником, а методи оптимального проектування для пошуку найкращого проекту СМК не використовують.

Програми оптимізації сталевих конструкцій беруть до уваги скінчений набір невідомих параметрів, критеріїв оптимальності та нормативних обмежень. Для врахування реальних умов проектування, виготовлення, монтажу, реконструкції і експлуатації у цих програмах оптимізації потрібне втручання розробника програми в її код, що призводить до додаткових затрат часу. Для універсалізації програм оптимізації СМК реалізують спеціальні мови запису постановок задач оптимізації (МЗПЗО) [111].

Одним з перших програмних комплексів, що дозволяв в режимі діалогу з проектувальником змінювати математичну модель задачі оптимізації (зафіксувати деяку частину змінних проектування, змінити критерій оптимальності тощо) був комплекс САПР-ЦНИИПСК. Він включав розроблену мову звертання проектувальника до програми, яка складалася з невеликого списку директивних слів [27].

Ранні приклади розробки спеціалізованої проблемно-орієнтованої мови для інженерних розрахунків СМК представлено в [95]. У подальшому була

представлена МЗПЗО [85], яка забезпечує запис елементів математичної моделі задачі оптимізації у вихідних даних, параметризацію властивостей цілої стрижневої конструкції та її окремих елементів.

Для правильного застосування МЗПЗО, а також для теоретичного обґрунтування процесів, що відбуваються при компіляції виразів мови та обчисленні їхніх значень при роботі програми OptCAD, в [88] було розроблено формальне означення цієї мови, детально описано її синтаксис, семантику та використання при введенні вихідних даних програми.

Для відображення взаємозв'язку елементів математичної моделі конструкції з математичною моделлю задачі оптимізації під час розв'язання задач проектування СМК у [79] представлено схему організації алгоритмів і потоків даних для програм оптимального проектування (рис. 1.4).

Схема організації потоків даних у програмі OptCAD включає такі основні алгоритми [79]: алгоритм обчислення значень аналітичних виразів для отримання числових вихідних даних (A1); алгоритм аналізу конструкції (A2); алгоритм визначення $\bar{\psi}_{\text{норм}}$ (A3); алгоритм визначення нових значень змінних проектування $\bar{X}_n$ (A4); алгоритм розв'язання задачі оптимізації (A5).

Поділ загального алгоритму аналізу конструкції на послідовно виконувані алгоритми аналізу етапів та забезпечення доступу до значень змінних стану через механізм спеціальних функцій, що розроблений в [79], дозволяє записати у вихідних даних програми практично довільні потрібні додаткові обмеження та критерії оптимізації, а також урахувати значення змінних стану, визначених на попередніх етапах аналізу, для запису вихідних даних, що потрібні для наступних етапів роботи алгоритму аналізу [79]. Робота не враховує зміни розрахункової схеми, що характерні для реконструкції й підсилення.

Виконаний аналіз будівельних програм, які призначені для аналізу напружено-деформованого стану СМК і їхнього проектування, свідчить про необхідність розробки програмного забезпечення, що надає можливість

задавати існуючу конструкцію і визначати оптимальні способи і типи конструкцій підсилення, їхні параметри, послідовність реконструкції та підсилення за прийнятим техніко-економічним показником, враховуючи вимоги будівельних норм і параметри, зумовлені технічним завданням.

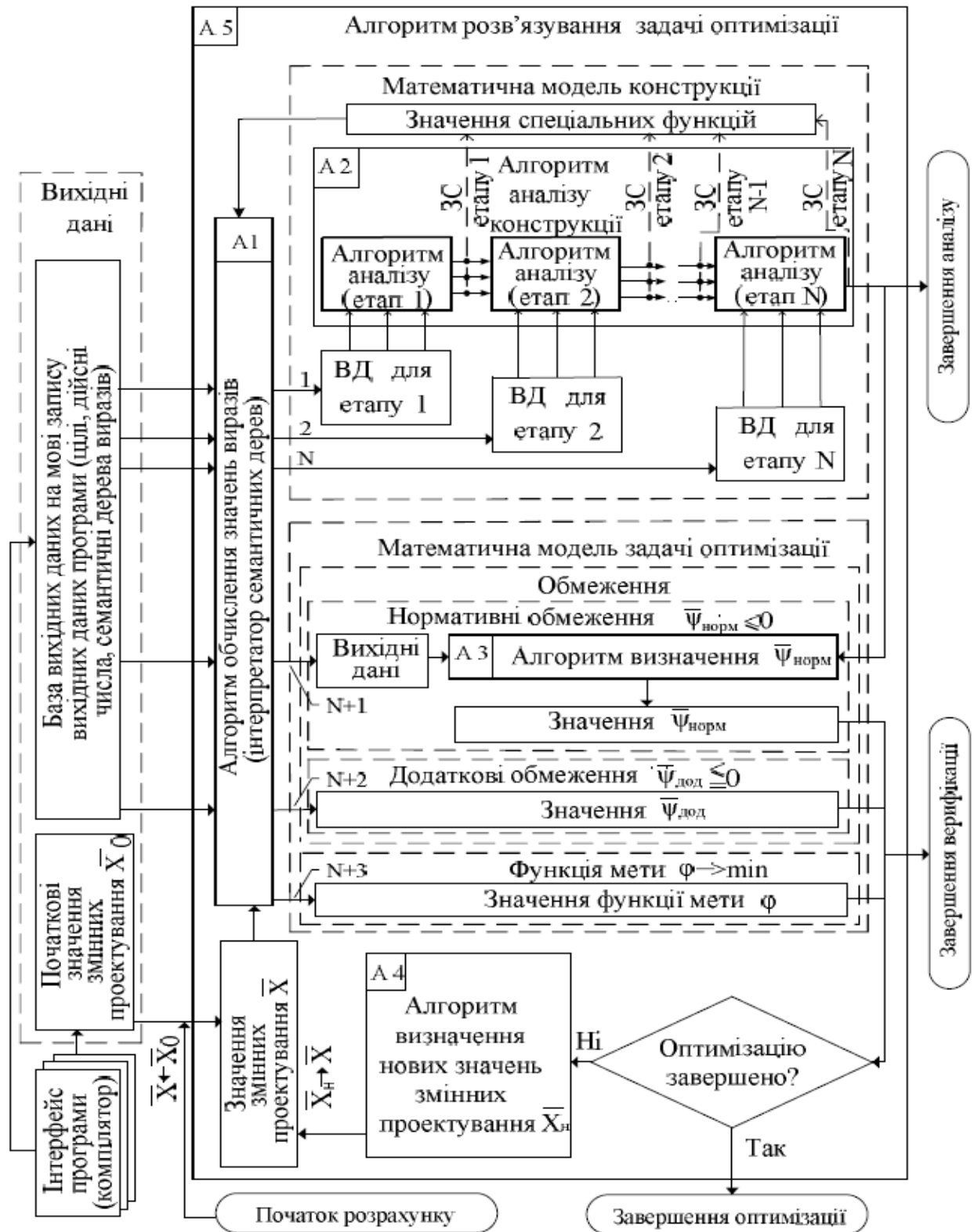


Рис. 1.4. Схема організації потоків даних у програмі OptCAD

1.4. Мета та задачі дослідження

На основі вищенаведеного можна сформулювати мету та задачі дослідження:

Метою дисертаційної роботи є розробка методики оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК з урахуванням конструктивних, технологічних, експлуатаційних і економічних вимог.

Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням таких задач:

- розробити математичну модель процесу реконструкції та підсилення СМК будівель і споруд;
- удосконалити методики визначення напружено-деформованого стану СМК та оптимізації параметрів конструкції підсилення і регулювання зусиль з урахуванням змін розрахункової схеми, способів і послідовності реконструкції та підсилення;
- розробити програмне забезпечення для оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК, яке реалізує запропоновані методики;
- виконати числові дослідження для виявлення техніко-економічної ефективності використання розробленої методики оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ СТРИЖНЕВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1. Основні розрахункові передумови й означення

У роботі прийнято такі основні розрахункові передумови:

1. Матеріал існуючої конструкції й елементів підсилення для розрахунку стрижневих систем прийнято лінійно деформованим, підпорядкованим закону Гука.

2. Розрахунок здійснюється в пружній стадії за недеформованою схемою з використанням принципу незалежності дії сил.

3. Несуча здатність елемента конструкції перевіряється відповідно до чинних нормативних документів [36-41].

4. Розглядаються стрижневі металеві конструкції із квазістатичними зовнішніми навантаженнями; динамічними ефектами цих навантажень знехтувано.

5. Розглядаються стрижневі металеві конструкції, що мають сталі на всій довжині елементів поперечні перерізи і підлягають реконструкції й підсиленню.

6. Розглядаються стрижневі металеві конструкції, загальна стійкість яких в процесі реконструкції й підсилення та подальшої експлуатації забезпечена.

7. Міцність монтажних стиків, а також вузлів з'єднання елементів СМК між собою вважається забезпеченою.

Стрижнева система – це система, яка складена зі стрижнів, що з'єднані між собою у вузлах із допомогою зварювання, заклепок, болтів або інших з'єднань.

Розрахункова схема конструкції складається із простих елементів: стрижнів, в'язей і перебуває під дією навантажень та впливів [5, 35-41, 139]. Під в'яззю розуміємо перешкоду (обмеження), що усуває можливість зміни взаємного розміщення точок або поперечних перерізів стрижневого елемента

системи за деяким напрямком [35]. Зовнішні опорні в'язі передають навантаження від споруди або конструкції на основу або на іншу незмінну споруду. Накладання в'язі на місці шарніра того ж напрямку усуває можливість зміни взаємного зміщення точок або поперечних перерізів стрижневого елемента системи за цим напрямком, а уведення шарніра на місці в'язі навпаки – дозволяє таку можливість.

2.2. Аналіз і формалізація основних способів реконструкції та підсилення СМК

З урахуванням прийнятих основних розрахункових передумов і впливу розглянутих основних способів реконструкції та підсилення на напружено-деформований стан (НДС) СМК у п. 1.1 виділено такі способи: зміна умов експлуатації, зміна конструктивної схеми, регулювання зусиль і підсилення окремих стрижнів (рис. 1.2).

Зміни конструкції й навантажень на неї, послідовність цих змін необхідно враховувати під час оптимального проектування реконструкції та підсилення. Для цього розглянуто основні способи реконструкції й підсилення як сукупність послідовних дій, які виділені в п. 1.1, і представлено їхній зв'язок із змінами розрахункової схеми СМК і прикладених до цієї схеми навантажень.

Регулювання зусиль у конструкції шляхом зміни рівня опор або уведення попереднього напруження можна враховувати як регулювання зусилля у відповідній в'язі розрахункової схеми.

Додаткові стрижні потрібно встановити в проектному положенні і приєднати до конструкції, наприклад, за допомогою зварних швів. Тобто, приєднання додаткового стрижня конструкції включає операції розміщення цього стрижня в проектному положенні й з'єднання його з конструкцією з або без регулювання зусиль. Цей процес є характерним для уведення розподільних, дублюючих, додаткових, підсилювальних елементів. Стрижень приєднують, зазвичай, до існуючих елементів конструкції, або – одним кінцем до нового фундаменту.

Операцію встановлення додаткового стрижня в проектному положенні представлено у вигляді відповідного доповнення розрахункової схеми новим стрижнем і приєднання його до інших елементів за допомогою шарнірів і в'язей так, щоб у ньому не виникали зусилля від навантажень, що прикладені до конструкції поза стрижнем. Новий стрижень, що так приєднаний до розрахункової схеми, не впливає на НДС до його з'єднання з конструкцією й до прикладання навантажень. Тому цей стрижень може існувати у всіх розрахункових схемах, зокрема й тих, що відображають зміни конструкції до приєднання цього стрижня.

Операцію з'єднання додаткового стрижня з конструкцією представлятимемо в розрахунковій схемі як накладання в'язей, що з'єднують його з іншими елементами цієї схеми. У в'язях, що накладаються, при потребі регулюють зусилля. Після накладання в'язей у новому стрижні можуть виникати зусилля від зміни навантажень.

Видалення існуючого стрижня складається із трьох операцій: знімання навантажень, що прикладені безпосередньо до стрижня, зведення до нуля його взаємодії з конструкцією й рознімання всіх його з'єднань [41] з конструкцією.

Першу операцію враховуватимемо в розрахунковій схемі як прикладання нових навантажень, що збігаються за величиною з існуючими навантаженнями на стрижень, але діють у протилежному напрямку [100].

Другу операцію представлятимемо в розрахунковій схемі у вигляді регулювання зусиль у в'язях, що з'єднують стрижень з іншими елементами цієї схеми, таким чином, щоби звести до нуля існуючі зусилля в стрижні, а також уведення шарнірів замість цих в'язей.

Після виконання третьої операції видалений стрижень залишатимемо в розрахунковій схемі. У цьому стрижні не виникатимуть зусилля від навантажень, що прикладені до конструкції поза цим стрижнем, оскільки після другої операції він шарнірно приєднаний до конструкції. Тому цей

стрижень може існувати у всіх розрахункових схемах, що відображають зміни конструкції після видалення цього стрижня.

Отже, видалення існуючих стрижневих елементів можна представляти як умовне регулювання зусиль і введення шарнірів на місці в'язей, що з'єднують ці елементи з конструкцією.

Для математичного моделювання підсилення шляхом збільшення поперечних перерізів врахуємо, що стрижень протягом реконструкції і підсилення може перебувати у декількох станах. У різних станах поперечний переріз стрижня може мати різну площу поперечного перерізу, момент опору та інші геометричні характеристики. Перехід від одного стану поперечного перерізу до іншого відбувається відповідно до технології підсилення стрижнів.

На основі проведеного аналізу дій, що пов'язані зі зміною конструктивної схеми СМК, пропонується виділяти такі відносно прості зміни розрахункової схеми як накладання в'язі, уведення шарніра, регулювання зусилля у в'язі і зміну поперечного перерізу окремих елементів конструкції.

Згідно із аналізом, що виконаний у п. 1.1, треба моделювати усі можливі зміни, що пов'язані з навантаженнями і впливами на конструкцію. У п. 1.1 навантаження і впливи, що можуть діяти на СМК у процесі виконання реконструкції й підсилення, віднесено до контрольованих або до неконтрольованих.

Зміну контрольованого навантаження представлятимемо як прикладання ще одного контрольованого навантаження, а його знімання – як введення того ж навантаження в протилежному напрямку. Вважатимемо, що ці навантаження з моменту прикладення на конструкцію діють постійно (іншими словами, до завершення експлуатації).

Неконтрольовані навантаження враховуватимемо під час формування сполучень навантажень для перевірки дотримання вимог нормативних документів [36-41, 45] під час реконструкції й підсилення.

Отже, зміни конструкції й навантажень на неї, що передбачаються згідно з проектом реконструкції й підсилення, можна представити під час розрахунку як послідовність відповідних простих змін: накладання в'язі, введення шарніра, регулювання зусилля у в'язі, зміна поперечного перерізу й прикладання контрольованого навантаження. З кожною такою зміною, зазвичай, змінюється НДС конструкції, що вимагає перевірки її існуючих і нових елементів на відповідність нормативним і додатковим вимогам, які висуваються до них. Об'єднання цих двох послідовностей представляє собою послідовність простих змін і перевірок, що будемо враховувати і виконувати. Під час розрахунку конструкції згідно із проектом реконструкції і підсилення треба враховувати певну послідовність простих змін розрахункової схеми і перевірок вимог норм.

Під час проектування реконструкції і підсилення СМК розглядають, зазвичай, певну множину варіантів реконструкції й підсилення. Під варіантом реконструкції розумітимемо впорядковану послідовність певних змін розрахункової схеми стрижневої металевої конструкції і поперечних перерізів підсилюваних стрижнів, навантажень, а також відповідних перевірок (розрахунків).

З метою забезпечення зручності опису множини варіантів реконструкції і підсилення введено поняття етапу реконструкції.

2.3. Формування етапів реконструкції

Варіант реконструкції і підсилення СМК представлено у вигляді певної послідовності етапів реконструкції [86].

Етапом реконструкції будемо вважати впорядковану неподільну найкоротшу сукупність змін розрахункової схеми і навантажень, а також відповідних перевірок (розрахунків). За допомогою етапів реконструкції можна представити як весь процес реконструкції і підсилення, так і деяку його складову (наприклад, один із застосовуваних способів підсилення).

Поняття етапу реконструкції конкретизовано у вигляді синтаксичної діаграми “етап реконструкції”, що представлена на рис. 2.1. Вона відображає

правила поєднання змін розрахункової схеми, навантажень і перевірок конструкції у деяку впорядковану послідовність.

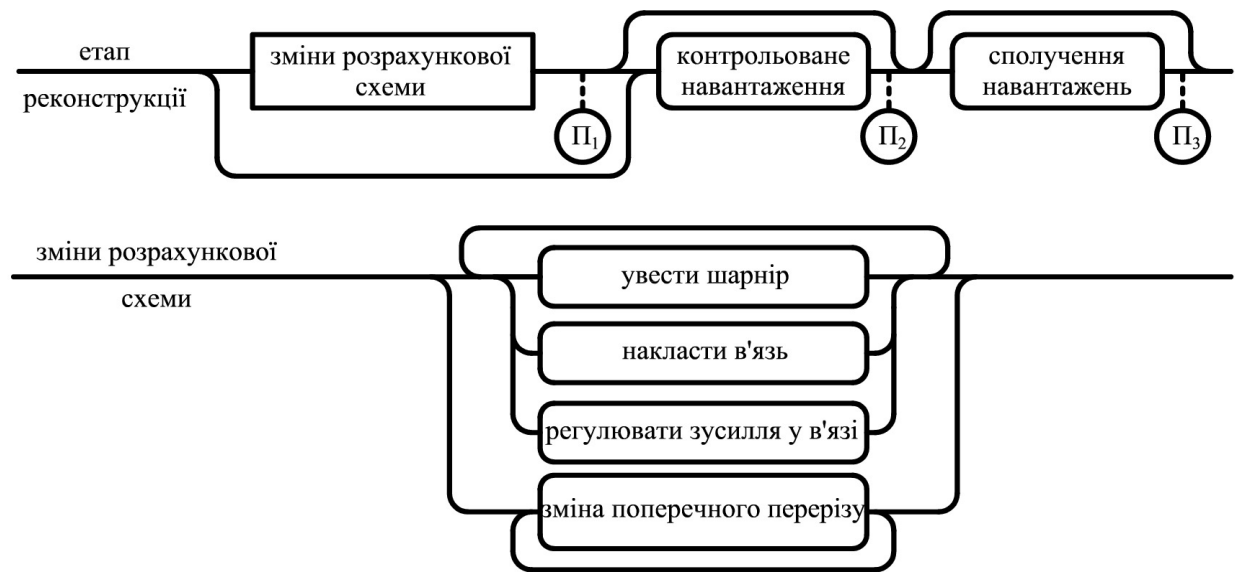


Рис. 2.1. Діаграми етапу реконструкції

Діаграма “етап реконструкції” складається із прямокутників, кіл і переходів між ними. Прямокутники діаграми відображають зміни розрахункової схеми конструкції і навантажень, що віднесені до одного етапу реконструкції. Кола представляють перевірки конструкції на відповідність вимогам, що до неї висуваються. Перевірки виконують після зміни розрахункової схеми (перевірки Π_1) і зміни навантажень (перевірки Π_2 і Π_3). Перевірки Π_2 виконуються після прикладання контрольованого навантаження, а перевірки Π_3 – після формування сполучень навантажень.

Діаграма “зміни розрахункової схеми” детально описує відповідний прямокутник діаграми “етап реконструкції” і відображає довільну послідовність простих змін розрахункової схеми: накладання в’язі, введення шарніра, регулювання зусилля у в’язі або змін поперечних перерізів. Діаграма містить чотири прямокутники, що відображають ці зміни, і переходи між ними.

Згідно із рис. 2.1 є три варіанти поєднання змін розрахункової схеми і прикладання контрольованого навантаження. У першому варіанті етап реконструкції передбачає зміни розрахункової схеми і здійснення перевірок Π_1 , у другому варіанті – прикладання контрольованого навантаження і

здійснення перевірок P_2 . Третій варіант поєднання простих змін передбачає спочатку зміни розрахункової схеми і перевірки за першим варіантом, а потім – за другим варіантом. Сполучення навантажень можна включити до етапу реконструкції, що утворений за будь-яким із розглянутих трьох варіантів.

Зауважимо, що згідно із діаграмою один етап реконструкції не може включати в себе одночасно зміну поперечних перерізів стрижнів і будь-яку із таких змін як накладання в'язі, уведення шарніра і регулювання зусилля у в'язі.

Для одного етапу можна задати не більше одного контрольованого навантаження. Наступне контрольоване навантаження можна прикладати на одному з наступних етапів реконструкції. Тому кількість прикладених контрольованих навантажень не може бути більшою за кількість етапів реконструкції.

Сполучення навантажень для певного етапу реконструкції потрібно задавати тоді, коли між цим і наступним етапом реконструкції на конструкцію можуть діяти неконтрольовані навантаження (щодо таких навантажень див. п. 2.2). Сполучення навантажень для етапу реконструкції необхідно формувати для перевірки граничного стану першої й другої групи відповідно до навантажень і впливів, що можуть діяти на конструкцію між цим і наступним етапом реконструкції.

Для визначеності зі способом задавання сполучень навантажень у процесі реконструкції спочатку розглянемо поняття розрахункового значення навантаження.

Під час служби конструкції внаслідок їхньої статичної мінливості або через порушення умов нормальної експлуатації можуть статися відхилення значень навантажень від характеристичних [68]. Ці відхилення під час розрахунку конструкцій враховують коефіцієнтами надійності за навантаженням γ_f [38]. Розрахункове значення навантаження визначають як

добуток його характеристичного значення на цей коефіцієнт, що залежить від виду навантаження.

Отже, для розрахунку НДС конструкції, що перебуває у процесі виконання робіт з реконструкції і підсилення будемо використовувати сполучення навантажень з їхніми характеристичними значеннями, а для розрахунку НДС конструкції, що перебуває під впливом короточасних навантажень і/або відбувається довготривала перерва у виконанні реконструкції – з розрахунковими значеннями навантажень.

Для перевірки граничних станів першої групи розрахункове сполучення навантажень на деякому етапі реконструкції пропонується формувати як суму двох наборів навантажень, що діють на конструкцію. Перший набір включає граничні розрахункові значення прикладених контрольованих навантажень і розрахункові значення уведених попередніх напружень цього й попередніх етапів реконструкції. Другий набір включає граничні розрахункові значення неконтрольованих навантажень, що можуть діяти на конструкцію після завершення будівельно-монтажних робіт етапу реконструкції.

Для перевірки граничних станів другої групи розрахункове сполучення навантажень на деякому етапі реконструкції пропонується формувати як суму двох наборів навантажень, що діють на конструкцію. Перший набір включає характеристичні значення прикладених контрольованих навантажень і розрахункові значення уведених попередніх напружень цього й попередніх етапів реконструкції. Другий набір включає експлуатаційні розрахункові значення неконтрольованих навантажень, що можуть діяти на конструкцію після завершення будівельно-монтажних робіт етапу реконструкції.

Сполучення навантажень для певного етапу реконструкції проектувальник повинен задавати з урахуванням того, що контрольовані навантаження й попередні напруження цього й попередніх етапів реконструкції входять у кожне розрахункове сполучення з

характеристичними значеннями й розрахунковими значеннями зусиль відповідно.

Наведемо приклад формування сполучень навантажень для деякого етапу реконструкції, якщо на конструкцію діє одне контрольоване й одне неконтрольоване навантаження. У цьому разі сполучення навантажень для перевірки граничних станів другої групи буде включати неконтрольоване навантаження з його експлуатаційним розрахунковим значенням. Сполучення навантажень для перевірки граничних станів першої групи буде включати неконтрольоване навантаження з його граничним розрахунковим значенням, а також навантаження, що відповідає прикладеному контрольованому, зі значенням, що дорівнює різниці між граничним розрахунковим і характеристичним значенням контрольованого навантаження.

Розрахунок конструкції для етапу реконструкції можна розділити на три кроки. Один крок розрахунку враховує або зміни розрахункової схеми, або прикладання контрольованого навантаження або сполучення навантажень. Кожний крок розрахунку передбачає визначення поточного НДС і виконання перевірок. Поточний НДС конструкції можна визначити як суму зусиль (переміщень) НДС на попередньому кроці розрахунку й зусиль (переміщень) від зміни конструкції або зміни діючих навантажень для поточного кроку. Зазначимо, що при такому способі розрахунку поточний НДС завжди буде враховувати попередні зміни розрахункової схеми, поперечних перерізів, прикладені контрольовані навантаження і виконані регулювання зусиль.

Перший крок розрахунку виконується, якщо для етапу реконструкції задано зміни розрахункової схеми. Цей крок передбачає визначення поточного НДС конструкції, що змінився в зв'язку зі змінами розрахункової схеми, які задані на цьому етапі реконструкції, і здійснення перевірок Π_1 .

Накладання в'язі без регулювання в ній зусилля не викликає зміни НДС СМК. Тому визначати НДС і виконувати перевірку Π_1 можна після накладання декількох в'язей. Аналогічно можна поступити під час видалення

стрижня з конструкції. Видаленню стрижня відповідає декілька простих змін розрахункової схеми – уведення в розрахункову схему одного або декількох шарнірів, що повністю виключають стрижень із роботи. Здійснювати перевірки P_1 у такому випадку можна за двома варіантами. Перший варіант передбачає здійснення цих перевірок після уведення кожного шарніра зокрема і визначення відповідного поточного НДС. Такий підхід враховує можливу зміну поточного НДС конструкції після уведення кожного з шарнірів. На практиці перевірки конструкції, іноді, виконують за другим варіантом – за її розрахунковою схемою вже без видаленого елемента. Тобто один раз визначають НДС, що відповідає конструкції без цього стрижня, і здійснюють перевірки P_1 . Так зменшують затрати часу на аналіз НДС під час реконструкції й підсилення.

Аналогічно до видалення стрижня іноді поступають за наявності декількох змін поперечних перерізів стрижнів – визначають НДС і виконують перевірки P_1 після декількох послідовних змін поперечних перерізів стрижнів розрахункової схеми конструкції.

Другий крок розрахунку здійснюється, якщо для етапу реконструкції задано контрольоване навантаження. Цей крок включає визначення поточного НДС, що змінився внаслідок прикладання контрольованого навантаження, і виконання перевірок P_2 .

Третій крок розрахунку виконується, якщо для етапу реконструкції задано сполучення навантажень. Цей крок включає визначення НДС і здійснення перевірок P_3 відповідно до сформованих проектувальником сполучень навантажень.

Під час виконання перевірок P_1 , P_2 і P_3 на етапі реконструкції треба враховувати відповідну на момент перевірки множину навантажень на конструкцію. Ця множина може об'єднувати дві множини – множину прикладених контрольованих навантажень і уведених попередніх напружень даного й попередніх етапів реконструкції та множину неконтрольованих навантажень, що можуть діяти на конструкцію після завершення будівельно-

монтажних робіт етапу реконструкції. Перша множина навантажень із кожним етапом реконструкції може розширюватися. Другу множину навантажень для кожного етапу реконструкції потрібно формувати відповідно до навантажень і впливів, що можуть діяти на конструкцію після завершення будівельно-монтажних робіт етапу реконструкції.

Під час виконання перших двох кроків розрахунку конструкції для етапу реконструкції необхідно враховувати тільки першу множину навантажень. Ця множина на другому кроці розрахунку відрізняється від відповідної множини на першому кроці розрахунку для того ж етапу реконструкції наявністю додаткового контрольованого навантаження. При виконанні третього кроку розрахунку для етапу реконструкції потрібно враховувати першу й другу множини навантажень.

Під час виконання кожного кроку розрахунку конструкції для етапу реконструкції згідно з [37] необхідно враховувати коефіцієнт надійності за відповідальністю γ_n , який, зокрема, залежить від розрахункової ситуації. Враховуючи вимоги цих норм, пропонується на кожному кроці розрахунку на кожному етапі реконструкції виконувати розрахунки як для перехідної розрахункової ситуації, а для останнього кроку розрахунку на останньому етапі реконструкції – як для усталеної розрахункової ситуації. Наприклад, згідно з [37] для конструкції, що має клас наслідків (відповідальності) СС2 і категорію відповідальності А, коефіцієнт γ_n для усталеної розрахункової ситуації для першої групи граничних станів дорівнює 1,1, для другої групи – 0.975, а для перехідної – 0.975 і 0.95 відповідно.

2.4. Формалізація процесу реконструкції, змін розрахункових схем і навантажень

На основі проведеного аналізу розроблено й представлено на рис. 2.2. діаграми процесу реконструкції.

На діаграмі «процес реконструкції» (рис. 2.2) виділено дві послідовні частини: формування початкової розрахункової схеми й задавання етапів

реконструкції. Обидві частини опису процесу реконструкції представляються певною послідовністю етапів реконструкції. Згідно з рис. 2.2 завжди в процесі реконструкції є щонайменше один етап реконструкції.

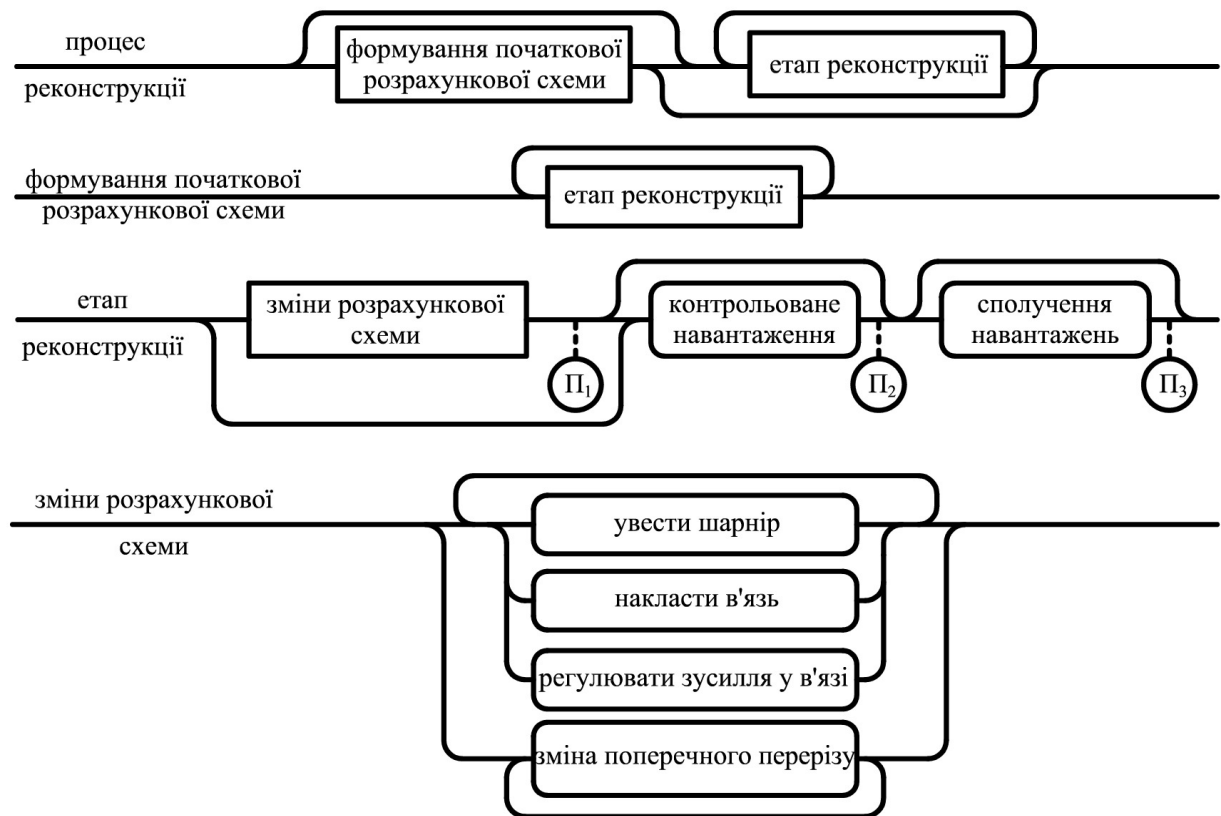


Рис. 2.2. Діаграми процесу реконструкції

Перша частина опису процесу реконструкції враховує те, що до початку підсилення конструкція вже могла бути реконструйованою й підсиленою, деформованою й пошкодженою. За цим описом можна визначити НДС, що виникає в СМК перед початком виконання запроектованих робіт із реконструкції й підсилення. Відповідну розрахункову схему названо початковою. Формування початкової розрахункової схеми виконується за однойменною діаграмою на рис. 2.2.

Друга частина опису процесу реконструкції призначена для задавання процесу реконструкції, що проектується. Процес реконструкції описують таким чином, щоб після останнього етапу реконструкції отримати бажану розрахункову схему, а всі навантаження, що будуть діяти на СМК у

подальшій її експлуатації, були прикладені до цієї схеми. Цю схему названо кінцевою розрахунковою схемою, а відповідні навантаження – кінцевими. Для перевірки підсиленої СМК на сполучення навантажень, що можуть діяти під час подальшої її експлуатації, відповідні сполучення залучають до останнього етапу реконструкції.

Другу частину опису не задають тоді, коли виконується лише перевірка відповідності СМК вимогам норм, що до неї висуваються, з урахуванням наявних дефектів, пошкоджень, раніше здійснюваної реконструкції і підсилення та прикладання додаткових навантажень.

Діаграми на рис. 2.2 відображають зміни розрахункової схеми СМК у процесі її реконструкції й підсилення. Розрахункові схеми, що утворюються в процесі реконструкції, є подібними, оскільки вони відповідають одній СМК на різних етапах її реконструкції й підсилення.

Як було зазначено в п. 2.2, видалення існуючих і приєднання нових стрижнів можна представити як ліквідацію і накладання в'язей відповідно. Отже, під час проектування реконструкції й підсилення можна розглядати розрахункові схеми зі сталою кількістю стрижнів, які відрізняються шарнірами й в'язями, що приєднують видалені й нові стрижні до інших елементів цих схем.

Наведемо розроблений формалізований спосіб представлення змін розрахункових схем, що відображені в діаграмах процесу реконструкції.

Для СМК під час реконструкції й підсилення можуть виконувати m змін конструкції у вигляді накладання в'язей, введення шарнірів, приєднання нових чи видалення існуючих стрижнів, регулювання зусиль і зміни поперечної площі стрижнів. Ці зміни можна представити як певні дії з деякими існуючими в'язями й шарнірами, а також із в'язями, які приєднують нові й видалені стрижні до інших елементів схем. До таких дій можна віднести накладання в'язі, відкидання в'язі (уведення шарніра), а також регулювання зусилля в існуючій в'язі або у в'язі, що замикається.

При переході від i -ї розрахункової схеми до наступної $i+1$ -ї схеми треба враховувати як в'язі, якими ці схеми можуть відрізнятися, так і дії над цими в'язями.

Множину в'язей, які потрібно накласти в i -й розрахунковій схемі для переходу до схеми $i+1$, позначимо через L_i^+ , а множину в'язей, які потрібно видалити – через L_i^- . Для двох послідовних розрахункових схем прийнято, що $L_i^+ \cap L_i^- = \emptyset$, $L_i^+ \neq \emptyset \Rightarrow L_i^- = \emptyset$, $L_i^- \neq \emptyset \Rightarrow L_i^+ = \emptyset$. При регулюванні зусилля в існуючій в'язі $L_i^+ = \emptyset$ і $L_i^- = \emptyset$, а при регулюванні зусилля у в'язі, що утворюється замиканням шарніра, $|L_i^+| = 1$.

Нехай L_i – множина в'язей, що накладені в i -й розрахунковій схемі. Тоді множину накладених в'язей L_{i+1} у наступній, $i+1$ -й розрахунковій схемі можна отримати за формулою

$$L_{i+1} = \begin{cases} L_i \cup L_i^+, \text{ при } L_i^- = \emptyset, L_i^+ \neq \emptyset; \\ L_i \setminus L_i^-, \text{ при } L_i^- \neq \emptyset, L_i^+ = \emptyset; \\ L_i, \text{ при } L_i^- = \emptyset, L_i^+ = \emptyset. \end{cases} \quad (2.1)$$

Зауважимо, що розрахункові схеми для всіх множин в'язей L_i мають бути геометрично незмінюваними системами.

Отже, під час розгляду розрахункових схем, що виникають під час проектування реконструкції й підсилення СМК, як схем зі сталою кількістю стрижнів, можна i -у розрахункову схему утворити з попередньої, змінюючи множину накладених в'язей і характеристики поперечних перерізів стрижнів. Зауважимо, що кінцеву розрахункову схему можна утворити з початкової після врахування за формулою (2.1) m змін конструкції [98].

Розглянемо зміни навантажень, що прикладені до СМК. Вони можуть відбутись в обох частинах опису процесу реконструкції: під час формування початкової розрахункової схеми і на етапах реконструкції, що проектується (рис. 2.2). У першій частині прикладатимемо контрольовані навантаження,

які відповідають початковим навантаженням [113], що діють на конструкцію перед початком виконання будівельно-монтажних робіт із реконструкції й підсилення. У другій частині – всі інші навантаження і впливи згідно з послідовністю будівельно-монтажних робіт і подальшою експлуатацією.

Загальну кількість етапів реконструкції за деяким варіантом проекту реконструкції і підсилення можна визначити за формулою

$$K = K_1 + K_2. \quad (2.2)$$

де K_1 – кількість етапів реконструкції в першій частині опису процесу реконструкції, а K_2 – у другій частині.

Уведемо позначення для навантажень. Довільне навантаження на конструкцію позначимо через P , контрольовані навантаження – P^g , неконтрольовані – P^q .

Множину контрольованих навантажень P^g , які необхідно враховувати під час проектування реконструкції і підсилення СМК, можна визначити за формулою

$$P^g = \bigcup_{i=1}^K P_i^g, \quad (2.3)$$

де P_i^g – множина контрольованих навантажень, що прикладаються на i -у етапі реконструкції. Зауважимо, що $|P_i^g| = 1$ або $|P_i^g| = 0$.

Множину неконтрольованих навантажень P^q , які необхідно враховувати під час проектування реконструкції і підсилення СМК, можна визначити за формулою

$$P^q = \bigcup_{i=1}^K P_i^q, \quad (2.4)$$

де P_i^q – множина неконтрольованих навантажень, що прикладаються на i -у етапі реконструкції. Зауважимо, що $|P_i^q| \geq 0$.

Загальну множину навантажень P^z , що необхідно враховувати під час проектування реконструкції і підсилення СМК, можна визначити за формулою

$$P^z = P^g \cup P^q. \quad (2.5)$$

Нехай $P^{g,i}$ – множина контрольованих навантажень, що діють на конструкцію після i -го етапу реконструкції. Згідно з описаними у п. 2.2 особливостями контрольованих навантажень $P^{g,i}$ визначається за формулою

$$P^{g,i} = P^{g,i-1} \cup P_i^g. \quad (2.6)$$

Отже, з кожним етапом реконструкції множина $P^{g,i}$ прикладених контрольованих навантажень розширюється.

З урахуванням наведеної формалізації процесу реконструкції, запропонованого представлення змін розрахункових схем і навантажень розроблено математичну модель реконструкції і підсилення стрижневих металевих конструкцій.

2.5. Математична модель реконструкції та підсилення СМК

Вважається [79, 111], що математична модель є заданою, якщо описано її основні складові: вихідні дані, змінні стану і алгоритм аналізу об'єкта проектування.

До вихідних даних математичної моделі реконструкції і підсилення СМК включено дані, що описують: розрахункову схему існуючої конструкції, яка містить у проектному положенні всі стрижні (існуючі, тимчасові, видалені й додані); усі навантаження і впливи; процес реконструкції і підсилення.

Для опису розрахункової схеми конструкції необхідно задати вузли, усі стрижні і параметри всіх станів їхніх поперечних перерізів, шарніри, опори, внутрішні в'язі, за допомогою яких представляється зміна розрахункової схеми (див. п. 2.4), типи жорсткості, матеріали тощо.

Усі навантаження і впливи, що можуть діяти на конструкцію у будь-якому з варіантів її реконструкції і підсилення, треба задавати як контрольовані (множина P^g) і неконтрольовані (множина P^q) навантаження. За допомогою неконтрольованих навантажень необхідно формувати і задавати сполучення навантажень для етапів реконструкції так, як це запропоновано у п. 2.3. Під час задавання сполучень навантажень вказувати розрахункову ситуацію.

Для опису процесу реконструкції і підсилення СМК необхідно задати етапи реконструкції і вказати можливі варіанти їх поєднання у впорядковану послідовність (див. рис. 2.2), що відображає ту чи іншу технологію будівельно-монтажних робіт, враховує той чи інший спосіб підсилення. Під час цього опису необхідно спочатку задавати етапи реконструкції для формування початкової розрахункової схеми.

Етапи реконструкції треба описувати так, як це запропоновано у п. 2.3 на відповідній синтаксичній діаграмі (рис. 2.1), що відображає правила поєднання змін розрахункової схеми, навантажень і перевірок конструкції у деяку впорядковану послідовність.

Для виконання перевірок Π_1 , Π_2 і Π_3 необхідно задати вимоги норм, що висуваються до цих конструкцій під час їхньої реконструкції і підсилення, а також вказати додаткові обмеження.

До змінних стану включено множину величин, які залежать від параметрів входу й необхідні для аналізу стану конструкції в процесі її реконструкції і підсилення (епюри зусиль і переміщень, техніко-економічні показники варіантів реконструкції і підсилення на етапах реконструкції).

Алгоритм аналізу реконструкції і підсилення передбачає розрахунок СМК на кожному етапі реконструкції. Розроблено блок-схему визначення НДС СМК під час її реконструкції і підсилення, яка на одному етапі реконструкції передбачає три кроки розрахунку, що описані в п. 2.3 (рис. 2.3). На кожному кроці розрахунку НДС конструкції визначають як суперпозицію поточних зусиль, що виникають від прикладених

контрольованих і змінних навантажень, а також від здійснених регулювань зусиль у поточній розрахунковій схемі.

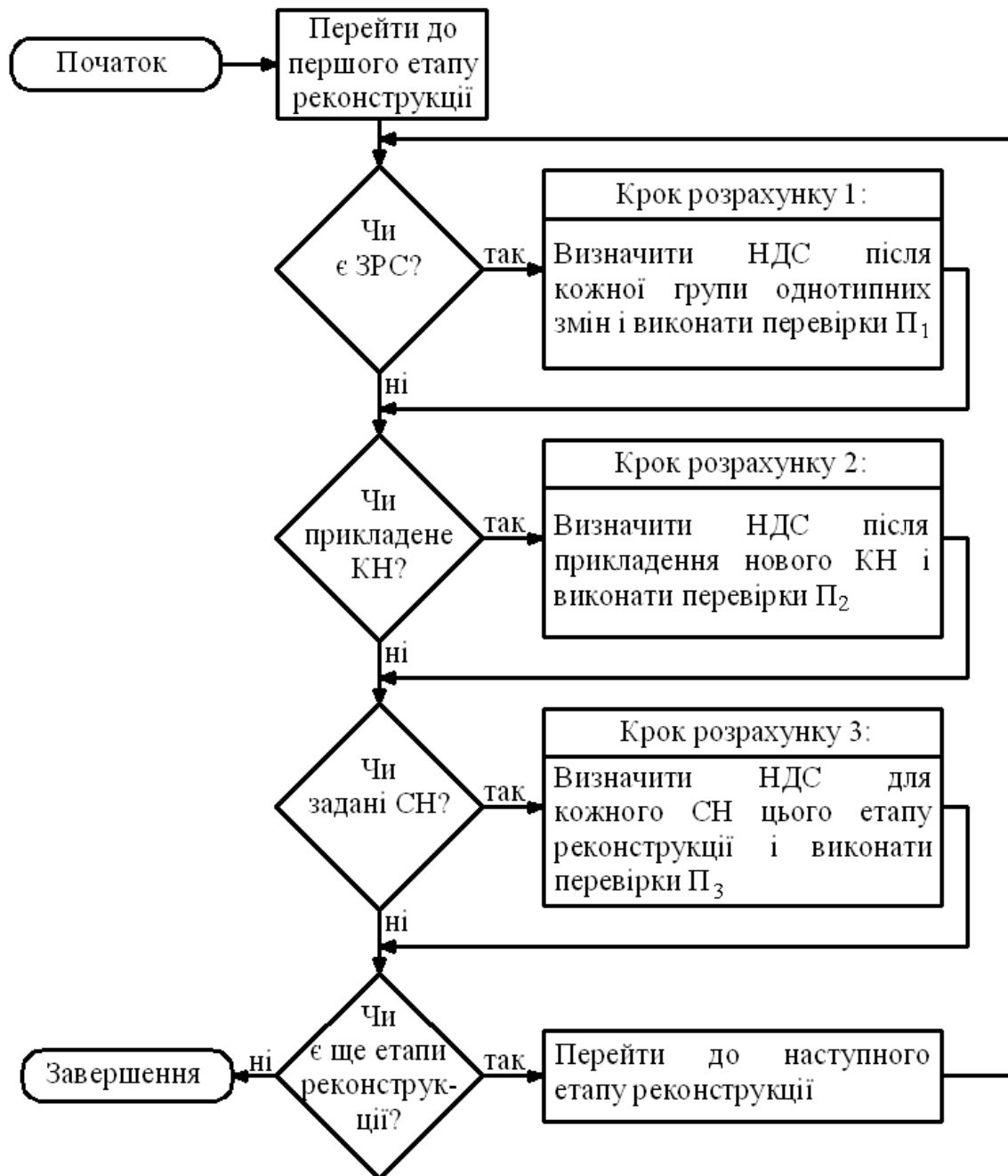


Рис. 2.3. Блок-схема визначення НДС СМК під час її реконструкції і підсилення (ЗРС – зміни розрахункової схеми, КН – контрольоване навантаження, СН – сполучення навантажень)

Розроблена математична модель реконструкції і підсилення СМК дозволяє враховувати різні способи реконструкції і підсилення, технології будівельно-монтажних робіт, використовуючи дані однієї розрахункової схеми з існуючими, тимчасовими і доданими стрижнями, а також дані, що

описують зміни цієї схеми і прикладених навантажень. Оскільки алгоритм аналізу цієї моделі передбачає по три розрахунки НДС СМК на кожному етапі реконструкції, то для зменшення обсягу обчислень, що є під час використання методів оптимізації, необхідно продовжити розробку ефективних алгоритмів розрахунку конструкцій.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Запропоновано представляти процес реконструкції СМК як послідовність простих змін розрахункової схеми і навантажень, що впорядковані відповідно до послідовності будівельно-монтажних робіт. Розроблено графічне представлення процесу реконструкції й підсилення у вигляді діаграм.

2. Формалізовано представлення розрахункових схем конструкції, що підлягає реконструкції й підсиленню. Для цього запропоновано використовувати розрахункову схему, яка містять у проектному положенні всі стрижні конструкції (існуючі, тимчасові, видалені й додані). Розрахункові схеми на різних етапах відрізняються від цієї розрахункової схеми й між собою жорсткісними характеристиками підсилюваних стрижнів і множиною накладених внутрішніх в'язей.

3. Розроблено математичну модель реконструкції й підсилення стрижневих металевих конструкцій, що дозволяє враховувати різноманітні параметри, що впливають на розподіл зусиль у СМК, визначаються під час проектування і вказуються у проектній документації.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СМК ПІД ЧАС ЇХНЬОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ

3.1. Основні положення визначення НДС СМК під час реконструкції та підсилення

Під час оптимізації розраховують, зазвичай, декілька варіантів реконструкції та підсилення однієї СМК, які можуть відрізнятися змінами розрахункової схеми. Для одного варіанта, зазвичай, треба визначати НДС для декількох розрахункових схем. Розрахунок значень цільової функції й функцій обмежень передбачає визначення НДС СМК, що у свою чергу вимагає формування й розв'язування системи рівнянь одного з методів будівельної механіки, наприклад, методу скінченних елементів (МСЕ) [5]. Обсяг розрахунків для визначення НДС становить велику частку у загальному обсязі обчислень під час оптимізації стрижневих систем [102].

У пункті 1.2 наведено результати аналізу способів, методик і теорем [66, 94, 100, 130, 131], що дозволяють зменшити обсяги обчислень для визначення НДС СМК з урахуванням змін розрахункової схеми. Виконаний аналіз показав необхідність удосконалення методики визначення НДС СМК для урахування змін розрахункової схеми під час реконструкції та підсилення.

На основі аналізу цих праць, формалізації розрахункових схем і процесу реконструкції та підсилення СМК, що запропоновані в пункті 2.4, сформульовано основні положення визначення НДС СМК.

Під час визначення НДС СМК у процесі реконструкції і підсилення пропонується використовувати *множину розрахункових в'язей L , базову розрахункову схему (БРС) і одиничні базові епюри (ОБЕ)*.

Під час проектування реконструкції і підсилення послідовно розглядаються зміни розрахункової схеми СМК. Зміна розрахункової схеми –

це одна з таких груп відносно простих змін одного типу: накладання в'язей (ліквідація шарнірів); уведення шарнірів (вилучення в'язей); регулювання зусиль у в'язях; зміна поперечних перерізів (підсилення) стрижнів. Допускається більше ніж одна проста зміна в групі, якщо під час реалізації цих змін задовольняються вимоги нормативних документів [36-41] до конструкції.

Формування множини L . До множини L для кожної k -ї зміни розрахункової схеми пропонується залучати одну з таких множин в'язей відповідно до типу k -ї зміни: L_a^k – множину накладених в'язей; L_s^k – множину вилучених в'язей; L_r^k – множину в'язей, в яких регулюється зусилля; L_d^k – множину в'язей, що використовуються для врахування змін поперечних перерізів (параметрів жорсткості) стрижнів.

Множина L_d^k – це множина таких в'язей, що заміна їх на шарніри виділяє посилювані стрижні статично визначеним чином, тобто так, щоб для визначення зусиль в підсиленних стрижнях від довільних зовнішніх навантажень на ці стрижні було достатньо тільки рівнянь рівноваги. Кількість в'язей в L_d^k вибирають мінімальною, що забезпечує відносно невеликі обсяги обчислень. Під час формування L_d^k треба враховувати раніше виконані зміни, щоб після вилучення в'язей L_d^k утворилася геометрично незмінна система. Потреба в множині L_d^k викликана особливостями пропонованої методики визначення НДС СМК.

Враховуючи сказане, множину L можна визначити за формулою (3.1)

$$L = \bigcup_{k=2}^{N_C} L_{\Delta}^k, \quad (3.1)$$

де L_{Δ}^k – множина, що дорівнює одній із множин L_a^k , L_s^k , L_r^k , L_d^k відповідно до типу k -ї зміни; N_C – кількість змін розрахункової схеми, які розглядаються під час проектування варіанта реконструкції та підсилення.

Фактично під час реконструкції і підсилення виконуються $N_C - 1$ змін розрахункової схеми, а зміна $k = 1$ виділена окремо для зручності викладу методики розрахунку.

Якщо під час проектування вибір здійснюється з декількох варіантів реконструкції і підсилення СМК, то множину L треба формувати як об'єднання множин L_Δ^k , які визначаються для всіх змін, що виконуються у всіх варіантах.

Кількість в'язей у множині L позначено N_L ($N_L = |L|$, де $|L|$ – потужність множини L).

У подальшому тексті розділу 3 йдеться про в'язі з множини L , якщо явно не вказано інше.

Означення БРС. БРС – це розрахункова схема, що містить існуючі перед початком реконструкції і підсилення стрижні конструкції (зокрема, ті, що будуть видалятися або підсилюватися шляхом збільшення площі поперечного перерізу під час реконструкції), нові й тимчасові стрижні, а також накладені всі в'язі з множини розрахункових в'язей L , яка визначається за залежністю (3.1). Підсилювані стрижні в БРС мають параметри жорсткості перерізів до збільшення площі.

БРС (її позначено C^0) може відрізнятися від початкової розрахункової схеми (її позначено C^1), з якої починається реальний процес реконструкції і підсилення. Тому у формулі (3.1) в об'єднання не включено першу зміну ($k = 1$), яка забезпечує перехід від C^0 до C^1 , але не має відповідника в реальному процесі реконструкції і підсилення. Початкову розрахункову схему C^1 можна отримати з розрахункової схеми C^0 (з БРС) відкиданням певних “зайвих” в'язей, що належать множині L , визначеній за формулою (3.1). Розрахункову схему, що утворюється після k -ї зміни, позначимо C^k .

Схему C^k можна утворити з БРС, відкидаючи в'язі з множини L_h^k ($L_h^k \subset L$) і змінюючи параметри поперечних перерізів підсилених стрижнів, тобто схемі C^k відповідає певна множина L_h^k відкинутих в'язей. В результаті вилучення в'язей множини L_Δ^k з розрахункової схеми C^{k-1} для $k = \overline{1, N_C}$ повинна утворюватися геометрично незмінна система.

Зусилля у БРС. На БРС прикладають усі навантаження і впливи, що діють на конструкцію на всіх стадіях життєвого циклу [8] – до, під час і після її реконструкції та підсилення. Після розрахунку БРС отримують переміщення й зусилля, які названо базовими. Відповідні епюри також названо базовими.

Базові зусилля і епюри позначено верхнім індексом b . Вектор $\overline{S_m^b}$ зусиль на початку стрижня m

$$\overline{S_m^b} = \left\| N_m \quad Q_{ym} \quad Q_{zm} \quad M_{xm} \quad M_{ym} \quad M_{zm} \right\|^T, \quad (3.2)$$

де N_m – поздовжня сила; Q_{ym} і Q_{zm} – поперечні сили за напрямками осей Oy і Oz поперечного перерізу цього стрижня відповідно; M_{xm} – крутний момент відносно осі Ox ; M_{ym} і M_{zm} – згинальні моменти відносно осей Oy і Oz відповідно; T – ознака транспонування матриці.

Базову епюру зусиль у конструкції можна представити з використанням $\overline{S_m^b}$, $m = \overline{1, N_S}$ у векторній формі так

$$S^b = \left\| \begin{array}{c} \overline{S_1^b} \\ \overline{S_2^b} \\ \dots \\ \overline{S_{N_S}^b} \end{array} \right\|, \quad (3.3)$$

де N_S – кількість стрижнів конструкції.

Базові зусилля у довільному поперечному перерізі, а також у внутрішніх в'язях стрижня m визначають за відомими залежностями [5] і значеннями зусиль $\overline{S_m^b}$ та місцевих навантажень на цей стрижень. Одиничні базові епюри позначено верхнім індексом u . ОБЕ S_j^{bu} – це одинична епюра зусиль у допоміжній розрахунковій схемі C_j^0 , що утворюється з БРС C^0 відкиданням однієї j -ї в'язі, від прикладання пари позавузлових протилежних за напрямком одиничних сил, що знаходяться на стрижні нескінченно близько від відкинутої j -ї в'язі. Матрицю, стовпці якої утворені з ОБЕ S_j^{bu} для всіх в'язей з множини L ($j = \overline{1, N_L}$), позначимо $\|S^{bu}\|$.

НДС СМК від навантажень розрахункових схем C^k ($k = \overline{1, N_C}$) пропонується визначати за дві стадії: 1) формувати і розв'язувати одну систему рівнянь МСЕ для отримання базових зусиль і переміщень у схемі C^0 ; 2) використовувати отриманий розв'язок під час розрахунку зусиль і переміщень для схем C^k .

Систему рівнянь МСЕ записують у формі методу переміщень з декількома правими частинами [112]

$$\|K\| \|\Delta\| = \|R\|, \quad (3.4)$$

де $\|K\|$ – матриця жорсткості; $\|\Delta\|$ – матриця вузлових переміщень, $\|R\|$ – матриця вузлових реакцій.

Кількість N_R стовпців матриць $\|\Delta\|$ і $\|R\|$ є однаковою і дорівнює сумі кількостей контрольованих, неконтрольованих (змінних) і допоміжних навантажень.

У результаті розв'язування системи рівнянь (3.4) отримують матрицю $\|\Delta\|$, на основі якої визначають дві матриці базових епюр: матрицю базових епюр від зовнішніх навантажень $\|S^{bp}\|$ (зі стовпцями S_j^{bp} , $j = \overline{1, N_p}$) і

матрицю одиничних базових епюр $\|S^{bu}\|$ (зі стовпцями S_j^{bu} , $j = \overline{1, N_L}$).

Отримані зусилля і переміщення будуть використані під час перевірки відповідності СМК вимогам норм і додаткових обмежень.

Для розрахунку ОБЕ використано спосіб визначення зусиль від одиничного навантаження запропонований у [94, 98], що дозволяє формувати і розв'язувати одну систему рівнянь МСЕ, враховуючи при цьому різні розрахункові схеми для визначення ОБЕ.

Згідно з цим способом зусилля S_j^{bu} у межах стрижня m , на якому розміщена j -а в'язь, отримують за залежністю (3.5), а для усіх інших стрижнів – за залежністю (3.6):

$$S_j^{bu} = \frac{S_j^{zu} + S_j^{du}}{1 + s_{jj}^{zu}}, \quad (3.5)$$

$$S_j^{bu} = \frac{S_j^{zu}}{1 + s_{jj}^{zu}}, \quad (3.6)$$

де S_j^{zu} – зусилля у БРС від навантаження силами P_j^z ; P_j^z – сили, що отримані зведенням позавузлових одиничних навантажень до вузлових [112] в основній системі C_j^d методу переміщень для розрахункової схеми C_j^0 ; s_{jj}^{zu} – зусилля у перерізі із “зайвою” j -ю в'яззю для епюри S_j^{zu} ; S_j^{du} – зусилля у C_j^d від відповідної пари одиничних сил, яке визначають окремо для стрижня m , без аналізу стержневої системи у цілому [94].

Для визначення S_j^{zu} та s_{jj}^{zu} використовують розв'язок системи рівнянь МСЕ, складеної для БРС. У правій частині $\|R\|$ цієї системи рівнянь враховують навантаження P_j^z , де $j = \overline{1, |L|}$, $|L| \geq 1$.

На другій стадії для всіх розрахункових схем, що виникають під час реалізації одного варіанта реконструкції та підсилення, послідовно визначають НДС СМК. Для цього пропонується використовувати базові

зусилля й переміщення, що визначені на першій стадії, а також властивості стрижневих систем, що підлягають принципу суперпозиції [5].

Зусилля, що виникають від деякого навантаження в різних розрахункових схемах, зазвичай, відрізняються. Зусилля також залежать від послідовності прикладання навантажень і змін розрахункової схеми під час реконструкції і підсилення. Будь-яку епюру, що отримується внаслідок розрахунку розрахункової схеми S^k на навантаження, позначимо S^k .

Для визначення поточних зусиль S_j^k прийнято, що будь-яку епюру зусиль S_j^k від навантаження, яке прикладене до k -ї зміни розрахункової схеми, можна визначати як суму епюри S_j^{k-1} від цього навантаження і лінійної комбінації [64] одиничних базових епюр S_i^{bu} , де $i = \overline{1, N_L}$. Це можна представити так

$$S_j^k = S_j^{k-1} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^k}, \quad (3.7)$$

де $\overline{\chi_j^k}$ – вектор коефіцієнтів лінійної комбінації (КЛК) одиничних базових епюр для визначення епюри S^k .

Залежність (3.7) може бути використана для визначення зусиль S_j^k від певного навантаження для змін розрахункової схеми, що виконуються після прикладання цього навантаження.

З урахуванням формули (3.7) розв'язано таку задачу: отримати залежність зусиль S_j^k від базових зусиль S_j^b і $\|S^{bu}\|$.

Якщо навантаження прикладається між k_1 -ю і $k_1 + 1$ зміною розрахункової схеми, то зусилля $S_j^{k_1}$ ($k = k_1$) можна записати так

$$S_j^{k_1} = S_j^b + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^{k_1}}. \quad (3.8)$$

Зусилля $S_j^{k_1+1}$ після наступної зміни ($k = k_1 + 1$) можна записати так

$$S_j^{k_1+1} = S_j^{k_1} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^{k_1+1}}. \quad (3.9)$$

Підставивши вираз для $S_j^{k_1}$ з формули (3.8) у залежність (3.9), отримаємо

$$S_j^{k_1+1} = S_j^b + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^{k_1}} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^{k_1+1}}. \quad (3.10)$$

Послідовно переходячи до k -ї зміни конструкції ($k > k_1$), отримаємо

$$S_j^k = S_j^b + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^{k_1}} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^{k_1+1}} + \dots + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\chi_j^k}. \quad (3.11)$$

Позначимо $\overline{\gamma_j^k} = \overline{\chi_j^{k_1}} + \overline{\chi_j^{k_1+1}} + \dots + \overline{\chi_j^k}$ – вектор КЛК ОБЕ, що використовується для визначення зусиль S_j^k після k -ї зміни конструкції. Тоді залежність (3.11) перепишемо у вигляді:

$$S_j^k = S_j^b + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_j^k}. \quad (3.12)$$

З урахуванням послідовності змін конструкції $\overline{\gamma_j^k}$, де $k > k_1$, можна визначити за рекурентною формулою:

$$\overline{\gamma_j^k} = \overline{\gamma_j^{k-1}} + \overline{\chi_j^k}. \quad (3.13)$$

Для $k = k_1$ прийнято, що $\overline{\gamma_j^{k-1}} = \bar{0}$, де $\bar{0}$ – нульовий вектор.

Розв'язком задачі є залежність (3.12), де коефіцієнти $\overline{\gamma_j^k}$ визначаються за залежністю (3.13).

Враховуючи, що для одиничних епюр S_j^b збігається з одним із стовпців матриці $\|S^{bu}\|$, то формулу (3.12) можна записати для одиничної епюри $S_j^{u,k}$ для поточної розрахункової схеми C^k у формі (3.14)

$$S_j^{u,k} = \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_j^{u,k}}, \quad (3.14)$$

де $\overline{\gamma_j^{u,k}}$ відрізняється від $\overline{\gamma_j^k}$ елементом $\gamma_{jj}^{u,k} = \gamma_{jj}^k + 1$.

Одинична епюра $S_j^{u,k}$ – це епюра, що виникає у розрахунковій схемі C_j^k від одиничного навантаження, що прикладається аналогічно до прикладання навантажень під час побудови одиничної епюри S_j^{bu} . Для в'язей, що вилучені, C_j^k збігається з C^k , а для накладених в'язей C_j^k утворюється вилученням j -ї в'язі з C^k . Розрахункові схеми C_j^k ($k = \overline{1, N_C}$) мають бути геометрично незмінюваними.

Узагальнюючи залежність (3.14) для всіх одиничних навантажень $j = \overline{1, N_L}$, отримаємо:

$$\|S^{u,k}\| = \|S^{bu}\| \cdot \|\gamma^{u,k}\|, \quad (3.15)$$

де $\|S^{u,k}\|$ – матриця одиничних епюр $S_j^{u,k}$, де $j = \overline{1, N_L}$; $\|\gamma^{u,k}\|$ – матриця векторів $\overline{\gamma_j^{u,k}}$, де $j = \overline{1, N_L}$.

Одночасно з $\overline{\gamma_j^k}$ для змін поперечних перерізів визначається $\overline{\beta_j^k}$ за залежністю (3.16)

$$\overline{\beta_j^k} = \overline{\beta_j^{k-1}} + \overline{\chi_j^k}, \quad (3.16)$$

Для інших змін розрахункової схеми приймається $\overline{\beta_j^k} = \overline{\beta_j^{k-1}}$.

Вектор $\overline{\beta_j^k}$ використовується для врахування впливу зміни жорсткості підсиленних стрижнів на зусилля S_j^k і переміщення під час наступних змін розрахункової схеми.

Під час розрахунку варіанта реконструкції та підсилення перевіряють відповідність конструкції вимогам норм [36-41] для усіх розрахункових схем.

Для визначення сполучень зусиль, що використовуються для перевірки нормативних вимог до СМК, пропонується використовувати залежність (3.7), у якій базові зусилля стають відомими після розв'язування системи рівнянь

MSE (3.4), а алгоритм визначення коефіцієнтів лінійної комбінації $\overline{\chi_j^k}$ розроблено в п. 3.2.

3.2. Розробка алгоритму визначення НДС СМК

Для визначення зусиль S_j^k замість одиничних базових епюр можна використовувати одиничні поточні епюри $S_j^{u,k-1}$, що можуть бути визначені за формулою (3.14). Тоді залежність зусиль S_j^k від зусиль S_j^{k-1} можна представити так

$$S_j^k = S_j^{k-1} + \|S^{u,k-1}\| \cdot \overline{Y_j^k}, \quad (3.17)$$

де $\|S^{u,k-1}\|$ – матриця, у якій елементами-стовпцями є одиничні епюри $S_i^{u,k-1}$ ($i = \overline{1, N_L}$); S_j^k і S_j^{k-1} – те саме, що у залежності (3.7).

Залежність (3.7) можна отримати із залежності (3.17) заміною матриці $\|S^{u,k-1}\|$ згідно із формулою (3.15) на вираз $\|S^{bu}\| \cdot \|\gamma^{u,k-1}\|$ і заміною утвореного виразу $\|\gamma^{u,k-1}\| \overline{Y_j^k}$ на $\overline{\chi_j^k}$.

Тоді $\overline{\chi_j^k}$ визначається за залежністю:

$$\overline{\chi_j^k} = \|\gamma^{u,k-1}\| \overline{Y_j^k}. \quad (3.18)$$

Формули (3.7) і (3.17) виражають можливість визначення S_j^k через лінійну комбінацію одиничних епюр, побудованих для різних розрахункових схем – C^0 і C^{k-1} відповідно.

Позначимо різницю епюр S_j^k і S_j^{k-1} через ΔS_j^k і визначимо її за формулою

$$\Delta S_j^k = S_j^k - S_j^{k-1}. \quad (3.19)$$

З урахуванням позначення (3.19) залежність (3.17) набула вигляду

$$\|S^{u,k-1}\| \overline{Y_j^k} = \Delta S_j^k. \quad (3.20)$$

Під час розрахунку НДС для k -ї зміни розрахункової схеми залучається певна множина в'язей L_e^k ($L_e^k \subseteq L$), що залежить від параметрів цієї зміни і розрахункової схеми C^{k-1} . Кількість цих в'язей повинна бути достатньою, щоб утворити епюру ΔS_j^k як лінійну комбінацію N_E^k одиничних епюр з $\|S^{u,k-1}\|$.

Зі сказаного випливає, що ΔS_j^k можна визначати як лінійну комбінацію L_e^k відповідних одиничних епюр за формулою

$$\Delta S_j^k = \|S^{u,k-1}\|_{red} \overline{\alpha_j^k}, \quad (3.21)$$

де $\|S^{u,k-1}\|_{red}$ – матриця, що формується зі стовпців матриці $\|S^{u,k-1}\|$, які відповідають в'язям з множини L_e^k ; $\overline{\alpha_j^k}$ – вектор з N_E^k елементів.

Вектор $\overline{Y_j^k}$ (в 3.20) формується з використанням вектора $\overline{\alpha_j^k}$ так, що елементи вектора $\overline{Y_j^k}$, які відповідають в'язям з множини L_e^k (таких елементів є N_E^k), дорівнюють елементам вектора $\overline{\alpha_j^k}$, інші елементи $\overline{Y_j^k}$ дорівнюють нулю.

Для знаходження $\overline{\chi_j^k}$ використано матриці $\|A^{bp}\|$ розміром $N_L \times N_P$ і $\|A^{bu}\|$ розміром $N_L \times N_L$, які формують з матриць $\|S^{bp}\|$ і $\|S^{bu}\|$ відповідно. Елементом a_{ij}^{bp} матриці $\|A^{bp}\|$ є зусилля в i -й в'язі від j -го зовнішнього навантаження, що прикладене до розрахункової схеми C^0 . Елементом a_{ij}^{bu} матриці $\|A^{bu}\|$ є те ж, що й для a_{ij}^{bp} , тільки від j -го одиничного навантаження.

Для поточної розрахункової схеми C^{k-1} можна визначити елементи $a_{ij}^{u,k-1}$ матриці $\|A^{u,k-1}\|$ розміром $N_L \times N_L$ і вектор $\overline{A_j^{p,k-1}}$, елементами якого є

зусилля a_{ij}^{k-1} від j -го навантаження для в'язей з множини L . Матриця $\|A^{u,k-1}\|$ і вектор $\overline{A_j^{p,k-1}}$ визначаються за формулами (3.22) і (3.23), аналогічно до визначення матриці епюр $\|S^{u,k}\|$ за (3.15) і епюри S_j^k за (3.12).

$$\|A^{u,k-1}\| = \|A^{bu}\| \cdot \|\gamma^{u,k-1}\|, \quad (3.22)$$

$$\overline{A_j^{p,k-1}} = \overline{A_j^{bp}} + \|A^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_j^{p,k-1}}, \quad (3.23)$$

де $\overline{A_j^{bp}}$ – j -й стовпець матриці $\|A^{bp}\|$.

Для в'язей з множини L_e^k завжди відомі зусилля a_{ij}^{k-1} до k -ї зміни, а зусилля a_{ij}^k після k -ї зміни можуть бути визначені з невеликим обсягом обчислень. Тому для в'язей з множини L_e^k можна визначити різницю зусиль f_{ij}^k за формулою

$$f_{ij}^k = a_{ij}^k - a_{ij}^{k-1} \quad (3.24)$$

Вектор, елементами якого є значення різниць зусиль f_{ij}^k для в'язей з множини L_e^k від j -го навантаження під час k -ї зміни, позначено $\overline{f_j^k}$.

Враховуючи, що зусилля у матриці $\|S^{u,k-1}\|_{red}$ і вектор $\overline{f_j^k}$ відомі, вектор $\overline{\alpha_j^k}$ можна визначити із системи рівнянь (3.25)

$$\|A^{k-1}\| \overline{\alpha_j^k} = \overline{f_j^k} \quad (3.25)$$

де $\|A^{k-1}\|$ – квадратна матриця розміром $N_E^k \times N_E^k$ відомих зусиль у в'язях множини L_e^k .

Система рівнянь (3.25) містить N_E^k рівнянь. У системі рівнянь (3.25) i -те рівняння виражає те, що в i -й в'язі для певного навантаження різниця

зусиль f_{ij}^k може бути представлена у вигляді лінійної комбінації N_E^k зусиль a_{ij}^{k-1} у цій в'язі в одиничних епюрах $S^{u,k-1}$.

Для визначення зусиль $\|A^{k-1}\|$ і s_{ij}^{k-1} , що необхідні для формування системи рівнянь (3.25) і знаходження елементів вектора $\overline{f_j^k}$ за залежністю (3.24), використовуються відповідні елементи з матриці $\|A^{u,k-1}\|$ і вектора $\overline{A_j^{p,k-1}}$.

Узагальнюючи залежності (3.12), (3.13), (3.25) і (3.18) для навантажень $j = \overline{1, N_R}$, отримаємо залежності (3.26), (3.27), (3.28) і (3.29) відповідно:

$$\|S^k\| = \|S^b\| + \|S^{bu}\| \cdot \|\gamma^k\|, \quad (3.26)$$

$$\|\gamma^k\| = \|\gamma^{k-1}\| + \|\chi^k\|, \quad (3.27)$$

$$\|A^{k-1}\| \cdot \|\alpha^k\| = \|f^k\|, \quad (3.28)$$

$$\|\chi^k\| = \|\gamma^{u,k-1}\| \|Y^k\|. \quad (3.29)$$

де $\|\gamma^k\|$ – матриця зі стовпцями γ_j^k , $j = \overline{1, N_R}$, визначається за залежністю (3.27); $\|\chi^k\|$ – матриця зі стовпцями χ_j^k , $j = \overline{1, N_R}$.

Пропонується такий алгоритм формування системи рівнянь (3.28) і визначення $\|\chi^k\|$.

Крок 1. Сформувати матрицю $\|A^{k-1}\|$ розміром $N_E^k \times N_E^k$, елементи якої дорівнюють відповідним елементам матриці $\|A^{u,k-1}\|$ розміром $N_L \times N_L$, що визначається за залежністю (3.22).

Крок 2. Сформувати матрицю $\|f^k\|$, елементи якої визначаються за залежністю (3.24), де зусилля a_{ij}^{k-1} є відповідними елементами вектора $\overline{A_j^{p,k-1}}$, що визначається за формулою (3.23).

Крок 3. Визначити $\|\alpha^k\|$ із системи рівнянь (3.28).

Крок 4. Сформувати $\|Y^k\|$, використовуючи відповідні елементи з $\|\alpha^k\|$ і нулі для інших елементів $\|Y^k\|$.

Крок 5. Визначити $\|X^k\|$ за залежністю (3.29).

Спосіб формування системи рівнянь (3.28) для визначення коефіцієнтів $\|\alpha^k\|$ залежить від типу k -ї зміни, особливостей навантажень і моменту часу їх прикладання до розрахункової схеми. Особливості формування системи рівнянь (3.28) представлено у п. 3.3.

3.3. Формування систем рівнянь, що використовуються для визначення НДС СМК

3.3.1. Загальні положення формування систем рівнянь

Під час розрахунку НДС у процесі реконструкції та підсилення СМК треба визначати епюри від контрольованих, змінних навантажень і регулювань зусиль, а також визначати їхні сполучення. Ці навантаження і регулювання зусиль розділено на три групи навантажень залежно від моменту часу прикладання до розрахункової схеми C_j^k . До першої групи віднесено прикладені контрольовані навантаження і регулювання зусиль, що виконані до k -ї зміни розрахункової схеми. До другої групи належать регулювання зусиль, що виконуються під час k -ї зміни розрахункової схеми. До третьої групи – усі змінні навантаження, усі контрольовані навантаження і регулювання зусиль, що прикладаються і виконуються після k -ї зміни розрахункової схеми. Для кожної з описаних груп навантажень пропонується відповідний спосіб розрахунку коефіцієнтів $\overline{\gamma_j^k}$ для залежності (3.12).

Для першої групи навантажень коефіцієнти $\overline{\gamma_j^k}$ визначаються згідно з залежностями (3.13) і (3.18). У формулі (3.18) коефіцієнти $\overline{Y_j^k}$ залежать від параметрів і типу k -ї зміни розрахункової схеми. Такі зміни розрахункової

схеми як накладання в'язей і регулювання зусиль не впливають на зусилля від інших прикладених навантажень, тому коефіцієнти $\overline{Y_j^k} = \overline{0}$. Для врахування впливу уведення шарнірів або зміни поперечних перерізів на епюри зусиль першої групи навантажень необхідно коефіцієнти $\overline{Y_j^k}$ визначати на основі розв'язку системи (3.28). Ця система містить N_E^k рівнянь. L_e^k визначається за формулою (3.30) або (3.31) для врахування уведення шарнірів або зміни поперечних перерізів відповідно. Матриця коефіцієнтів $\|A^{k-1}\|$ формується із зусиль епюр $S_j^{u,k-1}$ за залежністю (3.32).

$$L_e^k = L_s^k, \quad (3.30)$$

$$L_e^k = L_d^k \setminus L_h^{k-1}, \quad (3.31)$$

$$\|A^{k-1}\| = \|S^{bu}\|_{red} \cdot \|\gamma^{u,k-1}\|_{red}. \quad (3.32)$$

Для другої групи навантажень коефіцієнти $\overline{\gamma_j^k}$ для епюр S_j^k від регулювання зусиль, що виконуються під час k -ї зміни, визначаються за допомогою відповідних одиничних епюр. Тобто епюра S_j^k визначається за залежністю (3.14), яка отримана із залежності (3.12) для одиничних епюр, з наступним урахуванням значення j -го регулювання зусиль у певній в'язі.

Для третьої групи навантажень коефіцієнти $\overline{\gamma_j^k}$ для епюр від навантажень, що прикладаються між k -ю і $k+1$ -ю змінами, визначаються за результатом k змін розрахункової схеми. Тобто, коефіцієнти $\overline{\gamma_j^k}$ визначаються за залежністю:

$$\overline{\gamma_j^k} = \overline{\beta_j^k} + \overline{\chi_j^k}, \quad (3.33)$$

де $\overline{\beta_j^k}$ – КЛК ОБЕ, що визначаються за залежністю (3.16) і використовуються для врахування впливу на епюру зусиль всіх змін поперечних перерізів, що були виконані впродовж k змін; $\overline{\chi_j^k}$ – КЛК ОБЕ, що використовуються для

врахування впливу вилучення усіх в'язей з множини L_h^k на епюру зусиль, що розрахована від j -го навантаження у БРС зі зміненими поперечними перерізами, що були виконані впродовж k змін.

Для визначення $\overline{\chi_j^k}$ використовується залежність (3.34)

$$\overline{\chi_j^k} = \|\beta^{u,k}\| \overline{Y_j^k}, \quad (3.34)$$

де $\|\beta^{u,k}\|$ – матриця КЛК ОБЕ розміром $N_L \times N_L$, що враховує вплив змін поперечних перерізів на ОБЕ, стовпці цієї матриці визначаються за залежністю (3.16).

У векторі $\overline{Y_j^k}$ для (3.34) ненульовими є коефіцієнти, що відповідають в'язям множини L_h^k . Для визначення цих коефіцієнтів необхідно розв'язати систему рівнянь (3.28), що містить N_E^k рівнянь. L_e^k визначається за формулою (3.35), а матриця коефіцієнтів $\|A^{k-1}\|$ формується із зусиль епюр $S_j^{u,b,k}$ за залежністю (3.36).

$$L_e^k = L_h^k, \quad (3.35)$$

$$\|A^{k-1}\| = \|S^{bu}\|_{red} \cdot \|\beta^{u,k}\|_{red}. \quad (3.36)$$

У залежностях (3.18) і (3.32) використовуються одиничні епюри. Ці епюри не залежать від послідовності змін розрахункової схеми. Коефіцієнти $\overline{\gamma_j^{u,k}}$ для цих епюр визначаються так само, як коефіцієнти $\overline{\gamma_j^k}$ для епюр від навантажень третьої групи, але з урахуванням того, що $\gamma_{jj}^{u,k} = \gamma_{jj}^k + 1$.

Вплив зміни поперечних перерізів на зусилля від різних груп навантажень враховується так:

1) для першої групи навантажень – на основі розв’язку системи (3.28), яка містить N_E^k рівнянь для в’язей з множини L_e^k і матрицю коефіцієнтів $\|A^{k-1}\|$, що формуються за (3.31) і (3.32) відповідно;

2) для другої групи навантажень – тим, що використовувані поточні одиничні епюри уже враховують цей вплив;

3) для третьої групи навантажень – наявністю коефіцієнтів $\overline{\beta_j^k}$ у формулі (3.33), які визначаються за залежністю (3.16).

У формулі (3.16) коефіцієнти $\overline{\chi_j^k}$ визначаються так

$$\overline{\chi_j^k} = \|\beta^{u,k-1}\| \overline{Y_j^k}, \quad (3.37)$$

де $\|\beta^{u,k-1}\|$ – матриця КЛК ОБЕ розміром $N_L \times N_L$, що враховує вплив усіх змін поперечних перерізів, що були протягом $k-1$ змін схеми, на ОБЕ і кожний стовпець якої визначається аналогічно до $\overline{\beta_j^k}$ у залежності (3.16); $\overline{Y_j^k}$ – КЛК, що враховують вплив змін поперечних перерізів на поточні епюри зусиль під час k -ї зміни.

Для визначення $\overline{Y_j^k}$ треба використовувати систему рівнянь (3.28) з L_e^k рівнянь, де L_e^k визначається за формулою (3.38), а матриця коефіцієнтів $\|A^{k-1}\|$ формується із зусиль епюр $S_j^{u,b,k-1}$ за залежністю (3.39).

$$L_e^k = L_d^k, \quad (3.38)$$

$$\|A^{k-1}\| = \|S^{bu}\|_{red} \cdot \|\beta^{u,k-1}\|_{red}. \quad (3.39)$$

У залежності (3.39), на відміну від залежності (3.36), визначається матриця $\|A^{k-1}\|$ із зусиль від одиничних навантажень до k -ї зміни. Тому у залежності (3.39) використовується матриця $\|\beta^{u,k-1}\|_{red}$.

Для всіх навантажень і регулювань зусиль вище описано вибір розрахункових в'язей L_e^k і формування матриці коефіцієнтів $\|A^{k-1}\|$ для системи рівнянь (3.28). Визначення правих частин цієї системи рівнянь для одиничних епюр наведено в п. 3.3.2, для епюр від зовнішніх навантажень і регулювань зусиль – у п. 3.3.4, для врахування впливу підсилення стрижнів на зусилля в навантажених СМК – у п. 3.3.3.

3.3.2. Визначення зусиль від одиничних навантажень

Різним розрахунковим схемам, що утворюються внаслідок змін розрахункової схеми, відповідають різні епюри від одиничних навантажень. Ці епюри, на відміну від епюр від контрольованих навантажень і від регулювання зусиль, залежать від наявних у поточній розрахунковій схемі S^k в'язей з множини L та параметрів жорсткості поперечних перерізів стрижнів, не залежать від послідовності робіт під час реконструкції та підсилення конструкції. Для підвищення швидкодії алгоритму розрахунку прийнято, що одиничні епюри можуть перераховуватися після виконання групи однотипних простих змін розрахункової схеми у вигляді накладання в'язей, уведення шарнірів, змін поперечних перерізів, а також після регулювання зусиль у в'язі.

Для визначення поточних епюр від одиничних навантажень використовується залежність (3.14), у якій коефіцієнти $\overline{\gamma_j^{u,k}}$, як це було зазначено у п. 3.3.1, розраховуються за способом, що використовується для третьої групи навантажень. Враховуючи, що для одиничних епюр S_j^b збігається з одним із стовпців матриці $\|S^{bu}\|$, то для визначення коефіцієнти $\overline{\gamma_j^{u,k}}$ використано залежність

$$\overline{\gamma_j^{u,k}} = \|\beta^{u,k}\| \overline{Y^{u,k}}, \quad (3.40)$$

де $\overline{Y^{u,k}}$ – вектор коефіцієнтів, у якому ненульовими коефіцієнти є ті коефіцієнти, що відповідають в'язям множини L_h^k .

Якщо k -ю змінною є зміна поперечних перерізів стрижнів, то стовпці матриці $\|\beta^{u,k}\|$ визначаються за формулою (3.16), у іншому разі матриця $\|\beta^{u,k}\|$ не змінюється.

Для визначення коефіцієнтів $\overline{Y^{u,k}}$ необхідно розв'язати систему з N_E^k рівнянь (3.28) з урахуванням залежностей (3.35) і (3.36), яка містить N_L правих частин.

Елементи f_{ij}^k правих частин системи рівнянь (3.28) визначаються за залежністю (3.24), де a_{ij}^{k-1} – відомі значення, а a_{ij}^k залежать від місця прикладання одиничної епюри.

Виділено два випадки прикладання одиничного навантаження і, відповідно, розрахунку коефіцієнтів $\overline{Y^{u,k}}$: перший випадок – на місці вилученої в'язі $j = \overline{1, N_E^k}$, а другий – в шарнірі на місці накладеної в'язі $j = \overline{N_E^k + 1, N_L}$. Особливості значень зусиль a_{ij}^k у двох випадках наведено у формулах (3.41) і (3.42) відповідно [154].

$$a_{ij}^k = \begin{cases} 0, \text{ при } i = \overline{1, N_E^k} \text{ і } i \neq j; \\ 1, \text{ при } i = j. \end{cases} \quad (3.41)$$

$$a_{ij}^k = \begin{cases} 0, \text{ при } i = \overline{1, N_E^k}; \\ 1, \text{ при } i = j. \end{cases} \quad (3.42)$$

Формула (3.41) вказує, що за наявності N_E^k шарнірів у C^k в одиничній епюрі на місці шарнірів $j = \overline{1, N_E^k}$ зусилля відсутні, за винятком місця прикладання одиничного навантаження. Аналогічний факт описує і формула (3.42).

Після розв'язування системи N_E^k лінійних рівнянь (3.28) одним із методів лінійної алгебри отримується матриця коефіцієнтів $\|\alpha^k\|$. Використовуючи значення одержаних коефіцієнтів для елементів вектора $\overline{Y^{u,k}}$, що відповідають N_E^k в'язям, і нульові значення для інших, визначимо $\overline{\gamma_j^{u,k}}$. Використовуючи $\overline{\gamma_j^{u,k}}$ і залежність (3.14), розраховуємо зусилля у поточній схемі C^k від одиничних навантажень.

Поточні одиничні епюри для в'язей $j = \overline{N_E^k + 1, N_L}$, що отримані таким розрахунком, містять нульові зусилля у місцях N_E^k в'язей і довільні значення на місцях інших в'язей з множини L . Для отримання коректних поточних одиничних епюр зусиль ($a_{jj}^k = 1$) згідно із особливостями (3.42) необхідно всі елементи векторів $\overline{Y_j^{u,k}}$ поділити на відповідні значення зусиль a_{jj}^k і у подальшому розрахунках використовувати уточнені вектори $\overline{Y_j^{u,k}}$.

Визначення a_{ij}^k зусиль від одиничних навантажень у схемі C^k , що утворюється унаслідок змін поперечних перерізів стрижнів під час k -ї зміни, відбувається аналогічно до визначення a_{ij}^k зусиль від зовнішніх навантажень.

3.3.3. Вплив підсилення стрижнів на зусилля в навантажених СМК

Розроблено методику й алгоритм визначення зусиль, що діють після підсилення стрижнів збільшенням площі їхніх поперечних перерізів, за відомими зусиллями в СМК до підсилення стрижнів, і за відомими параметрами поперечних перерізів до та після зміни перерізів [97].

Для цього використано метод сил для розрахункової схеми C^{k-1} , що передуює підсиленню стрижнів. Основну систему методу сил $C^{k-1,0}$ назначають з урахуванням підсилюваних стрижнів конструкції. Для утворення $C^{k-1,0}$ з розрахункової схеми C^{k-1} вилучають мінімальну

кількість зайвих в'язей L_d^k так, щоб деформування стрижнів унаслідок їхнього підсилення в розрахунковій схемі $C^{k-1,0}$ не змінювало зусилля поза підсилюваними стрижнями, тобто щоб підсилювані стрижні в основній системі були виділені статично-визначеним чином. Такий спосіб вибору основної системи забезпечує незалежність одиничних і вантажних епюр в основній системі методу сил від параметрів жорсткості підсилюваних стрижнів. За таких умов основна система може бути статично невизначуваною.

Для визначення зусиль a_{ij}^k , що виникають у навантаженій конструкції після зміни жорсткості деяких її стрижнів, за відомими зусиллями a_{ij}^{k-1} до зміни жорсткості, було сформульовано і розв'язано наступну задачу.

Нехай задано деяку $n \geq 1$ разів статично невизначувану стрижневу систему до підсилення з розрахунковою схемою C^{k-1} , що навантажена довільним статичним навантаженням p . Нехай C^k – розрахункова схема для стрижневої системи після підсилення. Задано також статично невизначувані схеми $C^{k-1,0}$ і $C^{k,0}$, що одержуються відповідно з розрахункових схем C^{k-1} і C^k відкиданням деяких “зайвих” в'язей. Мінімальну кількість N_E^k ($N_E^k = N_d^k = |L_d^k|$, $N_E^k \leq n$) цих в'язей, їхнє місце розташування й тип задано так, що: 1) схеми $C^{k-1,0}$ і $C^{k,0}$ є геометрично незмінюваними; 2) для визначення зусиль в підсилюваних стрижнях в $C^{k-1,0}$ і $C^{k,0}$ від навантажень, що прикладені до підсилюваних стрижнів, достатньо рівнянь рівноваги.

Задано епюри S_p^{k-1} і E_p^{k-1} , що виникають від дії навантаження p на розрахункові схеми C^{k-1} і $C^{k-1,0}$ відповідно, а також одиничні епюри E_j^{k-1} ($j = \overline{1, N_E^k}$). Епюра E_j^{k-1} визначена для системи $C^{k-1,0}$ від дії пари

позавузлових протилежних за напрямком одиничних сил, що прикладені в перерізах, що знаходяться нескінченно близько від j -ї відкинутої “зайвої” в’язі. Відмітимо, що епюри E_p^{k-1} і E_j^{k-1} ($j = \overline{1, N_E^k}$) можна ефективно визначити на основі епюр S_p^{k-1} й інформації про схему C^{k-1} і N_E^k “зайвих” в’язей з урахуванням властивостей епюр у лінійно деформованих стрижневих системах.

Необхідно визначити епюру S_p^k для розрахункової схеми C^k від дії навантаження p .

Для розв’язування сформульованої задачі використано метод сил, оскільки системи $C^{k-1,0}$ і $C^{k,0}$ можна прийняти за основні статично невизначувані системи [35] для розрахункових схем C^{k-1} і C^k , а епюри E_p^{k-1} і E_j^{k-1} ($j = \overline{1, N_E^k}$) – відповідно за вантажні і одиничні епюри, що визначені для основної системи $C^{k-1,0}$. Невідомі реакції відкинутих в’язей X_j^{k-1} і X_j^k прикладемо до систем $C^{k-1,0}$ і $C^{k,0}$ відповідно.

Шукану епюру S_p^k можна знайти за формулою:

$$S_p^k = E_p^k + \sum_{j=1}^{N_E^k} (E_j^k \cdot X_j^k), \quad (3.43)$$

де E_j^k і E_p^k – епюри, що виникають в основній системі $C^{k,0}$ від дії одиничних значень невідомих X_j^k і навантаження p відповідно.

Оскільки основні системи $C^{k-1,0}$ і $C^{k,0}$ задані так, що жорсткості підсилювальних стрижнів не впливають на розподіл зусиль, то одиничні епюри E_j^k і вантажна епюра E_p^k збігаються з відповідними заданими епюрами E_j^{k-1} і E_p^{k-1} . З урахуванням цього формулу (3.43) представлено у вигляді:

$$S_p^k = E_p^{k-1} + \sum_{j=1}^{N_E^k} (E_j^{k-1} \cdot X_j^k). \quad (3.44)$$

Невідомі X_j^k можна визначити із системи канонічних рівнянь методу сил, яка в матричному вигляді для основної системи $C^{k,0}$ і навантаження p має вигляд:

$$B^k \overline{X^k} + \overline{\Delta^k} = 0, \quad (3.45)$$

де $\overline{X^k} = \begin{bmatrix} X_1^k & X_2^k & \dots & X_j^k & \dots & X_{N_E^k}^k \end{bmatrix}^T$ – вектор невідомих, $\overline{\Delta^k} = \begin{bmatrix} \Delta_1^k & \Delta_2^k & \dots & \Delta_j^k & \dots & \Delta_{N_E^k}^k \end{bmatrix}^T$

– вектор вантажних переміщень, B^k – матриця податливості основної системи $C^{k,0}$ в напрямках відкинутих в'язей:

$$B^k = \|\delta_{ij}^k\|, \quad i = \overline{1, N_E^k}, \quad j = \overline{1, N_E^k}, \quad (3.46)$$

де δ_{ij}^k – одиничне переміщення в основній системі $C^{k,0}$ за напрямком невідомого X_i^k від дії одиничного значення невідомого X_j^k .

З (3.43) визначимо X_j^k :

$$\overline{X^k} = -(B^k)^{-1} \overline{\Delta^k}. \quad (3.47)$$

Для визначення δ_{ij}^k і Δ_j^k використаємо параметри жорсткості стрижнів після підсилення, а також епюри E_j^{k-1} і E_p^{k-1} , що виникають в основній системі $C^{k-1,0}$ для конструкції до підсилення.

Під час визначення невідомих X_j^k значна частина обчислень припадає на розрахунок коефіцієнтів системи канонічних рівнянь δ_{ij}^k і Δ_j^k .

З метою зменшення обсягу обчислень виведено залежності для визначення X_j^k , ураховуючи подібність основних систем $C^{k-1,0}$ і $C^{k,0}$ й особливості їхнього задавання. Для цього умовно поділено стрижневу систему на дві частини: частину I утворюють стрижні, що підлягають

підсиленню, частину II – усі інші елементи цієї системи. Зауважимо, що при такому поділі стрижневої системи її розрахункові схеми C^{k-1} і C^k відрізняються тільки жорсткістю стрижнів, що належать до частини I.

Відомо, що одиничні й вантажні переміщення визначаються як суми переміщень для всіх стрижнів. Тоді переміщення Δ_j^k можна записати так:

$$\Delta_j^k = \Delta_j^{k,I} + \Delta_j^{k,II}, \quad (3.48)$$

де $\Delta_j^{k,I}$ – складова переміщення за напрямком в'язі j від навантаження p , що виникає в основній системі $C^{k,0}$ і визначена за формулою Максвелла-Мора від зусиль у межах частини I конструкції; $\Delta_j^{k,II}$ – те ж, у межах частини II конструкції.

Ураховуючи залежність (3.48), вектор вантажних переміщень представлено так:

$$\overline{\Delta}^k = \overline{\Delta}^{k,I} + \overline{\Delta}^{k,II}, \quad (3.49)$$

$$\text{де } \overline{\Delta}^{I'} = \begin{vmatrix} \Delta_1^{I'} & \Delta_2^{I'} & \dots & \Delta_i^{I'} & \dots & \Delta_k^{I'} \end{vmatrix}^T, \quad \overline{\Delta}^{II'} = \begin{vmatrix} \Delta_1^{II'} & \Delta_2^{II'} & \dots & \Delta_i^{II'} & \dots & \Delta_k^{II'} \end{vmatrix}^T.$$

Аналогічно до формул (3.48) і (3.49) представлено вантажні переміщення для основної системи C_0 :

$$\Delta_i = \Delta_i^I + \Delta_i^{II}, \quad (3.50)$$

$$\overline{\Delta} = \overline{\Delta}^I + \overline{\Delta}^{II}, \quad (3.51)$$

де Δ_i^I , Δ_i^{II} , $\overline{\Delta}$, $\overline{\Delta}^I$ і $\overline{\Delta}^{II}$ відповідають $\Delta_i^{I'}$, $\Delta_i^{II'}$, $\overline{\Delta}'$, $\overline{\Delta}^{I'}$ і $\overline{\Delta}^{II'}$, але визначені для основної системи C_0 .

Запишемо системи рівнянь методу сил для основних систем C_0 і C_0' і навантаження P з урахуванням формул (3.45), (3.49) і (3.51):

$$B\overline{X} + \overline{\Delta}^I = -\overline{\Delta}^{II}, \quad (3.52)$$

$$B'\overline{X}' + \overline{\Delta}^{I'} = -\overline{\Delta}^{II'}, \quad (3.53)$$

де $\bar{X}$, $\bar{\Delta}$ і $\bar{B}$ відповідають $\bar{X}'$, $\bar{\Delta}'$ і $\bar{B}'$, але визначені для системи C_0 .

Оскільки всі параметри частини II схеми C_0 збігаються з параметрами частини II схеми C_0' , а епюри S_{0i} і S_0 збігаються з епюрами S_{0i}' і S_0' відповідно, то можна записати:

$$\bar{\Delta}^{II} = \bar{\Delta}^{II'}, \quad (3.54)$$

З урахуванням (3.54) прирівняємо ліві частини рівнянь (3.52), (3.53):

$$B\bar{X} + \bar{\Delta}^I = B'\bar{X}' + \bar{\Delta}^{I'}. \quad (3.55)$$

З формули (3.55) визначаємо невідомі $\bar{X}'$:

$$\bar{X}' = (B')^{-1}B\bar{X} + (B')^{-1}(\bar{\Delta}^I - \bar{\Delta}^{I'}). \quad (3.56)$$

У формулі (3.56) невідомим залишається вектор $\bar{X}$. Його можна визначити за епюрами S , S_0 і S_{0i} із системи рівнянь, що будується з використанням залежності:

$$S = S_0 + \sum_{i=1}^k (S_{0i} X_i). \quad (3.57)$$

Якщо на підсилювані стрижні не діють локальні навантаження, то $\bar{\Delta}^I = \bar{\Delta}^{I'} = 0$. У цьому разі формула (3.56) спрощується:

$$\bar{X}' = (B')^{-1}B\bar{X}. \quad (3.58)$$

Зауважимо, що за відсутності локальних навантажень на підсилювані стрижні для побудови шуканих епюр S' достатньо визначити матриці B і B' розміром $k \times k$ і скористатися формулами (3.44), (3.54) і (3.55).

Для одиничних переміщень δ_{ij} і δ_{ij}' можна записати залежності, що аналогічні до формул (3.49), (3.51) і (3.54). Тоді для зменшення обсягу обчислень матриці B і B' можна знаходити за формулами:

$$B = B^I + B^{II}, \quad (3.59)$$

$$B' = B^{I'} + B^{II'}, \quad (3.60)$$

де B^I і B^{II} – складові матриці податливості, що визначаються відповідно для частин I і II системи C_0 , $B^{I'}$ – те ж, для частини I системи C_0' .

Формули (3.56)-(3.60) забезпечують зменшення обсягу обчислень під час визначення $\bar{X}'$.

Одиничні переміщення δ_{ij} можна визначати за формулою Максвела-Мора [5]:

$$\delta_{ij} = \sum_l \int \frac{\bar{N}_i \bar{N}_j}{EA} dx + \sum_l \int \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EI} dx + \sum_l \int \frac{\eta \bar{Q}_i \bar{Q}_j}{GA} dx \quad (3.61)$$

Зусилля від одиничних навантажень на будь-якому етапі реконструкції представляються за формулою (3.14) як лінійна комбінація одиничних базових епюр. З урахуванням цього «добуток епюр» за правилом Верещагіна незалежно від виду силового фактора (N , M чи Q) можна записати у так:

$$\bar{S}_i \bar{S}_j = (\|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_i^{u,k}})(\|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_j^{u,k}}) \quad (3.62)$$

Після розкривання дужок отримаємо:

$$\bar{S}_i \bar{S}_j = \sum_{k=1}^{N_L} \gamma_{jk}^{u,k} \sum_{q=1}^{N_L} \gamma_{iq}^{u,k} (S_k^{bu} S_q^{bu}) \quad (3.63)$$

Аналогічні формули необхідно використовувати для знаходження вантажного переміщення Δ_{ip} :

$$\Delta_{ip} = \sum_l \int \frac{\bar{N}_i N_p}{EA} dx + \sum_l \int \frac{\bar{M}_i M_p}{EI} dx + \sum_l \int \frac{\eta \bar{Q}_i Q_p}{GA} dx \quad (3.64)$$

$$\bar{S}_i S_p = \sum_{k=1}^{N_L} \gamma_{ik}^{u,k} (S_k^{bu} S_p^b + \sum_{q=1}^{N_L} \gamma_{pq}^k (S_k^{bu} S_q^{bu})) \quad (3.65)$$

Розроблену у цьому пункті методику й алгоритм визначення зусиль (невідомих $\bar{X}'$ методу сил) пропонується використовувати під час розрахунку зусиль a_{ij}^k для формування з урахуванням залежності (3.24) правих частин систем рівнянь (3.28), що формуються згідно із п. 3.3.1 і

розв'язуються для врахування впливу підсилення стрижнів на зусилля від усіх N_R навантажень.

3.3.4. Визначення зусиль від зовнішніх навантажень і регулювання зусиль

Елементи правих частин систем рівнянь, що сформовані згідно з (3.28) і використовуються для визначення зусиль у схемі C^k , необхідно визначати за залежністю (3.24) для всіх навантажень першої групи (див. п. 3.3.1) і тих навантажень третьої групи, що прикладаються до схеми C^k між k -ю і $k+1$ -ю змінами розрахункової схеми.

Оскільки визначення елементів правих частин систем рівнянь (3.28) для врахування впливу підсилення стрижнів на поточні зусилля описано у п. 3.3.3, а накладання в'язей не впливає на ці зусилля, то у даному пункті визначимо епюри від регулювання зусиль, а потім – від введення шарнірів у навантаженій конструкції.

З кожним наступним регулюванням зусиль множина відповідних епюр розширюється. Під час виконання перевірок на етапі реконструкції ці епюри враховуються разом з епюрами зусиль від інших прикладених навантажень.

На момент регулювання зусиль у j -й в'язі відповідна епюра S_j^k залежить від схеми C^{k-1} , а саме від вилучених в'язей L_h^k і параметрів жорсткості підсилюваних стрижнів. Тому у п. 3.3.1 запропоновано визначати цю епюру за допомогою поточної одиничної епюри $S_j^{u,k-1}$ для j -й в'язі. Враховуючи це, зусилля S_j^k пропонується визначати так

$$S_j^k = x_j' S_j^{u,k-1}, \quad (3.66)$$

де x_j' – значення регулювання зусиль з похибкою ξ у цій в'язі, яке визначається за формулою:

$$x_j' = x_j \pm \xi(s_j^{z,k-1} + x_j), \quad (3.67)$$

де x_j – теоретичне значення регулювання зусиль; $s_j^{z,k-1}$ – значення зусилля у в’язі j від усіх прикладених контрольованих навантажень і виконаних регулювань зусиль у схемі C^{k-1} перед регулюванням зусиль у в’язі j .

З урахуванням (3.14) формулу (3.66) запишемо у вигляді

$$S_j^k = x_j' \cdot \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_j^{u,k-1}}. \quad (3.68)$$

Унаслідок введення шарнірів під час k -ї зміни поточні зусилля від прикладених контрольованих навантажень і здійснених регулювань зусиль стають нульовими на місці усіх в’язей з множини L_h^k . Тому під час визначення правих частин систем рівнянь для таких навантажень зусилля a_{ij}^k прийняті нульовими. За зусилля a_{ij}^{k-1} від цих навантажень під час визначення правих частин систем рівнянь прийнято зусилля у схемі C^{k-1} .

Поточні зусилля у схемі C^k від навантажень, що прикладаються до схеми C^k між k -ю і $k+1$ -ю змінами, також є нульовими на місці усіх шарнірів (в’язей з множини L_h^k). Тому під час визначення правих частин систем рівнянь для таких навантажень зусилля a_{ij}^k прийняті нульовими. За зусилля a_{ij}^{k-1} від цих навантажень прийнято зусилля у БРС або зусилля у БРС зі зміненими параметрами жорсткості підсилюваних стрижнів, якщо впродовж k змін здійснювалось підсилення.

3.4. Методика визначення НДС СМК під час реконструкції та підсилення

Для отримання зусиль на кожному етапі поточного варіанта проекту реконструкції та підсилення використано удосконалену методику визначення напружено-деформованого стану СМК з урахуванням змін розрахункової схеми під час реконструкції і підсилення. Згідно з цією методикою спочатку необхідно розрахувати базову розрахункову схему методом скінченних елементів на навантаження і впливи, а з отриманих внаслідок цього

розрахунку базових епюр формувати їхні лінійні комбінації з урахуванням процесу реконструкції і будувати шукані розрахункові епюри за допомогою розробленого алгоритму визначення зусиль і переміщень.

Пропонується такий алгоритм визначення матриці коефіцієнтів $\|\gamma^k\|$ у процесі реконструкції та підсилення СМК згідно із запропонованою методикою:

Крок 1. Прийняти $k=1$, $\|\gamma^k\|=\|0\|$, $\|\beta^k\|=\|0\|$. $\|\gamma^k\|$ – матриця КЛК розміром $N_L \times (N_R + N_F)$, де N_F – кількість регулювань зусиль для одного варіанта реконструкції та підсилення СМК; $\|\beta^k\|$ – матриця КЛК розміром $N_L \times N_R$.

Крок 2. Якщо k -ю зміною розрахункової схеми є накладання в'язей, то для всіх прикладених контрольованих навантажень і регулювань зусиль прийняти $\bar{Y}_j^k = \bar{0}$ під час визначення відповідних коефіцієнтів $\bar{\gamma}_j^k$ – стовпців матриці $\|\gamma^k\|$.

Крок 3. Якщо k -ю зміною розрахункової схеми є регулювання зусилля у певній в'язі, то з урахуванням залежності (3.68) визначити відповідний $\bar{\gamma}_j^k = x_j' \cdot \bar{\gamma}_j^{u,k-1}$.

Крок 4. Якщо k -ю зміною розрахункової схеми є введення шарнірів, то для всіх прикладених навантажень і регулювань зусиль спочатку сформувати й розв'язати систему рівнянь (3.28) з урахуванням залежностей (3.30) і (3.32), а потім використати отримані розв'язки під час визначення відповідних $\bar{\gamma}_j^k$ за формулами (3.13) і (3.18).

Крок 5. Якщо k -ю зміною розрахункової схеми є зміна поперечних перерізів, то сформувати й розв'язати системи рівнянь (3.28) для:
1) навантажень першої групи з урахуванням залежностей (3.31) і (3.32);
2) навантажень третьої групи з урахуванням залежностей (3.38) і (3.39).

Отримані розв'язки використати під час визначення відповідних елементів матриць $\|\gamma^k\|$ і $\|\beta^k\|$.

Крок 6. Для N_L одиничних навантажень перерахувати відповідні коефіцієнти $\overline{\gamma_j^k}$.

Крок 7. Якщо між k -ю і $k+1$ -ю зміними розрахункової схеми прикладаються навантаження, то визначити відповідні $\overline{\gamma_j^k}$, використовуючи розв'язки системи рівнянь (3.28), що враховує залежності (3.35) і (3.36).

Крок 8. Використати отримані коефіцієнти $\|\gamma^k\|$ під час формування сполучень навантажень для визначення НДС СМК після k -ї зміни.

Крок 9. Якщо є наступні зміни, то прийняти $k = k + 1$ і перейти до кроку 2, в іншому разі завершити розрахунок.

Визначення зусиль. Алгоритм визначення зусиль і переміщень визначає розрахункові епюри, серед яких можна відзначити одиничні епюри, контрольовані епюри, епюри від регулювання зусиль і змінних навантажень. Усі інші розрахункові епюри є поєднанням цих епюр.

Для виконання перевірок Π_1 на K -му етапі реконструкції після зміни розрахункової схеми (див. рис. 2.1), необхідно враховувати прикладені контрольовані навантаження і здійснені регулювання зусиль. Епюру зусиль від цих навантажень і регулювань зусиль з урахуванням (3.12) і (3.68) можна визначити за формулою

$$S^{1K} = S^{bg1K} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma(K)^1}, \quad (3.69)$$

де S^{bg1K} – сума базових епюр від прикладених на попередніх $K-1$ етапах контрольованих навантажень, $\overline{\gamma(K)^1}$ – КЛК ОБЕ для виконання перевірок Π_1 на K -му етапі реконструкції. Зауважимо, що

$$S^{bg1K} = \begin{cases} S^{bg1(K-1)} & \text{при } K > 1, \\ 0 & \text{при } K = 1; \end{cases} \quad (3.70)$$

$$\overline{\gamma(K)^1} = \begin{cases} \sum_{g=1}^{KG} \overline{\gamma_g(K)} + \sum_{p=1}^{KP} \overline{\gamma_p(K)} \text{ при } K > 1, \\ \sum_{p=1}^{KP} \overline{\gamma_p(K)} \text{ при } K = 1, \end{cases} \quad (3.71)$$

де KG – кількість прикладених контрольованих навантажень до K -го етапу реконструкції; KP – кількість здійснених регулювань зусиль за K етапів реконструкції; $\overline{\gamma_g(K)}$ і $\overline{\gamma_p(K)}$ – КЛК ОБЕ, що визначаються за формулою (3.13) під час змін розрахункової схеми.

Для виконання перевірок Π_2 на K -му етапі реконструкції після прикладання контрольованого навантаження, необхідно враховувати зусилля, що отримані за (3.69)-(3.71), і зусилля від цього навантаження. Відповідну епюру можна визначити за формулою

$$S^{2K} = S^{bg2K} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma(K)^2}, \quad (3.72)$$

де S^{bg2K} – сума базових епюр від прикладених на K етапах контрольованих навантажень, $\overline{\gamma(K)^2}$ – КЛК ОБЕ, що використовуються для визначення зусиль для перевірок Π_2 на K -му етапі реконструкції. Зауважимо, що

$$\overline{\gamma(K)^2} = \sum_{g=1}^{KG} \overline{\gamma_g(K)} + \sum_{p=1}^{KP} \overline{\gamma_p(K)}, \quad (3.73)$$

де KG – кількість прикладених контрольованих навантажень на K етапах реконструкції; KP – кількість здійснених регулювань зусиль за K етапів реконструкції; $\overline{\gamma_g(K)}$ і $\overline{\gamma_p(K)}$ – КЛК ОБЕ, що визначаються за формулою (3.13) під час змін розрахункової схеми.

Для виконання перевірок Π_3 на K -му етапі реконструкції після формування сполучень навантажень, необхідно враховувати зусилля у СМК, що отримується від цих сполучень. Зауважимо, що згідно з п. 2.3 до зусиль від сформованих сполучень додаються зусилля, що отримані від прикладених контрольованих навантажень і здійснених регулювань зусиль та

обчислюються за (3.69)-(3.73). Епюру зусиль S_k^{3K} від деякого m -го сполучення навантажень із урахуванням прикладених контрольованих навантажень і здійснених регулювань зусиль на K -му етапі реконструкції можна визначити за формулою

$$S_m^{3K} = S^{bg2K} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma(K)^2} + S_m^K, \quad (3.74)$$

де S_m^K – епюра від дії m -го сполучення навантажень на K -му етапі реконструкції

$$S_m^K = \sum_{j=1}^n \alpha_{mj}^c S_j^{bq} + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_m^q(K)} \quad (3.75)$$

$$\overline{\gamma_m^q(K)} = \sum_{j=1}^n \alpha_{mj}^c \overline{\gamma_{mj}^q(K)} \quad (3.76)$$

де n – кількість змінних навантажень у сполученні m ; α_{mj}^c – коефіцієнт сполучення для j -го навантаження у сполученні m ; S_j^{bq} – базова епюра зусиль від j -го навантаження; $\overline{\gamma_{mj}^q(K)}$ – КЛК ОБЕ для розрахунку поточної епюри зусиль від j -го навантаження на K -му етапі реконструкції.

Визначення переміщень. Обмеження переміщень вузлів можна записати в загальному вигляді

$$\delta \leq [\delta], \quad (3.77)$$

де δ – фактичне переміщення вузла конструкції в деякому напрямку від дії певного сполучення, що містить навантаження з експлуатаційними розрахунковими значеннями; $[\delta]$ – граничне переміщення вузла в даному напрямку.

Значення $[\delta]$ задається в [45] відповідно до виду елементів конструкції, фізіологічних, естетико-психологічних вимог тощо.

До схеми S^k можуть бути прикладені декілька зовнішніх навантажень і виконано декілька регулювань зусиль. Фактичне переміщення Δ_i^k за

напрямок “ i ” від прикладених навантажень до схеми C^k і виконаних регулювань зусиль пропонується визначити за формулою:

$$\Delta_i^k = \Delta_i^z + \sum_{j=1}^{KP} \Delta_{i,j}^p, \quad (3.78)$$

де Δ_i^z – переміщення за напрямком “ i ” від прикладених зовнішніх навантажень у схемі C^k , $\Delta_{i,j}^p$ – переміщення за напрямком “ i ” від j -го здійсненого регулювання зусиль у схемі C^k , KP – кількість здійснених регулювань зусиль.

Для визначення фактичних переміщень Δ_i^z і $\Delta_{i,j}^p$ під час реконструкції і підсилення у алгоритмі визначення зусиль і переміщень застосовується формула Максвелла-Мора [5]. Інтеграл Мора обчислюється множенням епюр за правилом Верещагіна. Для визначення Δ_i^z використовуються зусилля у схемі C^k від прикладених зовнішніх навантажень і зусилля від одиничного навантаження, прикладеного у тій же схемі C^k у напрямку шуканого переміщення. Для визначення $\Delta_{i,j}^p$ використовуються зусилля у схемі C^k від регулювання зусиль у в'язі i та зусилля від одиничного вузлового навантаження, прикладеного у тій же схемі C^k у напрямку шуканого переміщення.

Удосконалену методику визначення напружено-деформованого стану СМК враховано під час розробки алгоритму аналізу реконструкції та підсилення конструкцій. Цей алгоритм включає в себе два алгоритми: алгоритм аналізу конструкції і алгоритм визначення зусиль і переміщень. Спочатку алгоритм аналізу конструкції виконує розрахунок методом скінченних елементів базової розрахункової схеми на усі задані навантаження, внаслідок чого отримуються базові епюри зусиль і переміщень. Потім з використанням отриманих епюр і вихідних даних про етапи реконструкції і їхню послідовність для поточного варіанта

реконструкції та підсилення конструкції другий алгоритм визначає епюри зусиль і переміщення характерних точок на цих етапах реконструкції.

Удосконалену схему математичної моделі реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій представлено на рис. 3.1.

Для визначення ефективності вдосконаленої методики розрахунку НДС СМК під час її реконструкції й підсилення було проведено порівняння алгоритмів за затратами часу на здійснення одного кроку градієнтного методу оптимізації. Порівняння виконано на прикладі поперечної рами з елементами наскрізного перерізу, описаної в [91].

Для цього розроблено тестову задачу А реконструкції поперечної рами. Процес реконструкції розділено на $k = 4$ етапи. На кожному із цих етапів вводиться шарнір у деякій “зайвій” в’язі. Наявність таких змін зумовлює необхідність визначати НДС для $k = 4$ розрахункових схем цієї рами. Згідно із запропонованою методикою розрахунку НДС сформовано БРС, яка згідно з формулою (3.1) містить усі чотири “зайві” в’язі множини L , що вилучаються під час реконструкції. Для кожної в’язі із множини L задано відповідне одиничне навантаження. Загальна кількість сполучень навантажень, для яких перевірялися обмеження, становила 10.

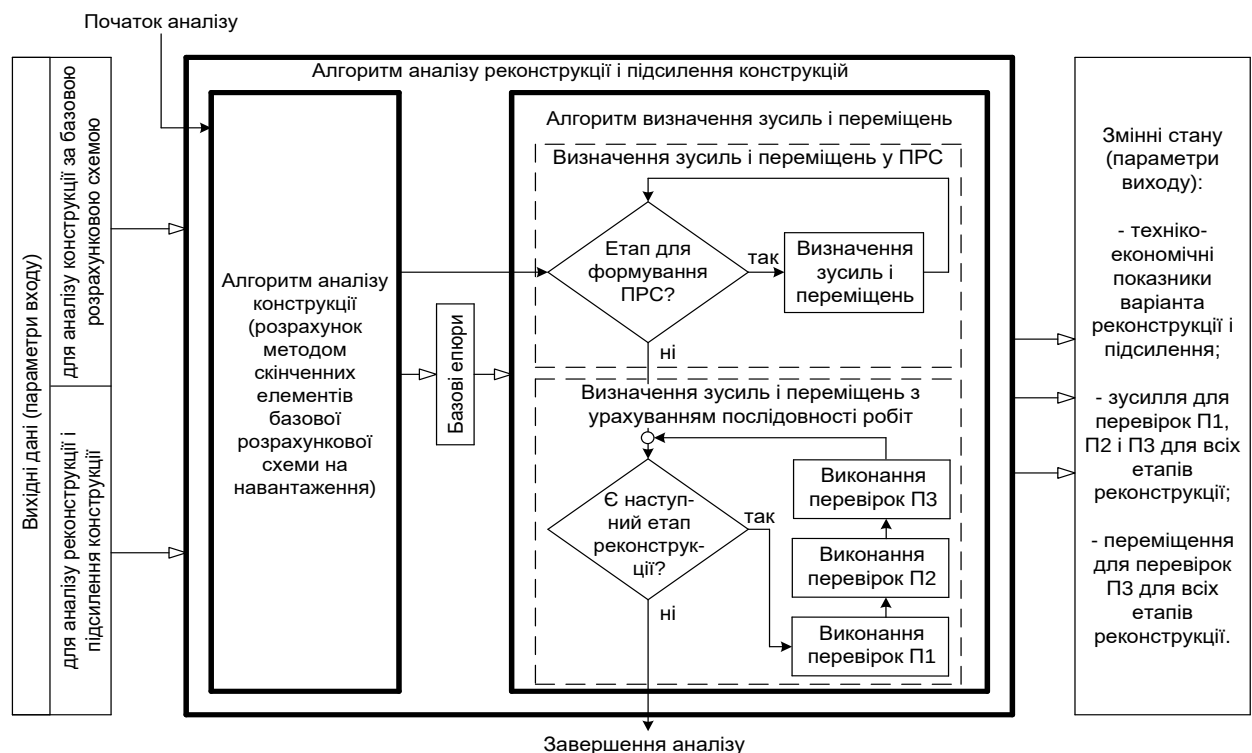


Рис. 3.1. Схема математичної моделі реконструкції та підсилення СМК

На основі задачі А сформовано задачу Б, у якій процес реконструкції і, відповідно, одиничні навантаження відсутні.

Задачу А розв'язано з допомогою запропонованого алгоритму, що реалізує вдосконалену методику. Задачу Б розв'язано з допомогою тестового алгоритму, який для однієї точки простору змінних проектування формував і розв'язував систему рівнянь МСЕ k разів. Цим було змодельовано процес проектування, під час якого необхідно розв'язувати СР МСЕ після кожної зміни розрахункової схеми конструкції.

Дані щодо затрат часу на здійснення одного кроку градієнтного методу під час розв'язування сформульованих задач програмою оптимізації OptCAD отримано з допомогою програми профілювання AQtune [47]. Результати порівняння затрат часу показано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Порівняння затрат часу одного кроку градієнтного методу
для задач А і Б оптимізації рами

№	Показник	Розв'язування сформованих СР МСЕ		Формування й розв'язування СР МСЕ		Обчислення градієнтів (включно зі СР МСЕ)		Ефект, % ((8)-(7))/ (8)*100
		А	Б	А	Б	А	Б	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Час на 1 крок, с	8,5	27,8	9	31,6	24,3	42,7	43,1
2	Частка, %	35,8	64,6	38,1	73,5	99,6	99,5	-

Згідно з табл. 3.1 час на обчислення градієнтів, що затрачений на розв'язування задачі А за алгоритмом удосконаленої методики розрахунку НДС, є на 43,1 % меншим за відповідний час, що затрачений на розв'язування задачі Б за тестовим алгоритмом.

3.5. Висновки до розділу 3

1. Під час розрахунку конструкції, що підлягає реконструкції й підсиленню, запропоновано з метою зменшення обсягу обчислень формувати й розв'язувати одну матричну систему рівнянь МСЕ з декількома правими частинами для базової розрахункової схеми, а для визначення НДС конструкції за іншими розрахунковими схемами використовувати отримані розв'язки, ураховуючи властивості епюр у стрижневих системах, що підлягають принципу суперпозиції.

2. Наведено особливості формування систем рівнянь, що використовуються для визначення КЛК ОБЕ у залежності від типу зміни розрахункової схеми, особливостей навантажень і моменту часу їх прикладання до розрахункової схеми.

3. Розроблено методику й алгоритм визначення зусиль, що діють після підсилення стрижнів збільшенням площі їхніх поперечних перерізів, за відомими зусиллями до підсилення стрижнів, і за відомими параметрами поперечних перерізів до і після зміни перерізів.

4. Наведено удосконалену схему математичної моделі реконструкції та підсилення СМК, що відображає удосконалену методику визначення НДС СМК.

5. Встановлено, що для тестової задачі оптимізації реконструкції й підсилення затрати часу на обчислення градієнтів за запропонованою методикою є на 43,1 % меншими за відповідний час, що затрачається алгоритмом, який для кожної зміни конструкції формує й розв'язує свою систему рівнянь МСЕ.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ СМК

Методика оптимального проектування реконструкції й підсилення СМК повинна враховувати дві математичні моделі – реконструкції та підсилення СМК і задачі оптимізації. Як зазначено у п. 1.2., математична модель задачі оптимізації вважається заданою, якщо описано такі її елементи: змінні проектування, обмеження і цільова функція. Обмеження і цільова функція елементи залежать від параметрів входу і змінних стану математичної моделі реконструкції та підсилення СМК.

Розглянемо формування математичної моделі задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК.

4.1. Вибір змінних проектування

За змінні проектування прийнято незалежні величини, значення яких необхідно визначити під час розв'язування задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК.

За змінні проектування задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК можна прийняти такі величини:

- 1) кількість, типи і розміри поперечних перерізів додаткових стрижнів та елементів підсилення окремих стрижнів, а також параметри, що описують розташування елементів підсилення відносно існуючих елементів перерізу;
- 2) кількість і типи в'язей, які треба накласти чи ліквідувати;
- 3) значення регульованих зусиль і переміщень;
- 4) значення навантажень;
- 5) прив'язки до конструкцій місць кріплення додаткових стрижнів, в'язей, які треба накласти чи ліквідувати, місць регулювання зусиль і переміщень, а також навантажень;
- 6) параметри, що задають способи і послідовність реконструкції та підсилення СМК.

Розглянемо формування дискретних змінних проектування.

Сортаментні змінні. Кожен стрижень конструкції має певний тип поперечного перерізу (наприклад, прокатний двотавр, зварний двотавр тощо). Нехай відома множина типів поперечних перерізів, які можуть використовуватися для стрижнів конструкції. Для кожного з типів поперечного перерізу відома своя множина прокатних елементів, з яких він може складатися. Ці множини прокатних елементів формуються із елементів відомої загальної множини сортаментів.

Множина елементів певного типу поперечного перерізу розділена на групи елементів. Всі елементи однієї групи виготовлені з однакових профілів. Для різних груп елементів профілі можуть відрізнятися. Наприклад, тип двотаврового складеного поперечного перерізу з двома осями симетрії складається з трьох елементів – поясних листів і стінки балки. Ці елементи розділяються на підмножину елементів поясів та підмножину елемента стінки.

У конструкції може бути використано декілька типорозмірів відповідного типу поперечного перерізу. Типорозміри одного типу поперечного перерізу відрізняються лише розмірами елементів. Групи елементів кожного типорозміру поділимо на фіксовані (із заданими розмірами) та змінні (їхні розміри відшукуються під час оптимізації). Кожній змінній групі елементів відповідає одна дискретна шукана величина – сортаментна змінна проектування [78]. Вона може набувати будь-яке одне значення із своєї множини доступних профілів. В межах одного сортаменту може утворитись множина сортаментних змінних. Для опису типорозмірів можуть використовуватися декілька сортаментних змінних.

Значення сортаментних змінних проектування (номер профілю у сортаменті), як і значення інших параметрів типорозмірів, використовуються в алгоритмах розрахунку характеристик поперечних перерізів. Ці алгоритми залежать від типу поперечного перерізу, а характеристики перерізів

використовуються при формуванні матриці жорсткості методу скінчених елементів та при перевірці обмежень задачі оптимізації.

Змінна типу “Тип жорсткості”. Нехай відома множина C різних типорозмірів поперечних перерізів (типів жорсткості), які можуть використовуватися для стрижнів деякої конструкції та множина K цих стрижнів. Елементи C відрізняються типами поперечних перерізів, способом задавання їхніх розмірів (змінними проектування чи фіксованим їхнім значенням). Для представлення розмірів поперечних перерізів використовуємо вектор $\bar{X}_R$ змінних проектування.

Кожен стрижень t характеризується одним елементом із множини C . Цей елемент може бути заданим, фіксованим або вибиратися з деякої відповідної підмножини C_t множини C ($C_t \subset C$). Кожна підмножина C_t описує ті значення, які може набувати відповідна дискретна змінна X_{Ct} , значенням якої є типорозмір поперечного перерізу (наприклад, прокатний двотавр, тавровий переріз із двох кутників). Таку змінну запропоновано називати змінною типу “тип жорсткості” (ТТЖ).

Змінні типу “Шаблон етапу реконструкції” і “Етап реконструкції”. Процес реконструкції відбувається за одним із варіантів реконструкції й підсилення СМК. Варіант реконструкції та підсилення характеризується сформованими відповідно до обраних методів і способів реконструкції та підсилення будівель і споруд змінами розрахункової схеми, навантажень, а також регулюваннями зусиль, що впорядковані певним чином.

Варіант реконструкції та підсилення можна представити як послідовність відповідних етапів реконструкції. Тоді варіанти реконструкції та підсилення між собою будуть відрізнятися як етапами реконструкції, так і їхньою послідовністю (рис. 4.1).

Діаграма процесу реконструкції, що представлена на рис. 4.1, має два розгалуження: перше розгалуження розташоване між першим E_1 і другим E_2 етапами реконструкції, а друге – між другим E_2 і третім E_3 . Під час руху

лініями діаграми зліва направо можна обрати три шляхи, що відповідає трьом варіантам реконструкції. Перший варіант реконструкції передбачає виконання етапів реконструкції E_1 , E_2 і E_4 , другий – етапів E_1 , E_2 , E_3 і E_4 , третій – тільки етапу E_1 .

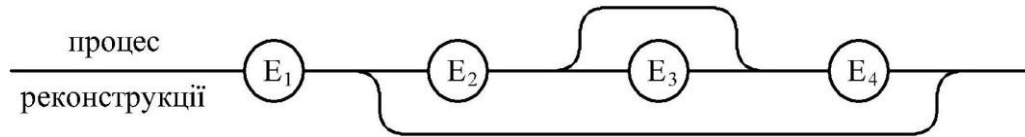


Рис. 4.1. Приклад діаграми процесу реконструкції, яка задає три варіанти реконструкції та підсилення конструкції

Базову розрахункову схему конструкції будемо формувати на основі аналізу варіантів її реконструкції й підсилення таким чином, щоб вона містила всі елементи підсилення, тимчасові елементи та елементи конструкції, що можуть бути видалені під час виконання будівельно-монтажних робіт із реконструкції, а також усі навантаження й впливи за всіма варіантами реконструкції й підсилення цієї конструкції.

Кожен етап реконструкції можна задати, вказуючи шаблон етапу реконструкції, змінну типу “Шаблон етапу реконструкції”, етап реконструкції або змінну типу “Етап реконструкції”.

Змінна типу “Шаблон етапу реконструкції” – це дискретна шукана величина, яка може набувати будь-яке одне значення із множини стадій реконструкції.

Змінна типу “Етап реконструкції” – це дискретна шукана величина, яка може набувати будь-яке одне значення із варіантів переходу до деякого етапу реконструкції.

За допомогою змінних проектування типу “Шаблон етапу реконструкції” і “Етап реконструкції” можна задати підібрані варіанти методів, способів реконструкції та підсилення, а також варіанти послідовностей виконання відповідних робіт.

4.2. Формулювання системи обмежень

До системи обмежень задачі оптимізації залучено обмеження для існуючих елементів та елементів підсилення з урахуванням вимог щодо електрозварювання під навантаженням. Усі обмеження можна розділити на нормативні та додаткові, а також на ті, що висуваються до існуючої конструкції і на ті, що висуваються до додаткових конструкцій і елементів підсилення.

Усі задані обмеження перевіряються під час виконання перевірок Π_1 , Π_2 і Π_3 на етапах реконструкції. Для врахування розрахункової ситуації, групи граничних станів, класу наслідків і категорії відповідальності конструкції згідно з [37, 44] під час виконання перевірок на етапах реконструкції розрахункові зусилля, що визначені від прикладених навантажень і використовуються у обмеженнях, уточнюються з урахуванням коефіцієнта надійності за відповідальністю γ_n .

Нормативні обмеження враховують вимоги, що викладені та описані в нормативних документах [39, 40, 41, 45] і стосуються багатьох можливих варіантів реконструкції та підсилення СМК і її елементів.

До додаткових обмежень необхідно залучати ті обмеження, що враховують висунуті специфічні вимоги до існуючої конструкції, додаткових конструкцій і елементів підсилення під час реконструкції та підсилення.

Наведемо основні нормативні обмеження, що залучені до системи обмежень задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК. Для опису системи обмежень прийнято такі позначення: k – номер сполучення навантажень, що враховується для певної перевірки на етапі реконструкції; m – номер розрахункового перерізу, положення якого відоме.

1. Обмеження міцності елементів із сталі при центральному розтягу і стиску [40]

$$\frac{N_{jk}\gamma_n}{A_{n,j}R_{y,j}\gamma_{c,j}} - 1 \leq 0, \quad (4.1)$$

де N_{jk} – абсолютне значення розрахункової поздовжньої сили; $A_{n,j}$ – площа поперечного перерізу; $R_{y,j}$ – розрахунковий опір сталі на згин; $\gamma_{c,j}$ – коефіцієнт умов роботи.

2. Обмеження міцності елементів конструкцій, які підсилюються методом збільшення перерізів, для центрально-стиснутих симетрично підсилюваних елементів [40]

$$\frac{N_{jk}\gamma_n}{A_{n,j}R_{y,j}\gamma_{m1}\gamma_{c,j}} - 1 \leq 0, \quad (4.2)$$

де γ_m – коефіцієнт, що приймається рівним 0,95 при підсиленні без використання зварювання і $0,95-0,25\sigma_d/R_y$ при підсиленні з використанням зварювання; σ_d визначається згідно із [40].

3. Обмеження міцності балок у розрахункових перерізах 1-го класу – перевірка нормальних, дотичних та приведених до рівня стику стінки з поясом напружень в розрахункових перерізах стрижнів [40]

$$\frac{M_{y,jkm}\gamma_n}{W_{y,n,j}R_{y,j}\gamma_{c,j}} - 1 \leq 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{Q_{z,jkm}S_{y,j}\gamma_n}{I_{y,j}t_{w,j}R_{s,j}\gamma_{c,j}} - 1 \leq 0, \quad (4.4)$$

$$\frac{0,87\gamma_n}{R_{y,j}\gamma_{c,j}} \sqrt{\left(\frac{M_{y,jkm}h_{w,j}}{2I_{y,n,j}}\right)^2 + 3\left(\frac{Q_{z,jkm}S_{yf,j}}{I_{y,j}t_{w,j}}\right)^2} - 1 \leq 0; \quad (4.5)$$

де $M_{y,jkm}$, $Q_{z,jkm}$ – розрахункові згинальні моменти та поперечні сили; $R_{s,j}$ – розрахунковий опір сталі на зсув, $R_{s,j} = 0.58 \cdot R_{y,j}$; $I_{y,j}$, $I_{y,n,j}$, $W_{y,n,j}$ – відповідно моменти інерції, моменти інерції нетто та моменти опору нетто перерізу стрижнів; $S_{y,j}$ – статичні моменти половини перерізу відносно нейтральних осей; $S_{yf,j}$ – статичні моменти площі полиці стрижнів відносно рівня поясних швів; $h_{w,j}$, $t_{w,j}$ – висота та товщина стінки перерізів.

4. Обмеження стійкості елементів суцільного перерізу при центральному стиску [40]

$$\frac{N_{jk} \gamma_n}{\varphi_j A_{n,j} R_{y,j} \gamma_{c,j}} - 1 \leq 0, \quad (4.6)$$

де φ_j – коефіцієнт поздовжнього згину, $\varphi_j = \varphi_j(l_{ef,j}, I_{\min,j}, A_j, R_{y,j}, E_j)$; $l_{ef,j}$ – розрахункова довжина стержня; $I_{\min,j}$ – момент інерції перерізу стержня, який приймається як менше з двох значень $I_{\min,j} = \min \{I_{y,j}, I_{z,j}\}$; E_j – модуль пружності матеріалу стрижня.

5. Обмеження гнучкості центрально-розтягнутих та центрально-стиснутих елементів [40]

$$\frac{l_{ef,j}}{[\lambda]_j} \sqrt{\frac{A_j}{I_{\min,j}}} - 1 \leq 0, \quad (4.7)$$

де $[\lambda]_j$ – гранична гнучкість стержня.

6. Обмеження місцевої стійкості для центрально-стиснутих елементів [40]

$$\frac{h_{ef,j}}{\bar{\lambda}_{uw,j} \cdot t_{w,j}} \sqrt{\frac{R_{y,j}}{E_j}} - 1 \leq 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{b_{ef,j}}{\bar{\lambda}_{1j} t_{f,j}} \sqrt{\frac{R_{y,j}}{E_j}} - 1 \leq 0, \quad (4.9)$$

де $h_{ef,j}$ – розрахункова висота стінки перерізу; $b_{ef,j}$, $t_{f,j}$ – відповідно розрахункова ширина звису та товщина стиснутої полиці перерізу; $\bar{\lambda}_{uw,j}$ – найбільша умовна гнучкість стінки перерізу [39], $\bar{\lambda}_{1j}$ – значення, що приймається за [39].

7. Обмеження прогинів: перевірка прогинів розрахункових перерізів стержневих елементів [45]

$$\frac{\delta_{z,jkm}}{[\delta]_{z,jm}} - 1 \leq 0, \quad (4.10)$$

де $\delta_{z,jkm}$, $[\delta]_{z,jm}$ – розрахунковий та граничний прогини перерізів стержнів, $[\delta]_{z,jm}$ приймаються з використанням [45].

8. Обмеження граничного рівня початкового навантаження елементів для конструкцій, які ремонтуються із застосуванням зварювання [40]

$$\beta_0 \leq K, \quad (4.11)$$

де $\beta_0 = |\sigma_{0,\max}| / R_{y0}$ – коефіцієнт, який являє собою відношення абсолютної величини найбільшого напруження $\sigma_{0,\max}$ в момент ремонту до розрахункового опору R_{y0} елемента, який ремонтується, K може мати такі значення:

$K = 0,2$ – для зварювання конструкцій, що працюють в особливо важких умовах експлуатації (підкранові балки для кранів режиму роботи 7К, 8К, елементи конструкцій бункерних і розвантажувальних естакад, які безпосередньо сприймають навантаження від рухливих составів тощо);

$K = 0,4$ – для елементів конструкцій, які безпосередньо сприймають рухливі, динамічні чи вібраційні навантаження;

$K = 0,8$ – для інших конструкцій.

Значення зусиль в елементах СМК та переміщень її вузлів, що використовуються в обмеженнях (4.1)-(4.11), визначатимемо з системи лінійних рівнянь методу скінчених елементів [124, 125], використовуючи також алгоритм визначення зусиль і переміщень.

Прийнято, що підсилювані елементи й елементи підсилення одного стрижня мають однакові характеристики матеріалу. Характеристики матеріалів різних стрижнів можуть відрізнятися.

4.3. Критерії оптимальності реконструкції та підсилення

У задачах оптимізації реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій запропоновано використовувати за критерій оптимальності один з техніко-економічних показників ефективності реконструкції та підсилення, який служить для оцінювання якості проекту і

вибору способів підсилення, послідовності робіт. До таких показників віднесено:

1) масу елементів підсилення і додаткових конструкцій G , що визначається за формулою

$$G = \psi G_{теор} = \psi \sum_{i=1}^n \gamma_i A_i l_i, \quad (4.12)$$

де $G_{теор}$ – теоретична маса елементів підсилення і додаткових конструкцій, т; ψ – коефіцієнт, що враховує вагу конструктивних деталей; γ_i – питома вага матеріалу стрижня, т/м³; l_i – геометрична довжина стрижня, м; A_i – площа поперечного перерізу стрижня.

2) вартість матеріалів конструкції C , що визначається за формулою

$$C = \psi \sum_{i=1}^n \gamma_i c_i A_i l_i, \quad (4.13)$$

де c_j – вартість 1 т сталі, грн.

3) кошторисну вартість реконструкції та підсилення R_{rec} , що визначається за формулою

$$R_{rec} = \sum_{i=1}^K R_i + R_o, \quad (4.14)$$

де R_i – кошторисна вартість змін конструкції і навантажень i -го етапу реконструкції, грн; K – кількість етапів одного варіанта реконструкції та підсилення СМК, що визначається за формулою (2.2); R_o – кошторисна вартість елементів огороження і їх зведення, грн.

Кошторисну вартість R_i i -го етапу реконструкції пропонується визначати так

$$R_i = R_v + R_m + R_a + R_z + C, \quad (4.15)$$

де R_v , R_m , R_a і R_z – відповідно вартості виготовлення, монтажу, контролю якості при монтажі, антикорозійного захисту елементів, грн.

До техніко-економічних показників реконструкції та підсилення СМК,

що також можна використовувати за критерій оптимальності, відносять: трудомісткість і вартість виготовлення, вартість транспортування готового виробу до місця монтажу, трудомісткість і вартість виконання робіт з підсилення, втрати прибутку через зупинку виробництва на ділянці виконання робіт з підсилення, приведені затрати [121, 144].

Під час задавання критеріїв оптимальності і додаткових обмежень, зазвичай, необхідний доступ до елементів математичної моделі реконструкції та підсилення СМК. Для цього було удосконалено мову для запису задач оптимізації стрижневих металевих конструкцій.

4.4. Удосконалення мови для запису задач оптимізації СМК

Математична модель реконструкції та підсилення СМК описує, серед іншого, такі елементи системи, як вузли, стрижні, опори, шарніри, етапи реконструкції тощо. Цим елементам надають відповідні імена, а також описують їхні властивості, використовуючи необхідні аналітичні вирази. Зауважимо, що, у зв'язку з розробленням та залученням мови для запису задач оптимізації (МЗЗО) до програми оптимізації OptCAD, в [79] було запропоновано нову схему математичної моделі СМК. Вона передбачає поділ алгоритму аналізу на ряд послідовних етапів, що забезпечує можливість урахування функціональних залежностей параметрів входу від змінних стану, значення яких розраховані на попередніх етапах аналізу системи. При цьому множина спеціальних функцій, що доступні при записі виразів для параметрів ММСС, залежить від етапу алгоритму аналізу.

Для запису елементів задачі оптимізації реконструкції та підсилення і параметризації математичної моделі відповідного об'єкта проектування можна використовувати допоміжні іменовані вирази. Імена цих виразів при використанні в інших аналітичних виразах скорочують запис останніх.

Розглянуті вище елементи математичної моделі задачі оптимізації та математичної моделі об'єкта проектування виразимо засобами запропонованої МЗЗО СМК. Синтаксис цієї мови представимо у вигляді синтаксичних діаграм (рис. 4.2), за допомогою яких можна перевірити

приналежність будь-якої послідовності символів до множини текстів, що можуть бути записані запропонованою мовою.

Наведемо основні відмінності удосконаленого варіанта МЗЗО СМК від попереднього варіанта [85].

МЗЗО доповнено тригонометричними функціями ARCSIN, ARCCOS та ARCTAN, які спрощують, наприклад, задавання значень снігових навантажень, що залежать від кута нахилу покрівлі [89]. Аргументами цих функцій є вирази, а результат подається в градусах.

Для забезпечення узгодженості й цілісності даних під час формулювання та уточнення постановки задачі оптимізації вдосконалено список параметрів спеціальних функцій. Замість порядкових номерів елементів математичної моделі реконструкції та підсилення СМК [85, 96] у списку параметрів тепер використовуються імена цих елементів. Так, наприклад, функція $MY(m, n, k)$ повертає значення згинального моменту відносно осі локальної системи координат “y” для поперечного перерізу, що знаходиться на відстані k від початку стрижня n , від дії деякого завантаження m у базовій розрахунковій схемі. Список параметрів цієї функції складається з імені завантаження, імені стрижня та деякого виразу, що задає прив’язку поперечного перерізу. Аналогічно задають параметри спеціальних функцій $N()$, $QY()$, $QZ()$, $MX()$, $MZ()$, що забезпечують доступ до значень відповідних силових факторів у поперечних перерізах стрижнів.

Множина спеціальних функцій була доповнена функціями SCnt, Ref, MnAdd, CnAdd і CReconstr, які розширюють кількість типів задач, що можна формулювати і розв’язувати під час оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК. Ці функції можна використовувати під час запису додаткових виразів, обмежень і аналітичних виразів критеріїв оптимальності.

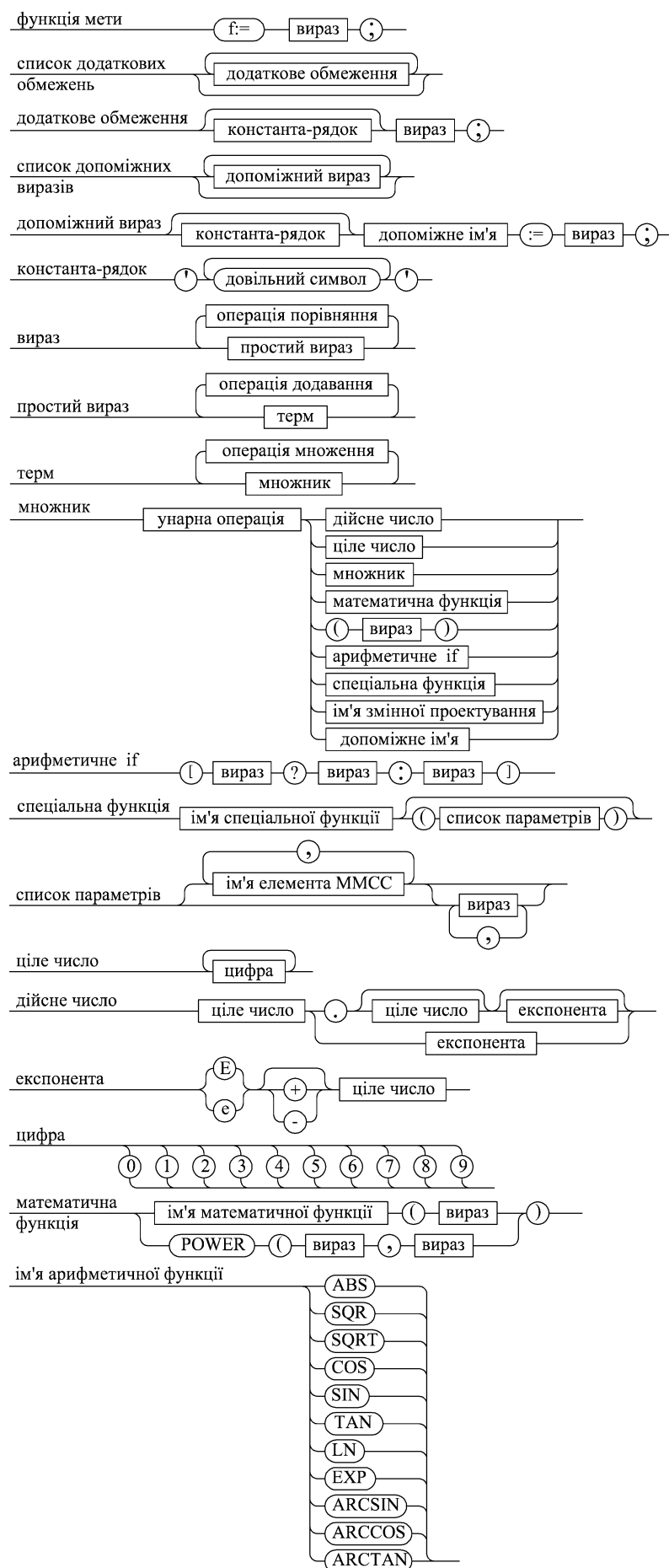


Рис. 4.2. Синтаксичні діаграми МЗЗО (початок).

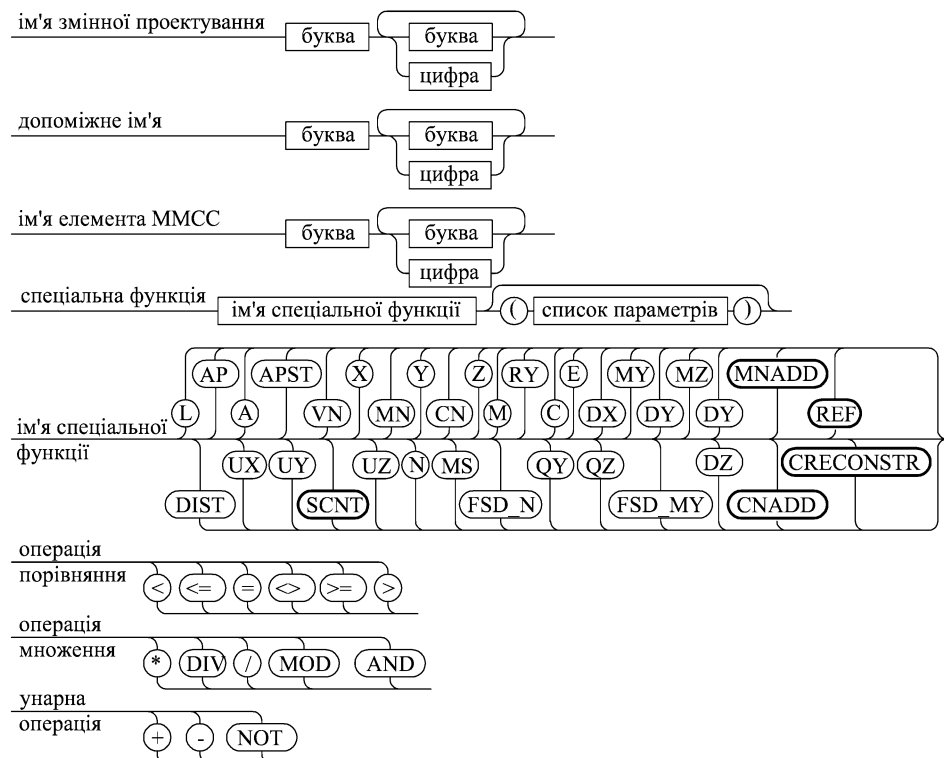


Рис. 4.2. Синтаксичні діаграми МЗЗО (завершення).

Спеціальна функція Ref повертає посилання (значення одного з параметрів) відповідно до значення дискретної змінної проектування. Наприклад, за допомогою функції Ref можна отримати інформацію про поточне значення змінної проектування типу «Етап реконструкції» або «Шаблон реконструкції». Це надає можливість для поточного варіанта реконструкції уже після деякого етапу, що представляється змінною проектування, цілеспрямовано змінювати послідовність етапів реконструкції для врахування особливостей технології будівельно-монтажних робіт.

Спеціальні функції MnAdd і CnAdd повертають масу елементів підсилення і їхню вартість за матеріалом відповідно. Зауважимо, що аналогічні функції Mn і Cn повертають масу вказаного стрижня конструкції і його вартість за матеріалом відповідно з урахуванням початкового стану його поперечного

перерізу, а функції M і C – відповідні показники для всієї конструкції, що представлена базовою розрахунковою схемою. Ці особливості розглянутих функцій необхідно враховувати під час задавання навантажень від власної ваги конструкцій, критерію оптимальності, додаткових обмежень тощо.

Спеціальна функція $CReconstr$ підсумовує для поточного варіанта реконструкції значення техніко-економічного показника кожного етапу реконструкції, що надає можливість використовувати значення такої суми під час задавання критерію оптимальності задачі оптимізації.

Удосконалена мова запису постановок задач [88] залучена до програми OptCAD. Практично в будь-якій області програмного інтерфейсу, де очікується введення вихідних даних, передбачається можливість записування аналітичних виразів відповідно до синтаксису й семантики запропонованої мови.

Наведемо приклад використання мови для запису постановок задач оптимізації під час задавання снігових навантажень на СМК [89].

Для розрахункових значень снігового навантаження [38] після деякого перетворення можна отримати

$$S_m = \mu(\alpha)S_{mc}, \quad (4.16)$$

$$S_e = \mu(\alpha)S_{ec}, \quad (4.17)$$

де S_m , S_e – відповідно граничне й експлуатаційне значення снігового навантаження, $\mu(\alpha)$ – коефіцієнт, який залежить від кута нахилу та ділянки покрівлі; S_{mc} , S_{ec} – не залежать від кута нахилу покрівлі α і для даної конструкції залишається незмінною, визначаються за формулами

$$S_{mc} = \gamma_{fm}S_oC_eC_{alt}, \quad (4.18)$$

$$S_{ec} = \gamma_{fe}S_oC_eC_{alt}, \quad (4.19)$$

де γ_{fm} , γ_{fe} , S_o , C_e , C_{alt} – позначення за [38].

На рис. 4.3 представлена схема снігового навантаження на будинки з односхилими й двосхилими покриттями та значення коефіцієнтів $\mu(\alpha)$. Наприклад, для лівої ділянки двосхилої покрівлі при варіанті 2 розподілу снігового навантаження коефіцієнт $\mu(\alpha) = \mu_{2L} = 0.75\mu$. При цьому $\mu = 1$ при $\alpha \leq 25^\circ$, $\mu = 0$ при $\alpha > 60^\circ$. Проміжні значення коефіцієнта μ визначаються лінійною інтерполяцією за відповідною формулою з [38]:

$$\mu_\alpha = 1 - \frac{\alpha - 25}{35} \quad (4.20)$$

Варіанти 2 і 3 розподілу снігового навантаження по покриттях слід урахувати для будинків із двосхилими покриттями, при цьому варіант 2 – при $20^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, а варіант 3 – при $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ тільки при наявності ходових містків або аераційних пристроїв по гребеню покрівлі [38].

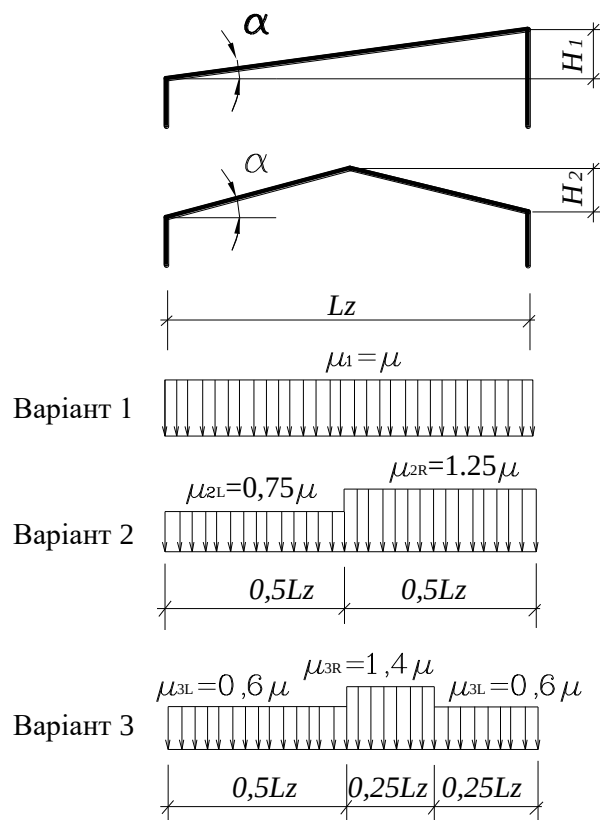


Рис. 4.3. Схема снігового навантаження на будинки з односхилими та двосхилими покриттями

Схему снігового навантаження, що представлено на рис. 4.3, створено на основі схеми 1 додатка Ж [38]. Додатково показано L_z , H_1 , H_2 – параметри

покрівлі, від яких залежить кут нахилу покрівлі α ; μ_1 , μ_{2L} , μ_{2R} , μ_{3L} , μ_{3R} – позначення величин $\mu(\alpha)$ у різних варіантах розподілу снігового навантаження. Значення коефіцієнта $\mu(\alpha)$ при різних кутах нахилу і для різних ділянок покрівлі наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Значення коефіцієнта $\mu(\alpha)$ для схеми 1 додатка Ж з [38]

Вид покрівлі	Кут нахилу покрівлі α	Коефіцієнт $\mu(\alpha)$			
		для лівої половини		для правої половини	
		позна-чення	Зна-чення	позна-чення	значення
Односхила покрівля	$\alpha \leq 25^\circ$	μ_1	1	μ_1	1
	$25^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	μ_1	μ_α	μ_1	μ_α
	$\alpha > 60^\circ$	μ_1	0	μ_1	0
Двосхила покрівля (варіант 2)	$\alpha < 20^\circ$	μ_{2l}	1	μ_{2r}	1
	$20^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$	μ_{2l}	0,75	μ_{2r}	1,25
	$25^\circ < \alpha \leq 30^\circ$	μ_{2l}	$0,75\mu_\alpha$	μ_{2r}	$1,25\mu_\alpha$
	$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	μ_{2l}	μ_α	μ_{2r}	μ_α
	$\alpha > 60^\circ$	μ_{2l}	0	μ_{2r}	0
Двосхила покрівля (варіант 3)	$\alpha < 10^\circ$	μ_{3l}	1	μ_{3r}	1
	$10^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$	μ_{3l}	0,6	μ_{3r}	1,4 0,6
	$25^\circ < \alpha \leq 30^\circ$	μ_{3l}	$0,6\mu_\alpha$	μ_{3r}	$1,4\mu_\alpha$ $0,6\mu_\alpha$
	$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	μ_{3l}	μ_α	μ_{3r}	μ_α
	$\alpha > 60^\circ$	μ_{3l}	0	μ_{3r}	0

У таблиці 4.1 для правої половини двосхилої покрівлі (варіант 3) при $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ записано два значення коефіцієнта $\mu(\alpha)$, що викликано її поділом на дві ділянки (рис. 4.3).

На основі даних табл. 4.1 запишемо снігові навантаження для програми оптимізації стрижневих конструкцій OptCAD.

У програмі OptCAD прикладання навантажень здійснюється в локальній системі координат елементів конструкції (рис. 4.4). Тому для переходу від снігових навантажень на горизонтальну проекцію покриття до навантажень у локальній системі координат стрижнів конструкції покриття використано формули:

$$S_{ix} = S_i \cos \alpha \sin \alpha, \quad (4.21)$$

$$S_{iz} = S_i \cos^2 \alpha, \quad (4.22)$$

де S_i – S_m або S_e ; індекси x і z означають проекцію снігового навантаження на 1 м. п. елемента покрівлі на вісь x та z локальної системи координат стрижня відповідно.

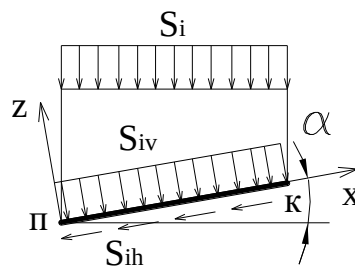


Рис. 4.4. Локальна система координат стрижня (п – початок стрижня, к – кінець стрижня)

Навантаження вважаються додатними, якщо вони діють проти напрямку осей локальної системи координат елемента покриття.

У мові запису постановок задач оптимізації використовуються правила запису виразів, що зазвичай збігаються з правилами запису у мові Pascal. Разом з тим, для забезпечення компактності запису умовних виразів у мові передбачено особливу форму виду $[\text{логічний вираз} ? \text{вираз1} : \text{вираз2}]$. При обчисленні результату цієї операції спочатку вираховується логічний вираз . Якщо це значення – істина, то вираховується значення вираз1 , в іншому разі – вираз2 . Вирахуване значення приймається за результат арифметичного IF [85]. Наприклад, вираз $[2 > 3 ? 4 : 6]$ має значення 6.

Вирази для знаходження $\sin\alpha$, $\cos\alpha$, μ_α занесено у табл. 4.2, для знаходження μ_1 , μ_{2L} , μ_{2R} , μ_{3L} , μ_{3R} у табл. 4.3.

Таблиця 4.2

Визначення $\sin\alpha$, $\cos\alpha$, μ_α

Позначення	Вирази для знаходження	
	при односхилій покрівлі	при двосхилій покрівлі
$\sin\alpha$	$\sin\alpha_1 = H_1 / \sqrt{L_z/2 * L_z/2 + H_1 * H_1}$	$\sin\alpha_1 = H_2 / \sqrt{L_z/2 * L_z/2 + H_2 * H_2}$
$\cos\alpha$	$\cos\alpha_1 = L_z/2 / \sqrt{L_z/2 * L_z/2 + H_1 * H_1}$	$\cos\alpha_1 = L_z/2 / \sqrt{L_z/2 * L_z/2 + H_2 * H_2}$
μ_α	$M\alpha_1 = 1 - (\text{ArcSin}(\sin\alpha_1) - 25) / 35$	

Таблиця 4.3

Визначення коефіцієнта $\mu(\alpha)$

№	Позначення за рис. 4.3	Вирази для знаходження коефіцієнта $\mu(\alpha)$
1	μ_1	$M1 = [\sin\alpha_1 \leq \sin(25)?1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(60)?M\alpha_1:0]]$
2	μ_{2L}	$M2L = [\sin\alpha_1 < \sin(20)?1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(25)?0.75:[\sin\alpha_1 \leq \sin(30)?0.75 * M\alpha_1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(60)?M\alpha_1:0]]]]$
3	μ_{2R}	$M2R = [\sin\alpha_1 < \sin(20)?1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(25)?1.25:[\sin\alpha_1 \leq \sin(30)?1.25 * M\alpha_1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(60)?M\alpha_1:0]]]]$
4	μ_{3L}	$M3L = [\sin\alpha_1 < \sin(10)?1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(25)?0.6:[\sin\alpha_1 \leq \sin(30)?0.6 * M\alpha_1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(60)?M\alpha_1:0]]]]$
5	μ_{3R}	$M3R = [\sin\alpha_1 < \sin(10)?1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(25)?1.4:[\sin\alpha_1 \leq \sin(30)?1.4 * M\alpha_1:[\sin\alpha_1 \leq \sin(60)?M\alpha_1:0]]]]$

Розроблена математична модель реконструкції та підсилення СМК і математична модель задачі оптимізації її параметрів надає можливість

представити основні кроки методики оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК.

4.5. Методика оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК

Розроблена методика оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК передбачає такі основні кроки:

Крок 1. Для існуючої СМК, що потребує реконструкції та підсилення, здійснюється вибір варіантів зміни її конструктивної схеми, навантажень, способів і послідовностей її підсилення.

Крок 2. На основі аналізу підібраних варіантів реконструкції та підсилення СМК задається її базова розрахункова схема (п. 3.1), множина внутрішніх в'язей L (п. 3.1), множина усіх навантажень і впливів (п. 3.1), сполучення навантажень (п. 2.3), шаблони і етапи реконструкції (п. 2.2-2.3).

Крок 3. Задаються елементи математичної моделі реконструкції та підсилення СМК – вихідні дані (п. 2.5), що описують конструкцію за її базовою розрахунковою схемою, множину навантажень і їхні сполучення, етапи реконструкції; алгоритм аналізу реконструкції та підсилення (п. 3.4), що реалізовує удосконалену методику визначення НДС; змінні стану (п. 2.5), до яких віднесено жорсткісні параметри поперечних перерізів, базові зусилля і переміщення, значення обмежень і техніко-економічні показники ефективності варіанта реконструкції та підсилення.

Крок 4. Задаються елементи математичної моделі задачі (задач) оптимізації реконструкції та підсилення СМК – змінні проектування (п. 4.1), що описують, зокрема, розміри поперечних перерізів доданих конструкцій і їхні геометричні параметри, послідовність етапів реконструкції та інше; систему з нормативних і додаткових обмежень (п. 4.2); аналітичний вираз критерію оптимальності (п. 4.3).

Крок 5. Розв'язується сформульована задача оптимізації реконструкції та підсилення СМК одним із методів оптимізації у залежності від типів

змінних проектування і приймаються проектні рішення.

Під час виконання кроку 5 цієї методики здійснюється великий обсяг обчислень, який залежить, зокрема, від застосованого методу оптимізації. Наведемо основні кроки розв'язування сформульованої задачі оптимізації градієнтним методом:

Крок 1. $k = 1$, де k – номер ітерації. Задається початковий раціональний проект $\bar{X}_k$ реконструкції та підсилення СМК.

Крок 2. Виконується алгоритм аналізу конструкції, що передбачає розрахунок методом скінченних елементів базової розрахункової схеми на прикладені навантаження. Отримуються базові зусилля й переміщення.

Крок 3. Виконується алгоритм визначення зусиль і переміщень, що визначає зусилля і переміщення характерних точок конструкції на кожному етапі реконструкції на основі базових зусиль та інформації про поточний варіант реконструкції. Під час виконання цього алгоритму перевіряються обмеження і формується множина активних обмежень.

Крок 4. Якщо всі обмеження виконуються з допустимою точністю, то виконується наступний крок методики. В іншому разі припускається $k \leftarrow k + 1$, змінюються значення змінних проектування та здійснюється повернення до кроку 2.

Крок 5. За необхідності виконується дискретизація оптимального проектного рішення, отриманого у неперервному просторі змінних проектування. Приймаються проектні рішення щодо реконструкції та підсилення СМК.

4.6. Висновки до розділу 4

1. Розроблено елементи математичної моделі задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК: змінні проектування; система обмежень; критерії оптимальності.

2. За змінні проектування прийнято такі параметри: кількість і типи в'язей, які треба накласти чи ліквідувати; кількість, типи і розміри поперечних перерізів додаткових стрижнів та елементів підсилення окремих

стрижнів, та параметри, що описують розташування елементів підсилення відносно існуючих елементів перерізу; значення регульованих зусиль і переміщень; значення навантажень, а також прив'язки до конструкцій місць кріплення додаткових стрижнів, в'язей, які треба накласти чи ліквідувати, місць регулювання зусиль і переміщень, та навантажень.

3. Множину типів змінних проектування, які можна використовувати під час формулювання задач оптимізації реконструкції та підсилення СМК, доповнено такими типами змінних: «сортаментна змінна», «тип жорсткості», «шаблон етапу реконструкції», «етап реконструкції».

4. Сформовано систему обмежень задачі оптимізації, до якої залучено нормативні обмеження для існуючих елементів та елементів підсилення з урахуванням вимог щодо електрозварювання під навантаженням.

5. Розроблено критерії для оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК.

6. Задача оптимізації реконструкції та підсилення СМК формулюється як задача пошуку оптимальних значень змінних проектування за вибраним критерієм при заданих параметрах існуючої СМК з врахуванням вимог будівельних норм, послідовності виконання робіт і специфіки проектної конструкції.

7. Удосконалено мову для запису задач оптимізації СМК і розширено множину спеціальних функцій цієї мови для забезпечення формулювання задач оптимізації реконструкції та підсилення СМК.

8. Розроблено спосіб запису нормативних вимог щодо снігових навантажень на конструкції покриття для систем оптимізації СМК.

РОЗДІЛ 5

ПІДСИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДСИЛЕННЯ Й ОЦІНКА ЇЇ ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

5.1. Задавання базової розрахункової схеми й процесу реконструкції в програмі OptCAD

Задавати БРС конструкції у вікнах програми OptCAD необхідно у такій послідовності:

- 1) ввести нові дані щодо додаткових вузлів, стрижнів, типів жорсткості, опор (зовнішніх в'язей), шарнірів, матеріалів, обмежень;
- 2) задати завантаження, що будуть прикладені до конструкції в процесі реконструкції, підсилення і подальшої експлуатації. При цьому треба описати завантаження, що представляють контрольовані навантаження і змінні короткочасні навантаження (рис. Б.1 додатку Б);
- 3) із заданих завантажень сформувати сполучення навантажень. Ці сполучення формують для перевірки відповідності конструкції вимогам норм (див. рис. 2.2) наприкінці етапів реконструкції (в тому числі й після завершення реконструкції і підсилення). Контрольовані навантаження автоматично входять до всіх сполучень навантажень;
- 4) задати внутрішні в'язі множини L і одиничні завантаження цих в'язей у вікні “Одиничні завантаження внутрішніх в'язей” (рис. Б.2 додатку Б). Для цього необхідно по чергові вказувати імена нового завантаження і нової в'язі, розміщення в'язі і напрямок цієї в'язі у локальній системі координат стрижня. Зауважимо, що під одиничним завантаженням внутрішньої “зайвої” в'язі у програмі реалізовано завантаження парою позавузлових протилежних за напрямком одиничних сил, прикладених у перерізах, що знаходяться на стержні нескінченно близько від відкинутої цієї в'язі.

Для врахування усталеної чи аварійної розрахункової ситуації, необхідно таку ситуацію вказати при формуванні сполучення навантажень і задати це

сполучення на етапі реконструкції. Сполучення навантажень, що формуються для перевірки конструкції в певному граничному стані в усталеній розрахунковій ситуації, необхідно задавати на останньому етапі реконструкції. Таким чином, підсилена конструкція буде перевірятись на експлуатаційні навантаження й впливи.

Задані одиничні завантаження внутрішніх в'язей множини L не змінюють розрахункову схему конструкції. Ці завантаження використовуються для визначення відповідних одиничних епюр, які необхідні програмі OptCAD для застосування розробленого алгоритму визначення зусиль і переміщень на етапах реконструкції.

Після формування БРС, завантажень і сполучень навантажень необхідно задавати процес реконструкції.

У програмі OptCAD можна визначити оптимальний варіант з декількох різних варіантів реконструкції, які описуються відповідними різними послідовностями змін конструкції. Деякі послідовності можуть містити однакові частини (наприклад, один або декілька однакових етапів реконструкції). Для зручності опису варіантів реконструкції в такій ситуації у програмі OptCAD введено поняття шаблону етапу реконструкції, тобто опису етапу реконструкції, що задається у програмі окремо, без включення його у процес реконструкції. Під час задавання процесу реконструкції використовують попередньо описані шаблони етапів реконструкції. Шаблон етапу реконструкції можна декілька разів використати у різних варіантах реконструкції.

Процес реконструкції потрібно задавати у вікні програми OptCAD “Реконструкція та підсилення” (рис. 5.1 і 5.2). Основними елементами управління цього вікна є: список “Список в'язей”, вкладки “Зміни розрахункової схеми” й “Зміни поперечних перерізів”, і панелі “Шаблони етапів реконструкції” і “Етапи реконструкції”.

Під час відкривання вікна “Реконструкція та підсилення” у ньому відображаються раніше введені дані, що використовуються у цьому вікні для

подальшого задавання процесу реконструкції: в'язі, що належать множині L (розміщений в елементі управління “Список в'язей”), списки всіх завантажень і сполучень навантажень (розміщені на панелі “Шаблони етапів реконструкції”).

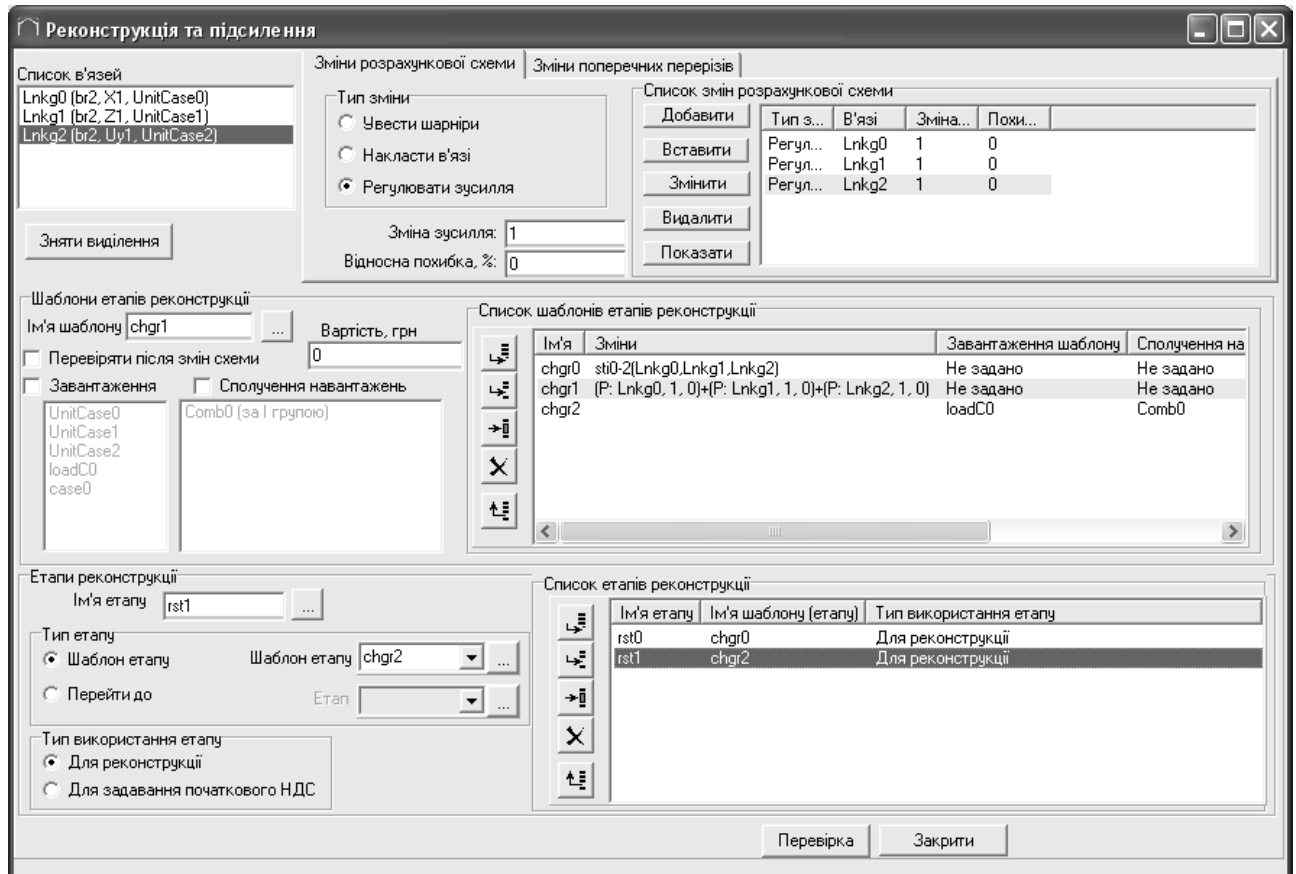


Рис. 5.1. Вікно програми OptCAD для задавання процесу реконструкції

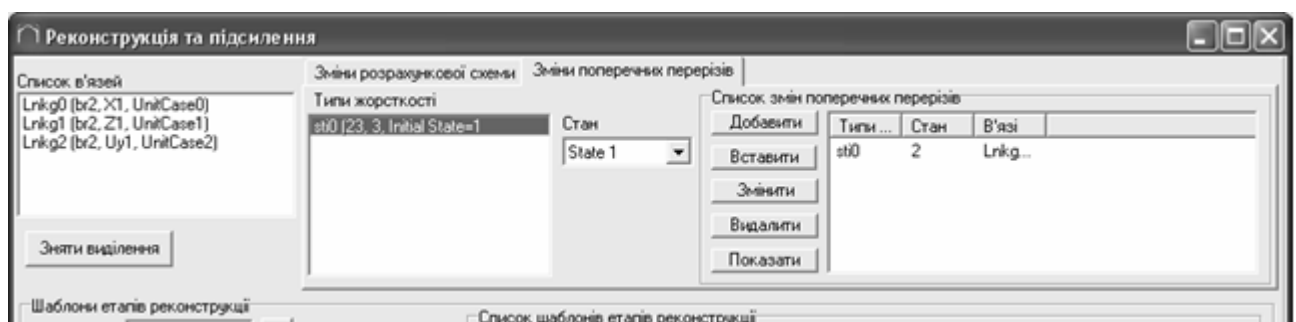


Рис. 5.2. Фрагмент вікна для задавання змін поперечних перерізів

Під час задавання процесу реконструкції спочатку в'язі зі списку в'язей використовують для формування списку змін розрахункової схеми на вкладці “Зміни розрахункової схеми”. Потім список змін враховують при формуванні відповідного шаблону етапу реконструкції на відповідній панелі.

Після формування списку шаблонів їх використовують для задавання

процесу реконструкції як послідовності етапів реконструкції на панелі “Етапи реконструкції”.

Для формування списку змін розрахункової схеми використовують такі типи змін: “Увести шарніри”, “Накласти в’язі” і “Регулювати зусилля”. Один рядок списку “Список змін розрахункової схеми” включає одну або декілька однотипних елементарних змін. Для задавання деякої групи однотипних елементарних змін розрахункової схеми необхідно вибрати відповідний тип зміни, вказати в’язі, у яких відбувається зміна, і внести її у список змін розрахункової схеми. Наприклад, для уведення групи шарнірів потрібно вказати тип зміни “Увести шарніри”, вибрати у списку в’язі, замість яких вводяться шарніри, і натиснути кнопку “Добавити”. Для опису регулювання зусилля у в’язі необхідно додатково ввести значення зміни (приріст) зусилля, тонн, і відносну похибку регулювання зусилля у відсотках. Відносна похибка регулювання зусилля вводиться до значення сумарного зусилля у в’язі, яке є сумою значень наявного зусилля і уведеної зміни зусилля.

Для опису шаблону проектувальник повинен сформувати список відповідних змін розрахункової схеми, вибрати, за необхідності, одне контрольоване навантаження зі списку “Завантаження”, одне або декілька сполучень навантажень зі списку “Сполучення навантажень”, задати ім’я шаблону, вартість робіт й матеріалів і внести цей шаблон у список шаблонів реконструкції (рис. 5.1).

Для опису процесу реконструкції треба задати список етапів реконструкції (рис. 5.1). Вважається, що послідовність етапів у списку етапів реконструкції відповідає послідовності виконання робіт з реконструкції і підсилення. Щоб задати етап реконструкції треба задати ім’я етапу, вказати тип етапу “Шаблон”, тип використання етапу, вибрати шаблон у відповідному списку на панелі “Етапи реконструкції” і натиснути кнопку “Добавити”. Вносити етапи у список етапів реконструкції необхідно у тій послідовності, яка відповідає послідовності виконання робіт з реконструкції і підсилення. При цьому першими в списку можуть бути етапи з типом

використання “Для задавання початкового НДС”, які використовують для формування початкової розрахункової схеми із БРС (рис. 5.1). Для наступних етапів реконструкції вказують тип “Для реконструкції”.

Для вибору варіантів реконструкції треба використовувати кнопки, що розміщені у групі елементів управління “Тип етапу” на панелі “Етапи реконструкції”.

5.2. Особливості задавання елементів математичної моделі задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК

Опишемо задавання сортаментних змінних проектування та їхнє використання у типах жорсткості стрижнів за допомогою програми OptCAD (у програмі поняттю типорозмір відповідає тип жорсткості). Типи жорсткості стрижнів задаються у вікні “Поперечні перерізи: типи жорсткості” (рис. Б.3 додатку Б). Спочатку треба вибрати тип поперечного перерізу за допомогою однойменного випадаючого списку. На даний час у OptCAD’і доступно 22 типи поперечного перерізу. Потім треба надати імена типам жорсткості, задати розміри елементів поперечного перерізу тощо.

Після вибору типу поперечного перерізу у нижній частині вікна з’являються елементи вікна, що дозволяють задавати параметри груп елементів відповідного типу поперечного перерізу із прокатних профілів. Для вибору профілю із сортаменту для групи елементів перерізу слід вибрати елемент вікна “Скористатися сортаментом” (рис. Б.4 додатку Б). Після цього стає доступним випадаючий список профілів відповідного сортаменту. Якщо елемент перерізу фіксований, то у вказаному списку вказується потрібний профіль.

Якщо для групи елементів потрібно знайти оптимальний профіль, то виникає потреба створити й використати відповідну сортаментну змінну проектування. Для створення змінної слід натиснути кнопку “Змінна...”, що знаходиться над списком профілів. Після цього з’явиться вікно (рис. Б.5 додатку Б) для створення та редагування сортаментних змінних. Для кожної змінної треба вказати її ім’я, вибрати варіанти можливих її значень із повного

списку профілів деякого сортаменту тощо. Треба вибирати тільки ті профілі, які на час проектування конструкції є доступними або вказані у завданні на проектування. Імена сортаментних змінних автоматично з'являються після створення у кінці списку профілів відповідного сортаменту (рис. Б.4 додатку Б). Вибір імені змінної з цього списку приводить до її використання алгоритмом розв'язування задачі оптимізації.

Для задавання змінних проектування типу «Шаблон етапу» або «Етап реконструкції» необхідно відкрити спеціальні вікна за допомогою відповідних кнопок, що розміщені на панелі “*Етапи реконструкції*”. У цих вікнах для кожної змінної можна вказати множину її значень.

Під час задавання додаткових виразів (рис. Б.6 додатку Б), додаткових обмежень і аналітичного виразу функції мети (рис. Б.7 додатку Б) можна використовувати спеціальні функції, що передбачені мовою запису постановок задач оптимізації. Наприклад, якщо увести вираз $f := SReconstr$ під час задавання функції мети, то критерієм оптимальності буде екстремум суми вартостей етапів реконструкції.

5.3. Аналіз роботи підсистеми автоматизованого проектування реконструкції та підсилення СМК

Розроблену методику оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК реалізовано у відповідній підсистемі автоматизованого проектування, що залучена до програми OptCAD. Для можливості залучення цієї підсистеми було удосконалено схему організації алгоритмів і потоків даних [79] у програмі оптимізації OptCAD (рис. 5.3) шляхом використання алгоритму аналізу реконструкції та підсилення СМК, що містить існуючий у програмі алгоритм аналізу конструкції і розроблений алгоритм визначення зусиль і переміщень. Ця схема відображає взаємозв'язок елементів математичної моделі реконструкції та підсилення СМК з математичною моделлю задачі оптимізації під час розв'язування задач проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій.

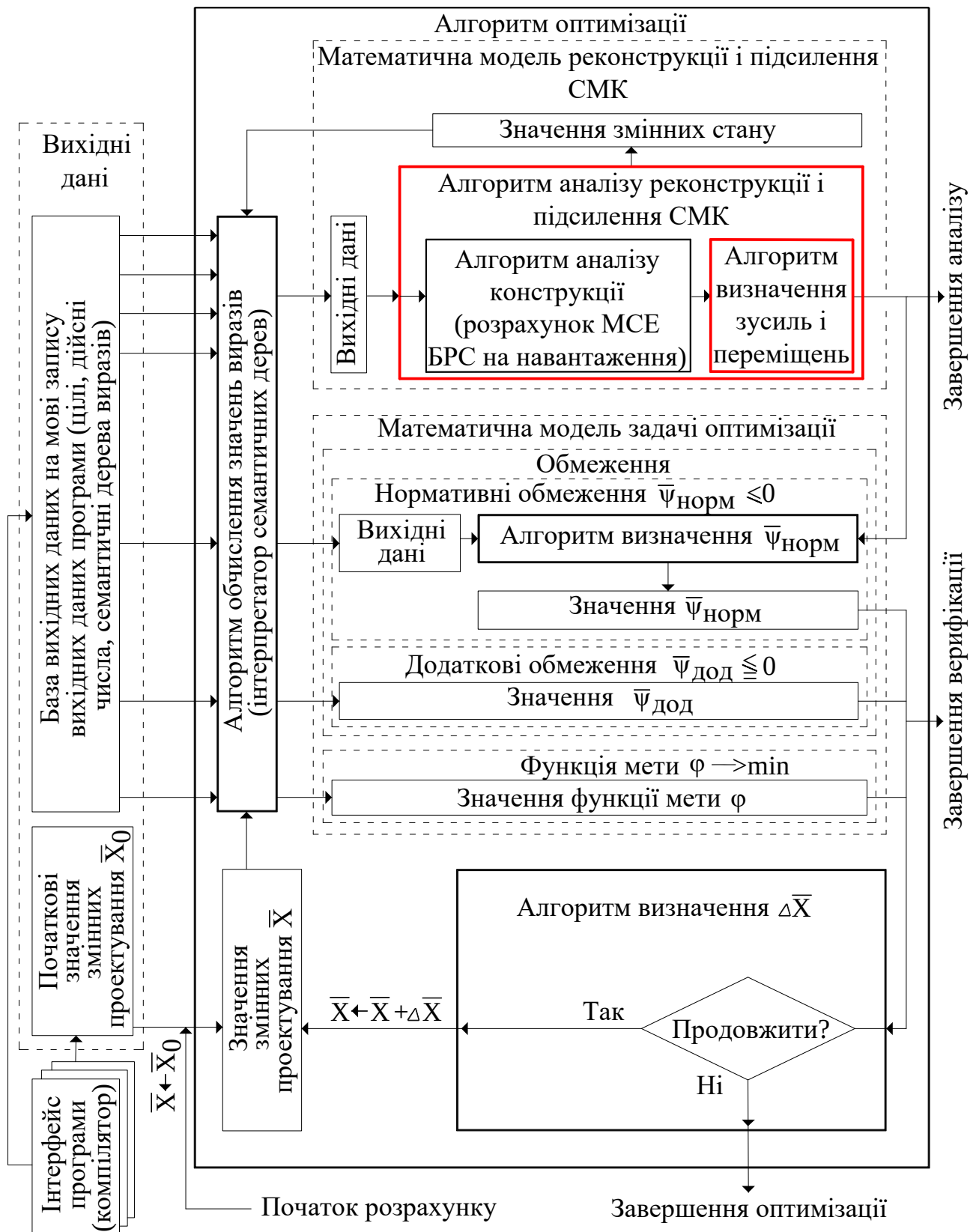


Рис. 5.3. Схема організації алгоритмів і потоків даних у програмі оптимізації OptCAD

Для перевірки правильності і достовірності роботи розробленої підсистеми розв'язано дві групи задач оптимального закріплення поперечних

перерізів за стрижнями металевих конструкцій – I і II [76, 87]. Задачі формувалися для десятиелементної консольної ферми (рис. 5.4), яка широко використовувалась в літературі [147] для порівняння різних методик оптимального проектування.

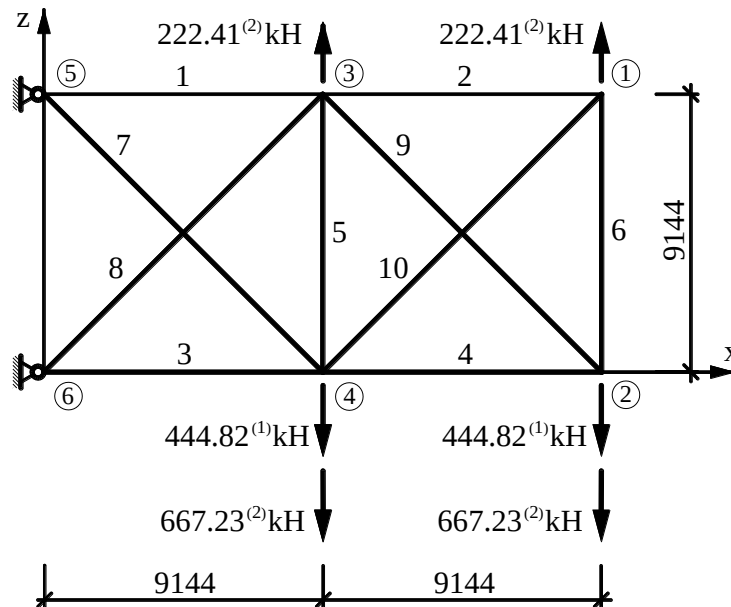


Рис. 5.4. Розрахункова схема десятиелементної консольної ферми
(верхній індекс вказує номер завантаження)

Група задач I. Для десятиелементної консольної ферми складено й розв'язано три задачі оптимізації, при цьому задачі 2 і 3 являються допоміжними і використовуються для перевірки достовірності рішення задачі 1. У всіх задачах до ферми було прикладене тільки перше завантаження (див. рис. 5.4).

Числові дані для розрахунку ферми такі [147]: густина та модуль пружності матеріалу ферми $\rho g = 0.1$ фунт/дюйм³ (2,768 т/м³), $E = 10^7$ фунт/дюйм² (703,074 т/см²); константа для визначення моменту інерції перерізів стрижнів ферми $\beta = 1.0$ ($I_i = \beta b_i^2$).

Під час оптимізації враховано такі обмеження: нижня гранична межа площі поперечного перерізу для всіх елементів $b^L = 0.10$ дюйм² (0,64516 см²); верхня гранична межа відсутня; граничне переміщення вузлів конструкції $z^a = 2$ дюйм (50,8 мм); граничне напруження для стрижнів

ферми $\sigma^a = 25 \cdot 10^3$ фунт/дюйм² (1,758 т/см²) [147]. За функцію мети приймали мінімум маси конструкції $f = \min M$.

Задача 1 полягає у пошуку таких змінних $\bar{X}_{St}$ і $\bar{X}_{Rt} = \bar{b} = (b_i)^T$, $i = \overline{1,6}$, при яких маса буде мінімальною, а вказані обмеження будуть виконуватись. Було задано множину S із 6 типів жорсткості (ТЖ) з одного типу поперечного перерізу, розміри яких (площі поперечного перерізу) потрібно відшукати. Для кожного стрижня була складена підмножина V_t , $t = \overline{1,10}$ з елементів множини S наступним чином: V_1 містить 1-й ТЖ множини S , V_2 - 1-й і 2-й ТЖ, V_3 - 1-й, 2-й і 3-й ТЖ. Подібним чином здійснювався вибір для 4-ої і 5-ої підмножини V . $V_6..V_{10}$ складаються із всіх 6 ТЖ множини S . Кожна підмножина V_t описувала ті значення, які може відповідно набувати змінна $\bar{X}_{St}$. Для можливості використовувати генетичний алгоритм для пошуку рішення задачі задавалась додатково верхня гранична межа площі поперечного перерізу для всіх елементів $b^U = 300$ см², яку визначено на основі аналізу результатів даної ферми [147].

Задача 2 полягає у пошуку площ поперечних перерізів кожного елементу ферми $\bar{b} = (b_i)^T$, $i = \overline{1,10}$ з метою мінімізації її ваги при наявності обмежень на напруження в стрижнях, переміщення вузлів та мінімальні розміри елементів. Кількість доступних ТЖ збігається з кількістю стрижнів конструкції – 10. Вирішення цієї задачі здійснювалося багаторазово апробованим градієнтним методом.

Задача 3 відрізняється від задачі 2 тим, що для знаходження рішення використовувався генетичний алгоритм. Верхня гранична межа площі поперечного перерізу задавалась так само, як і у задачі 1.

Результати оптимізації поставлених задач і результати [147] зведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати оптимізації десятиелементної консольної ферми

Номер стрижня	Оптимальні площі поперечних перерізів стрижнів, см ²			
	Генетичний алгоритм		Гradientний метод	
	Дана робота			Хог, Арора [147]
	Задача 1	Задача 3	Задача 2	
1	172,77 1) ^{*)}	196,65	196,38	193,75
2	0,65 (2)	0,65	0,65	0,65
3	172,77 (1)	144,65	149,70	150,15
4	98,71 (3)	95,90	98,21	98,62
5	0,65 (2)	0,65	0,65	0,65
6	3,56 (4)	3,24	3,55	3,59
7	46,17 (6)	49,00	48,11	48,18
8	140,91 (5)	139,35	135,93	136,76
9	140,91 (5)	140,30	139,05	139,47
10	0,65 (2)	0,65	0,65	0,65
Маса, т	2,55	2,532	2,531	2,531

Примітка. ^{*)} у дужках вказано номер типу жорсткості.

На основі даних табл. 5.1 можна зробити висновок, що результати вирішення задач 1 і 2 збігаються з результатами [147]. Різницю у вазі конструкції, що отримані за результатами розв'язування задач 1 і 2, можна пояснити переходом від неперервної до дискретної постановки задач. На основі результатів розв'язку задач 1 і 2 можна зробити висновок про те, що із 10 можливих ТЖ фактично використовувалось 8 типорозмірів. У задачі 3 при 6 ТЖ отримали масу конструкції, яка більша порівняно із найменшою отриманою масою лише на 0,76 %.

Група задач II. Для десятиелементної консольної ферми складено й розв'язано задачі оптимального закріплення поперечних перерізів за

стрижнями конструкції для різних кількостей типів жорсткості. У цих задачах враховувались два завантаження (див. рис. 5.4).

Нехай типорозміри, що фактично використані в стрижнях, утворюють множину C_n ($C_n \subset C$). Кількість $SCnt$ елементів множини C_n може обмежуватись деяким числом n ($1 \leq n \leq |C|$) так

$$SCnt \leq n. \quad (5.1)$$

Задача оптимального закріплення поперечних перерізів за стрижнями конструкції полягає у наступному: знайти такі $\bar{X}_C$ і $\bar{X}_R$, при яких маса конструкції буде мінімальною, а обмеження (1.2), (1.3) і (5.1) будуть виконуватись. При цьому кількість одночасно використаних типів жорсткості обмежується.

Використано сформульовану задачу для побудови залежності мінімальної маси конструкції від кількості типорозмірів для десятиелементної консольної ферми.

Для даної ферми спочатку були складені й вирішені за допомогою генетичного алгоритму задачі оптимізації при мінімальній і максимальній кількості типорозмірів (1 і 10). При одному типорозмірі, який призначався всім стрижням конструкції, відшукували оптимальне значення однієї змінної X_R . При 10 типорозмірах кожному стрижню задавався окремий типорозмір. Для кожного стрижня потрібно було знайти оптимальне значення X_{Ri} . Змінні X_{Ci} не задавались для обох випадків. Було виявлено, що з 10 можливих для використання типорозмірах для даної конструкції фактично треба застосувати тільки 8, оскільки три стрижні отримали мінімальну площу поперечного перерізу $0,64516 \text{ см}^2$.

Потім були складені й послідовно розв'язані задачі оптимізації ферми при обмеженій різній кількості n ($2 \leq n \leq 7$) використовуваних типорозмірів поперечних перерізів стрижнів. При формулюванні цих задач використано множину C з 10 типів жорсткості (ТЖ), утворених для одного типу поперечного перерізу. Розміри (площі поперечного перерізу) ТЖ, що

утворюють множину C_n , потрібно відшукати: $X_{Ri} = \bar{b} = (b_i)^T$, $i = \overline{1, n}$. Для кожного стрижня $t = \overline{1, 10}$ була складена відповідна підмножина C_t з елементів множини C наступним чином: C_1 містить перший елемент множини S , C_2 - перший і другий елементи, C_3 - 1-й, 2-й і 3-й елементи. Подібним чином склалися підмножини $C_4..C_{10}$. Підмножини $C_2..C_{10}$ відповідно задають можливі значення змінних проектування X_{Ct} , $t = \overline{2, 10}$. Для забезпечення роботи генетичного алгоритму з урахуванням даних [147] прийнято верхню граничну межу площі поперечного перерізу для всіх елементів $b^U = 300 \text{ см}^2$. Задача полягає у пошуку таких змінних $\bar{X}_C$ і $\bar{X}_R$, при яких маса ферми буде мінімальною, а обмеження будуть виконуватись.

Для сформульованої задачі оптимізації був реалізований спосіб задавання змінних ТТЖ, а також розроблена й реалізована в мові запису постановок задач додаткова спеціальна функція $SCnt$, яка дозволяє накладати обмеження на кількість використовуваних типорозмірів у стрижнях конструкції.

Результати розв'язування поставлених задач оптимізації при двох випадках завантаження ферми й результати [147] зведено в табл. 5.2.

При порівнянні результатів задачі оптимізації поперечних перерізів стрижнів при 8 типах жорсткості й [147] можна зробити висновок про їхню збіжність. На основі даних табл. 5.2 побудовано графік залежності маси конструкції від кількості використовуваних типорозмірів (рис. 5.5).

На основі отриманих рішень можна зробити висновок про те, що при 8..10 типорозмірах маса конструкції є сталою. При 5..7 типорозмірах для першого випадку завантаження ферми і при 4..7 типорозмірах для другого випадку перевитрати стали не перевищують 1% порівняно із мінімальною масою ферми при 8 типорозмірах.

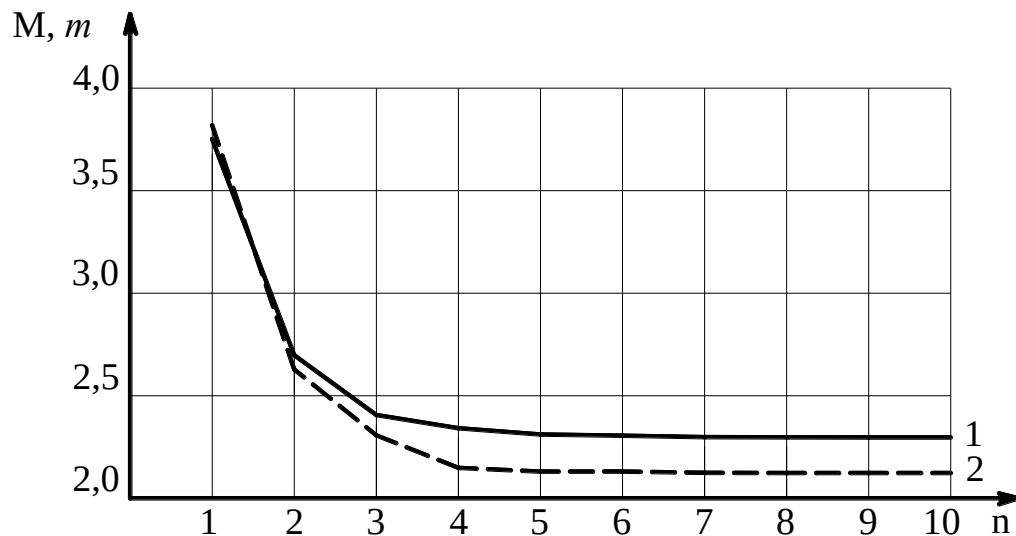


Рис. 5.5. Графік залежності маси M ферми від кількості n використовуваних типорозмірів поперечних перерізів стрижнів (1, 2 – випадки завантаження ферми)

Проведені числові дослідження свідчать про достовірність отриманих результатів, що отримані за допомогою програми OptCAD з використанням градієнтного методу і генетичного алгоритму, а також засобів удосконаленої мови для запису постановок задач оптимізації.

Оцінку техніко-економічної ефективності розробленої методики оптимального проектування реконструкції та підсилення виконано на прикладі сталевій стрижневої конструкції покриття торгово-розважального комплексу “Екватор” [90] та оптимального проектування реконструкції надземного переходу нафтогазопроводів через р. Стрий [80, 81, 83].

5.4. Виявлення резервів несучої здатності сталевій стрижневої конструкції покриття торгово-розважального комплексу “Екватор” в м. Рівне

Зал торгово-розважального комплексу являє собою овальну в плані симетричну відносно поздовжньої осі однопролітну одноповерхову будівлю. Довжина її по осях становить 78 м, найбільша ширина – 48 м. Покриття

спирається на залізобетонні колони прямокутного перерізу, що розміщені на осях із кроком $Kr = 12$ м.

Ураховуючи досвід проектування сталевих стрижневих конструкцій великопролітних будівель [68, 151], прийнято конструктивну схему покриття зі сталевих тригранних ферм (рис. 5.6). Для спрощення виготовлення та монтажу цілої конструкції покриття висоти та ширини несучих ферм прийнято однаковими.

Елементи конструкції покриття, окрім прогонів зі сталі С235, запроектовано зі сталей безшовних гарячекатаних труб за ГОСТ 8732-78 зі сталі ВСтЗпс. Прогони однакової висоти по фермах покриття – з гарячекатаних двотаврів із кроком 6 м посередині та швелерів по краях конструкції. Несучим елементом покрівлі є сталевий профільований настил. За рахунок будівельного підйому ферм, а також різної висоти опорних столиків для спираючих прогонів покриття, забезпечується ухил покрівлі 0,025 для відведення води.

Для забезпечення проектного положення в процесі монтажу та стійкості ферм покриття й зменшення гнучкості нижнього пояса із площини згину їх попарно об'єднано посередині прольоту в блоки ферм за допомогою тригранних в'язей. В'язями такої ж форми ферми об'єднано в приопорних частинах конструкції покриття. Віддаль між верхніми поясами приопорних в'язей $B_{zf} = 2,5$ м.

Стійкість стиснутого верхнього пояса ферм забезпечується його конструкцією, що являє собою горизонтальну ферму із хрестовою решіткою. Одночасно ці ферми забезпечують сприйняття вітрових навантажень у торцях покриття будівлі.

Ураховуючи високу задану жорсткість колон, можливу появу в них тріщин та невизначеність сил тертя, опорні частини ферм покриття запроектовано й виконано з однієї сторони шарнірно-рухомими (рис. 5.7) та шарнірно-нерухомими з іншої. Шарнірно-рухома опорна частина складається з нижньої плити, на якій розміщено котки, на які, у свою чергу, спирається

верхній балансир. На останній установлюють ферми покриття. Відстань від верху колони до осі нижнього пояса несучих ферм $H_0 = 0,4$ м.

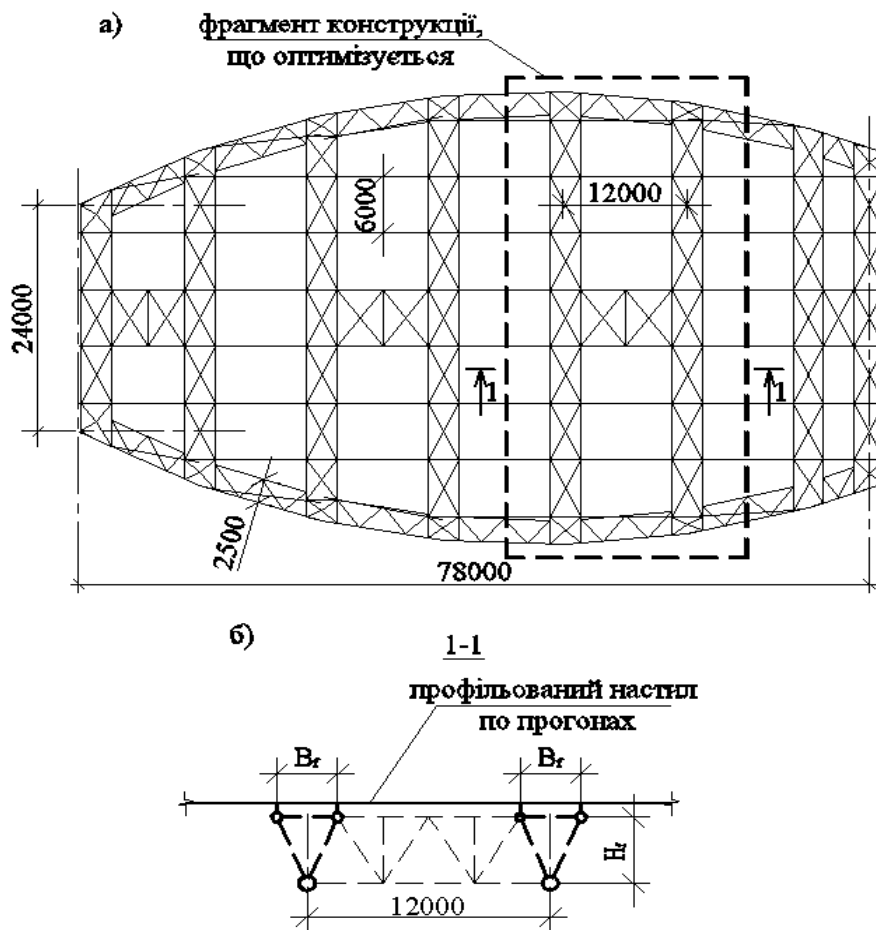


Рис. 5.6. Схема покриття торгово-розважального комплексу:

а) план; б) розріз несучого блоку конструкції

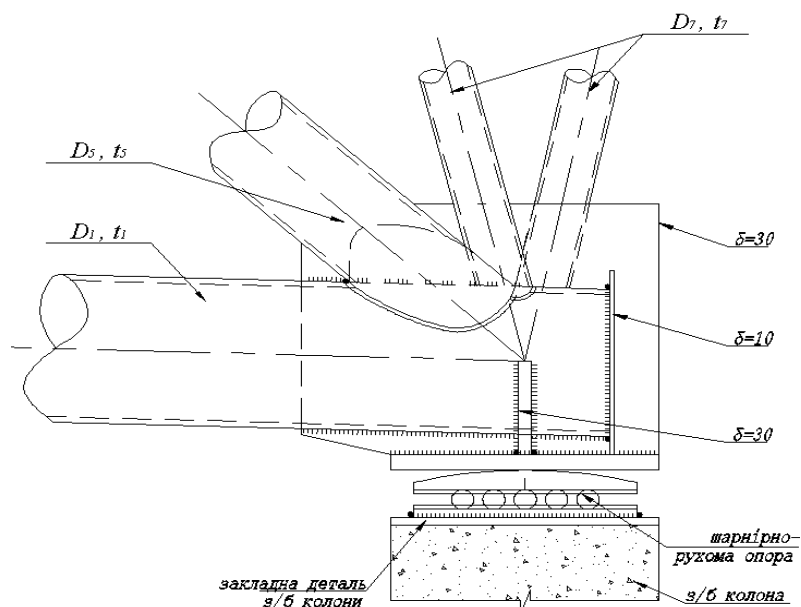


Рис. 5.7. Змінні проектування у вузлі шарнірно-рухомої опори

Перед тим як формулювати задачі оптимізації конструкції покриття, сформуємо його розрахункову схему.

Відомо, що загальний час оптимізації збільшується зі збільшенням кількості змінних проектування та часу аналізу напружено-деформованого стану конструкції, що залежить, у першу чергу, від кількості вузлів у розрахунковій схемі. Так, у загальній схемі конструкції покриття (рис. 5.8) кількість вузлів дорівнює 653, стрижнів – 1517. Ураховуючи сучасний рівень методів оптимізації, що реалізовані в доступному програмному забезпеченні, та обмеження обчислювальної швидкодії комп'ютерів, прийнято рішення оптимізувати фрагмент конструкції, який складається з найбільшого несучого блоку ферм та із суміжних частин прогонів та приопорних тригранних в'язей між несучими блоками ферм (рис. 5.6, 5.9).

Для виокремленого фрагмента призначено додаткові граничні умови, що моделюють вплив відкинutoї частини конструкції покриття. Для цього на вузли прогонів та вузли тригранних в'язей, що знаходяться на межі фрагмента конструкції, накладено опорні в'язі, що забороняють переміщення за віссю y , а для крайніх вузлів прогонів у фрагменті додатково накладено опорну в'язь, що забороняє поворот вузла навколо осі x . Порівняння результатів аналізу напружено-деформованого стану конструкції покриття в цілому та її фрагмента підтверджує обґрунтованість прийнятої розрахункової схеми фрагмента.

Довжини несучих ферм фрагмента становлять $L_5=48$ м та $L_6=45,7$ м. Будівельні підйоми для цих ферм відповідно складають $S_5=0,45$ м та $S_6=0,416$ м.

Друга задача полягає в пошуку таких значень B_f і H_f та розмірів поперечних перерізів стрижнів, при яких маса конструкції є мінімальною.

Третя задача полягає в пошуку максимального значення коефіцієнта k до граничного і експлуатаційного розрахункового значення навантаження від обладнання для освітлення, що встановлюється у процесі реконструкції, при

яких нормативні і додаткові вимоги виконуються. Початкове значення цього навантаження задано 0,5 кН/м, що визначене з урахуванням мінімальної ваги необхідного обладнання. Усі вихідні дані для цієї задачі (геометричні параметри, оптимальні розміри поперечних перерізів, обмеження, навантаження тощо) бралися з результатів розв'язування першої задачі оптимізації.

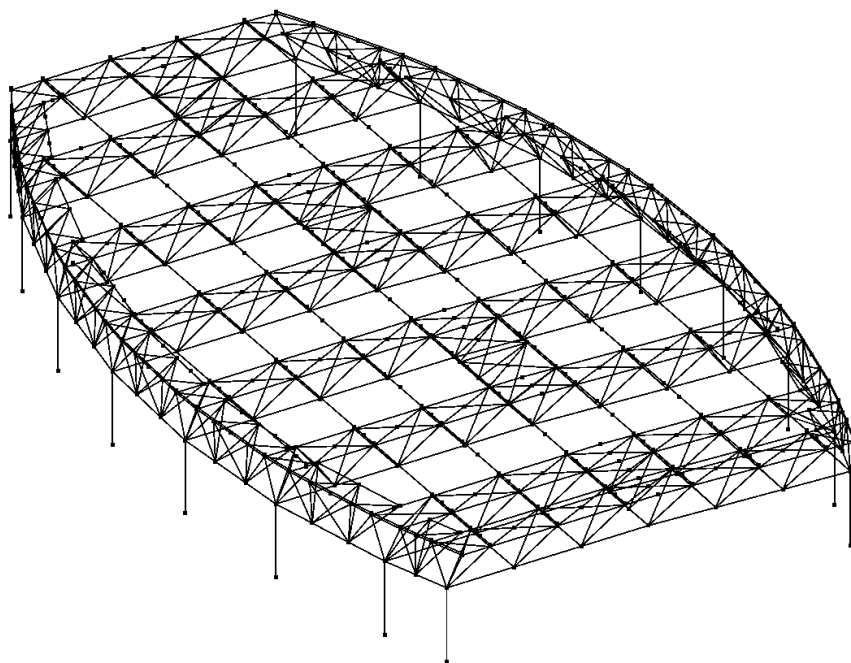


Рис. 5.8. Схема конструкції покриття

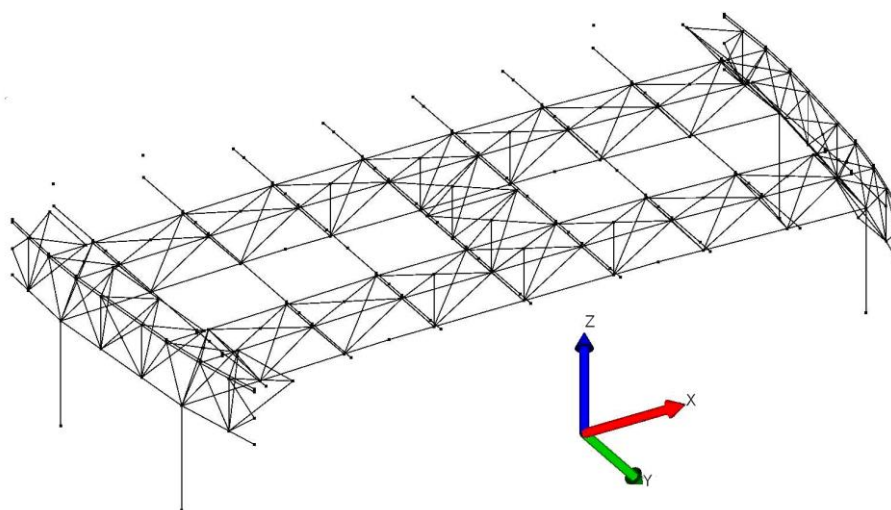


Рис. 5.9. Схема фрагмента конструкції покриття

Прийнято такі позначення розмірів поперечних перерізів елементів: D_i , t_i , $i = \overline{1, 11}$ - діаметри й товщини стінок для труб (табл. 5.3); H_{dw} - висота поперечного перерізу прогонів із двотаврів та швелерів.

Таблиця 5.3

Закріплення змінних проектування за елементами конструкції покриття

№	Елементи конструкції покриття	Змінні проектування
1	Нижній пояс ферм	D1, t1
2	Верхні пояси ферм	D2, t2
3	Хрестові елементи решітки верхніх поясів ферм	D3, t3
4	Інші елементи решітки верхніх поясів ферм	D4, t4
5	Розкоси між нижнім та верхніми поясами ферм	D5, t5
6	Вертикальні елементи (до перетину хрестових)	D6, t6
7	Нижній пояс середньої в'язевої ферми	D11, t11
8	Інші елементи середньої в'язевої ферми	D8, t8
9	Нижні пояси бічних в'язевих ферм	D7, t7
10	Інші елементи бічних в'язевих ферм	D9, t9
11	Опорні столики для прогонів	D10, t10

До системи обмежень залучено нормативні обмеження, що висуваються до шарнірно-стрижневих систем при їхній перевірці за двома групами граничних станів: обмеження міцності, стійкості, граничної гнучкості елементів конструкції покриття, обмеження вертикальних переміщень вузлів ферм та прогинів прогонів. Також враховано конструктивні обмеження при проектуванні конструкцій із труб: обмеження мінімальної товщини стінки $t_i \geq 0,3 \text{ см}$, $i = \overline{1, 11}$; обмеження тонкостінності – $D_i / t_i \leq 30$ для поясів й інших контурних елементів та $D_i / t_i \leq 90$ для примикаючих елементів. Обмеження, що формуються з умови конструювання безфасоночних вузлів із труб, записано у вигляді $t_1 \geq t_n$, при $n = 5, 6, 7, 9$ та $t_2 \geq t_m$, при $m = 3, 4, 5, 8, 10, 11$.

Зауважимо, що з технологічних та конструктивних міркувань у фермах із круглих труб допущено розцентрування осей у вузлах, що викликає появу моментів, які при певних умовах необхідно враховувати. Це було виконано після завершення оптимізації при конструюванні покриття. При цьому не

виникала потреба змінювати поперечні перерізи, оскільки розцентрування осей у вузлах допускалося в недовантажених ділянках поясів ферм.

Задачі оптимального проектування розв'язано з використанням програмного забезпечення OptCAD, математичний апарат якого поєднує метод скінчених елементів для виконання статичного лінійного аналізу стрижневих систем та градієнтний метод для вирішення задачі оптимізації.

Змінні проектування задачі оптимізації описуються в спеціальному вікні програми OptCAD (рис. Б.9 додатку Б).

Координати вузлів при описі розрахункової схеми конструкції покриття представлено у функціональній залежності від змінних та фіксованих параметрів геометричної схеми (рис. Б.10 додатку Б).

Враховано постійні навантаження від власної ваги всіх конструкцій покриття, елементів вентиляції, електромережі, пожежогасіння та від ліхтарів. Снігове та вітрове навантаження задано згідно з [38] для м. Рівне. Снігові навантаження передаються з покрівлі на прогони конструкції покриття та виражені аналітичними залежностями від змінних параметрів її геометричної схеми. Вітрові навантаження прикладаються на верхні й нижні пояси бічних в'язевих ферм та задані аналітичними залежностями від висоти несучої ферми покриття H_f .

Після розв'язування задач оптимізації в неперервній постановці виконано поетапну дискретизацію розв'язку з урахуванням сортаментів металопрокату. Результати вирішення задач оптимізації фрагмента конструкції покриття зведено в табл. 5.4.

У результаті оптимізації конструкції покриття визначено розміри поперечних перерізів стрижневих елементів та параметри несучих ферм конструкції покриття, які забезпечують зниження маси даного фрагмента конструкції покриття на 10.29 % у порівнянні з масою базової конструкції-прототипу.

У результаті розв'язування третьої задачі встановлено, що під час реконструкції сталеві стрижневої конструкції покриття можна змінити

умови її експлуатації шляхом використання резервів несучої здатності. Зокрема, згідно із постановкою третьої задачі можна початкове навантаження від обладнання для освітлення збільшити у $k = 1,29$ разів.

Таблиця 5.4

Результати оптимізації конструкції покриття торгово-розважального комплексу

Параметр	Значення змінних проектування для задачі оптимізації			
	першої		другої	
	неперервні	дискретизовані	Неперервні	дискретизовані
H_f , м	3,5*	3,5*	4,28	4,28
B_f , м	3*	3*	3,26	3,26
H_{dw} , см	30,93	33	29,91	30
$D_1; t_1$, см	35,85; 1,6	37,7; 1,6	34,05; 1,38	35,1; 1,4
$D_2; t_2$, см	27,63; 0,92	27,3; 1,0	25,30; 0,84	24,5; 0,9
$D_3; t_3$, см	8,52; 0,35	8,3; 0,35	7,98; 0,35	8,3; 0,35
$D_4; t_4$, см	8,29; 0,35	8,3; 0,35	7,59; 0,35	8,3; 0,35
$D_5; t_5$, см	18,24; 0,49	18; 0,55	18,17; 0,49	18; 0,55
$D_6; t_6$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
$D_7; t_7$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,58; 0,36	10,8; 0,4
$D_8; t_8$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
$D_9; t_9$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
$D_{10}; t_{10}$, см	11,02; 0,68	8,3; 0,35	7,79; 0,41	8,3; 0,35
$D_{11}; t_{11}$, см	10,75; 0,66	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
Маса, т	47.237	51,577	43.192	46,270
Маса, %	-	100	-	89,71
Примітка: * - позначено фіксовані значення.				

Розглянемо основні конструктивні рішення, що прийняті для даної конструкції покриття торгово-розважального комплексу в м. Рівне. З огляду на обмеження габаритів відправних елементів конструкції, які перевозяться від заводу-виготовлювача до будівельного майданчика залізничним транспортом, ферми прольотами до 36 м запроектовано із двох відправних одиниць, інші – із трьох.

Монтажні з'єднання з метою зниження трудомісткості робіт на будівельному майданчику та скорочення терміну монтажу запроектовано на високоміцних болтах М24 зі сталі марки 38Х “селект”. Заводські з'єднання тригранних ферм конструкції прийнято зварними.

Сталеві конструкції покриття торгово-розважального комплексу виготовлені підприємством групи "Світанок". Реалізована конструкція покриття зображена на рис. 5.10.



Рис. 5.10. Загальний вигляд конструкцій торгово-розважального комплексу

5.5. Оптимальне проектування реконструкції надземного переходу нафтогазопроводів через р. Стрий

Унаслідок поступової прогресуючої зміни положення берегової лінії та ускладнення подальшої експлуатації трубопроводів виникла необхідність реконструкції переходу нафтопроводу та газопроводу через р. Стрий у Стрийському районі Львівської області (рис. 5.11, а). Для забезпечення подальшої нормальної експлуатації переходу потрібно було продовжити його надземну частину з улаштуванням двох додаткових опор.

Даний перехід є прямолінійною багатопрогоною спорудою, довжина якого до реконструкції дорівнювала 364 м. Він спирається на 18 опор рамної конструкції з буронабивних паль, які попарно об'єднані між собою

залізобетонним ригелем. Основні несучі конструкції трубопроводів нерухомо закріплені до оголовка опори № 9 та шарнірно-рухомо спираються на оголовки інших опор споруди, що дозволяє їм вільно переміщатися вздовж переходу. Роль компенсаторів виконують спуски трубопроводів із переходу в підземну частину, що зазнає впливу ґрунту. До несучих конструкцій трубопроводів кріпиться місток обслуговування переходу.



а)

б)

Рис. 5.11. Балковий перехід: а) до реконструкції; б) після реконструкції

Газопровід є нерозрізною несучою конструкцією з металевої труби $\varnothing 325 \times 8$ мм. Конструкція нафтопроводу на переході складається з основної несучої конструкції - кожуха із труби $\varnothing 325 \times 8$ мм, та самого нафтопроводу із труби $\varnothing 114 \times 6$ мм, що вільно прокладена всередині кожуха та шарнірно-рухомо спирається на нього. Кожух та нафтопровід є нерозрізними. У прольоті між опорами № 16 і № 17 та на приопорних ділянках суміжних прольотів виконано підсилення (рис. 5.11, а) зі сталевих труб $\varnothing 325 \times 8$ мм для газопроводу та нафтопроводу.

Реконструкція переходу передбачала влаштування двох додаткових опор рамної конструкції з буронабивних паль та двох додаткових прольотів. Розміри поперечних перерізів труб газопроводу, нафтопроводу та кожуха на додаткових прольотах збігаються з розмірами відповідних існуючих труб.

У розрахунковій схемі переходу взаємодію труби нафтопроводу та її кожуха враховано за допомогою в'язей, що розміщені над опорами та рівномірно у двох додаткових проектованих прольотах та у двох існуючих прольотах на початку переходу й на його кінці (рис. 5.12, а). Такий варіант

даної взаємодії було прийнято з урахуванням того, що момент інерції труби нафтопроводу порівняно з моментом інерції її кожуха є приблизно в 34 рази меншим. Тому при однаковому вертикальному переміщенні в прольоті цих труб у найнапруженішому перерізі труби нафтопроводу виникають невеликі зусилля й напруження (до 40% від максимальних). Ураховуючи це, до кожуха прикладаються всі навантаження, у тому числі вагу нафтопроводу. Тим самим збільшено навантаження на кожух, що піде в запас міцності останнього.

Розрахункові схеми переходу для нафтопроводу та газопроводу, що утворюються після завершення всіх будівельно-монтажних робіт із реконструкції, показано на рис. 5.12.

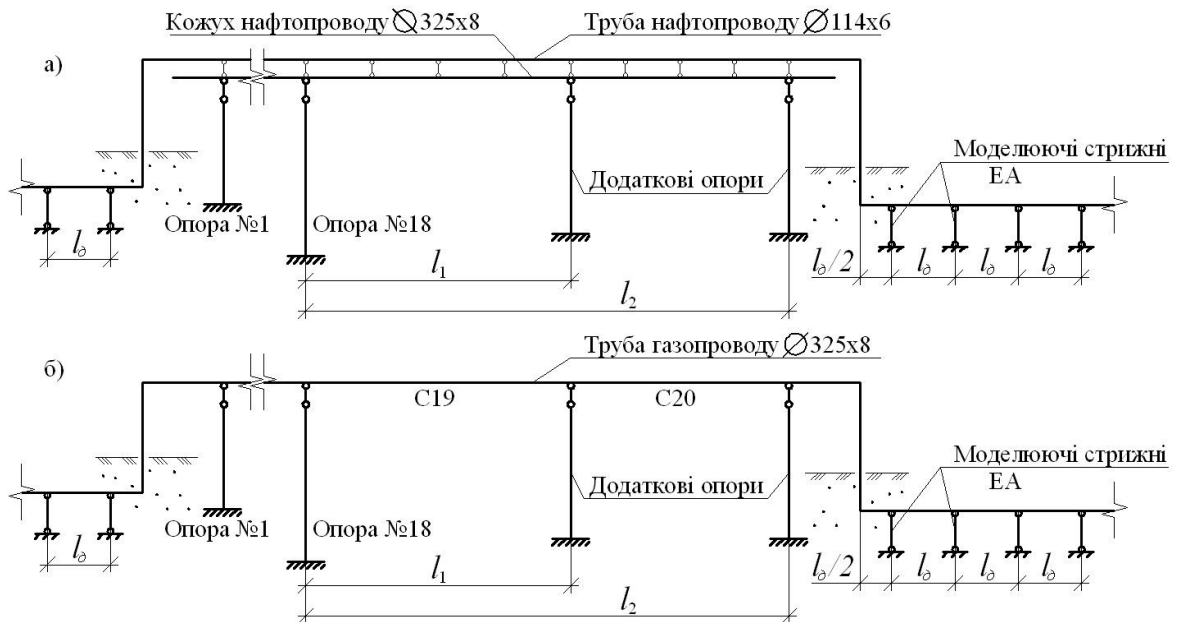


Рис. 5.12. Розрахункові схеми переходу після реконструкції (прольоти між опорами № 1 та № 18 умовно не показані): а) нафтопроводу; б) газопроводу

Для моделювання взаємодії підземної частини трубопроводів із ґрунтом використано модель пружної місцевої деформації ґрунту [1, 48, 57]. Незважаючи на ряд недоліків, ця модель є простою та прийнятною для практичних цілей, дає задовільні результати при розрахунку різних будівельних конструкцій.

Підземний трубопровід розглядається в [1] як стрижень (балка) трубчастого поперечного перерізу, що лежить на пружній основі. При

розв'язуванні задач на згин балок на пружній основі найчастіше використовують модель пружної місцевої деформації (гіпотезу Вінклера) [1], згідно з якою приймаються такі припущення: штамп зберігає зв'язок з основою незалежно від знака переміщення; між штампом та поверхнею ґрунту при згині не виникають сили тертя; усі деформації приймаються достатньо малими, завдяки чому можна користуватися принципом суперпозиції зусиль; реакція основи пропорційна переміщенню.

Для моделювання взаємодії підземного трубопроводу (із зовнішнім діаметром D_3) із ґрунтом використаємо розрахункову схему, що містить лінійно деформовані пружні опорні стрижні довжиною l_c , що закріплені до жорсткої основи й трубопроводу посередині ділянок довжиною l_∂ . Вертикальне переміщення Δ_i трубопроводу посередині i -ї ділянки викликає таке ж скорочення відповідного стрижня, у якому виникає зусилля P_{ci} .

Визначимо жорсткість опорного пружного стрижня при розтягу й стиску $E_o A_o$, при якій значення зусилля P_{ci} буде збігатися зі значенням реакції ґрунту P_{ui} , викликаній переміщенням трубопроводу в ґрунті на ту ж величину Δ_i .

Для визначення реакції ґрунту використаємо розрахункову схему, у якій посередині кожної ділянки підземного трубопроводу розміщено абсолютно жорсткий опорний стрижень, що кріпиться до трубопроводу та штампа, який взаємодіє з основою. Розміри штампів відповідають параметрам ділянок трубопроводу. Переміщення трубопроводу посередині i -ї ділянки Δ_i передаються через опорний стрижень та штамп на основу, викликаючи відповідну реакцію основи P_{ui} .

Прирівнюючи сили P_{ui} і P_{ci} , було виведено залежність для визначення $E_o A_o$ моделюючих стрижнів, що забезпечує еквівалентність зазначених схем:

$$E_o A_o = C_{y0} \cdot D_3 \cdot l_\partial \cdot l_c, \quad (5.2)$$

де C_{y0} – узагальнений коефіцієнт нормального опору ґрунту, МПа/см.

При такому значенні $E_0 A_0$ та заданому вертикальному переміщенні ділянки трубопроводу значення зусилля, що виникає в опорному моделюючому стрижні (рис. 5.13, в), буде збігатися зі значенням реакції ґрунту, викликаній цим переміщенням (рис. 5.13, б).

Можна виділити такі основні укрупнені етапи технології виконання робіт із реконструкції надземного переходу: етап 1 – улаштування додаткових опор; етап 2 – відрізання компенсаторної (вертикальної) частини існуючих труб із наступним монтажем на додаткових опорах прольотів труб і компенсаторів; етап 3 – зварювання елементів додаткової труби між собою та з існуючими трубами переходу; етап 4 – монтаж конструкцій площадки обслуговування переходу.

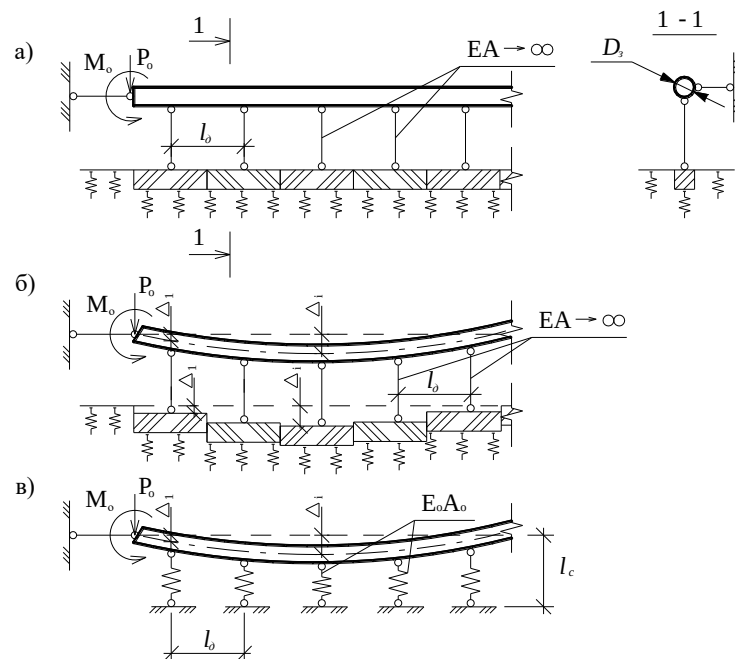


Рис. 5.13. Фрагменти розрахункових схем підземного трубопроводу:

- а) до деформації, з жорсткими опорними стрижнями; б) після деформації, з жорсткими опорними стрижнями; в) після деформації, з моделюючими пружними опорними стрижнями

Частина розрахункової схеми № 2 конструкції надземного переходу трубопроводу після завершення етапу 2 перед початком виконання етапу 3, де відбувається реконструкція, показана на рис. 5.14. Вона враховує рекомендоване кінцеве зварювання додаткових нових ділянок труб у трьох

місцях. На схемі № 2 місцям з'єднання частин трубопроводу відповідають чотири тимчасові шарніри - три шарніри $ш1$, $ш2$, $ш3$, що дозволяють взаємний поворот суміжних із шарніром поперечних перерізів, та шарнір $ш4$, що відображає роботу компенсаторної частини труби в момент зварювання й забезпечує відсутність у ній сили стиску чи розтягу. Ці шарніри утворені монтажними пристосуваннями, які забезпечують правильне взаємне положення суміжних частин трубопроводів перед зварюванням. Зауважимо, що трубопроводи закріплені від поздовжнього зміщення на одній з опор, що не показані на рис. 5.14.

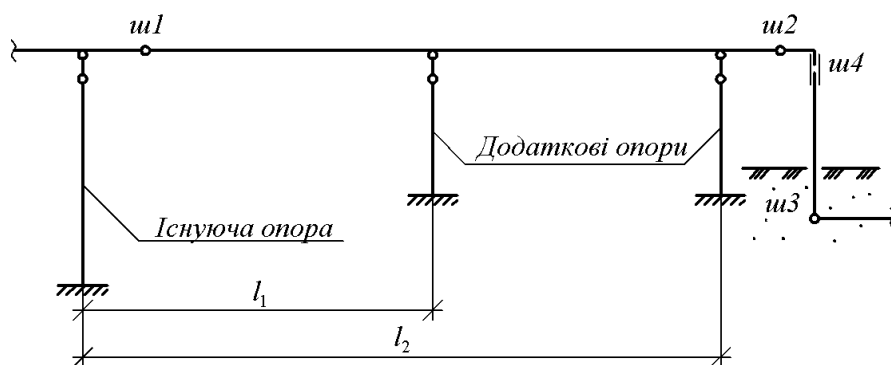


Рис. 5.14. Фрагмент розрахункової схеми № 2 надземного переходу трубопроводу.

При зварюванні ділянок труб у процесі виконання етапу 3 ліквідовуються тимчасові шарніри в розрахунковій схемі № 2 конструкції надземного переходу трубопроводу. Після цього утворюється розрахункова схема № 1, яка при подальшому виконанні робіт із реконструкції та при експлуатації залишиться без змін.

Зауважимо, що накладання в'язей без введення в них додаткових зусиль ПН та без зміни зовнішніх навантажень залишає незмінним наявний розподіл зусиль. Тому епюра моментів в утвореній схемі № 1 від навантажень, які були в момент зварки, також проходить через ті ж нульові точки – місця зварювання.

Після виконання етапу 4 на схему № 1 трубопроводу прикладалась частина сталого навантаження від ваги площадки обслуговування на двох додаткових проектованих прольотах. При подальшій експлуатації

реконструйованого переходу на всі прольоти його надземної частини можуть діяти тимчасові навантаження.

Для врахування при оптимальному проектуванні переходу технології виконання робіт із його реконструкції, розглянемо зміни його розрахункових схем та навантаження на ці схеми. Для цього виділимо такі основні два стани переходу, що виникають у процесі здійснення будівельно-монтажних робіт за запропонованою технологією їхньої реконструкції: стан 1, що виникає після відрізання компенсаторної (вертикальної) частини існуючих труб і наступного монтажу (з тимчасовим закріпленням, перед зварюванням) на додаткових опорах прольотів нових труб і компенсаторів; стан 2 – після завершення всіх будівельно-монтажних робіт.

Розрахункові схеми переходу, що відповідають стану 1, показано на рис. 5.15. Розрахункові схеми газопроводу, що відповідають його станам 1 (рис. 5.15) і 2 (рис. 5.12), відрізняються чотирма тимчасовими шарнірами – трьома шарнірами $ш1$, $ш2$, $ш3$, що дозволяють взаємний поворот суміжних із шарніром поперечних перерізів, та шарніром $ш4$, що забезпечує відсутність у компенсаторній частині трубопроводу поздовжньої сили стиску чи розтягу перед зварюванням. Для нафтового трубопроводу (рис. 5.15, а) місцям з'єднання його частин відповідають аналогічні шарніри та додатково шарнір $ш0$ на кожусі.

Для підвищення швидкодії програмного забезпечення та зменшення часу аналізу напружено-деформованого стану переходу застосовано запроповану методику врахування розрахункових схем, що змінюються внаслідок виконання будівельно-монтажних робіт при реконструкції [83, 84]. Дана методика зменшує кількість систем рівнянь методу скінченних елементів (МСЕ), що формуються та розв'язуються в процесі оптимізації. Це забезпечується формуванням та розв'язуванням однієї матричної системи рівнянь МСЕ з декількома правими частинами для різних розрахункових схем однієї конструкції, що відповідають різним стадіям реконструкції однієї конструкції [83].

Матрицю жорсткості кожної системи рівнянь формували для кінцевої розрахункової схеми нафтопроводу чи газопроводу, що утворюється після завершення всіх робіт із реконструкції, ураховуючи, що на таку схему прикладається більшість завантажень.

Згідно з методикою врахування змін розрахункової схеми потрібно в розрахунковій схемі, що відповідає стану 1 переходу газопроводу й, аналогічно, нафтопроводу, побудувати епюру зусиль від дії монтажного завантаження – власної ваги існуючих та проєктованих елементів переходу. Для побудови цієї епюри використаємо епюри, що будуються в розрахунковій схемі, що відповідає стану 2: епюру $\bar{B}^{(0)}$ від дії монтажного завантаження та n одиничних епюр попереднього напруження (ОЕПН) $\bar{A}_i^{(0)}$, $i = \overline{1, n}$, що виникають від уведення одиничних зусиль попереднього напруження у зайві в'язі. При цьому розглядаються зайві в'язі, що утворюються внаслідок замикання (ліквідації) раніше розглянутих тимчасових шарнірів $ш0 \dots ш4$. Для газопроводу $n=4$, а для нафтопроводу $n=5$. У точках шуканої епюри, що відповідають цим шарнірам, зусилля відсутні (у [83] ці точки називаються нульовими).

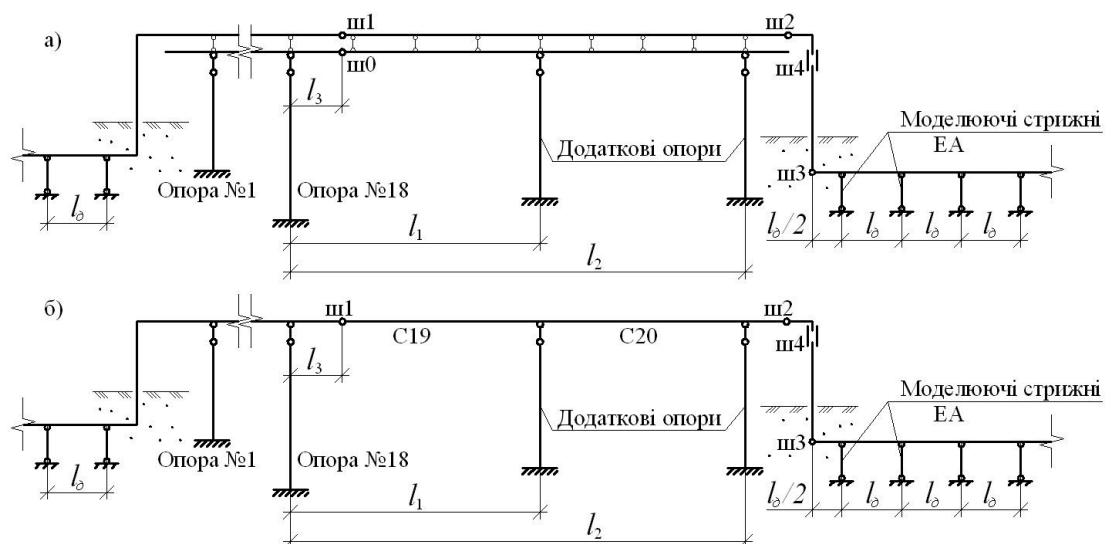


Рис. 5.15. Розрахункові схеми переходу, що відповідають його стану 1 (прольоти між опорами № 1 та № 18 умовно не показані): а) нафтопроводу;
б) газопроводу

Основна ідея методики врахування змін розрахункової схеми полягає в тому, що шукану епюру можна представити як суму лінійної комбінації n ОЕПН та епюри $\bar{B}^{(0)}$. Коефіцієнти лінійної комбінації визначаються із системи рівнянь, що враховує нульові значення шуканої епюри в нульових точках. Знайдені коефіцієнти можна використати в програмах оптимізації як коефіцієнти до відповідних ОЕПН при формуванні розрахункових сполучень завантажень.

Запроектуємо перехід із максимально допустимою сумарною довжиною двох додаткових проєктованих прольотів (рис. 5.11, б) з урахуванням розглянутих особливостей – технології виконання будівельно-монтажних робіт та взаємодії трубопроводів із ґрунтом. Для цього сформулюємо дві задачі оптимізації реконструкції переходу: для нафтопроводу та газопроводу. Для цих задач уведемо три змінні проєктування: l_1 – довжина першого додаткового проєктованого прольоту, l_2 – сумарна довжина двох додаткових проєктованих прольотів, l_3 – відстань від опори № 18 до місця з'єднання існуючих та проєктованих несучих конструкцій із труб (l_3 задає положення $ш0$ та $ш1$). У математичну модель задачі оптимізації переходу введено змінну l_3 тому, що від її значення залежить розподіл зусиль в елементах конструкції переходу й, як показали дослідження, залежить максимальне значення l_2 . Задачі оптимізації реконструкції переходу полягають у пошуку таких значень змінних проєктування, при яких $l_2 \rightarrow \max$.

До системи обмежень задачі оптимізації залучимо обмеження, що реалізують вимоги норм щодо проєктування переходу [148], а також додатково введемо обмеження l_3 значенням довжини наявних прямолінійних ділянок існуючих труб між опорою № 18 і компенсаторами: для газопроводу – не більше 2,24 м, для нафтопроводу – не більше 1,86 м.

Для пошуку оптимального рішення сформульованих задач використано програму OptCAD, математичний апарат якої поєднує метод скінчених

елементів для виконання статичного лінійного аналізу стрижневих систем та градієнтний метод для розв'язування задачі оптимізації. За основу було прийнято розрахункову схему № 1. Спосіб урахування монтажних станів конструкції за допомогою програми OptCAD включає наступні кроки:

1. Параметризація розрахункової схеми № 1. Уведення інформації про змінні параметри l_1 і l_2 у вікні “Змінні проектування”.

2. Уведення даних про розрахункову схему № 1, що включає інформацію про вузлові та стрижневі елементи, матеріали трубопроводу, типи жорсткості, опори, шарніри тощо. При цьому інформація про тимчасові шарніри не вводиться, проте використовується на наступних кроках.

3. Уведення інформації про положення та тип зайвих в'язей для побудови одиничних епюр ПН. Наголосимо, що в процесі реконструкції, фактично, попереднє напруження не вводиться, а одиничні епюри ПН використовуються тільки для побудови епюр для розрахункової схеми № 2.

4. Уведення інформації про завантаження трубопроводу (рис. Б.8 додатку Б). При цьому окремо виділяється монтажне завантаження частиною сталих навантажень, та завантаження рештою сталих навантажень (вагою площадки обслуговування). Ураховуються також тимчасові навантаження на площадку обслуговування та температурні впливи.

5. Записування у спеціальному вікні “Додаткові вирази та змінні стану” аналітичних виразів для визначення x_i , $i = \overline{1,4}$ за формулами (8). Для доступу до значень зусиль a_{ij} , b_i використовуються спеціальні функції [83].

6. Уведення у спеціальному вікні “Сполучення завантажень” (рис. Б.11 додатку Б) відповідної інформації. Для кожного сполучення у цьому вікні виводиться список усіх завантажень. Для кожного завантаження слід увести коефіцієнт, з яким завантаження входить у сполучення завантажень. Усі ОЕПН та епюра від монтажного завантаження включалися у кожне сполучення завантажень з коефіцієнтами x_i , $i = \overline{1,4}$ та 1,0 відповідно. Усі інші коефіцієнти сполучення приймалися згідно норм.

7. Формулювання функції мети $l_2 \rightarrow \max$. Пошук розв'язку задачі оптимізації градієнтним методом.

Відповідно до розробленої методики для врахування взаємодії підземних трубопроводів із ґрунтом під час оптимального проектування реконструкції надземного переходу трубопроводів були прийняті розрахункові схеми газопроводу та нафтопроводу із пружними стрижнями, що моделюють основу трубопроводів.

Вплив ґрунту на напружено-деформований стан даної конструкції враховували в такій послідовності:

1. Параметризація розрахункової схеми. Уведення інформації про змінні параметри l_1 і l_2 у вікні “Змінні проектування” програми OptCAD.

2. Уведення даних про розрахункову схему, що включає інформацію про вузлові та стрижневі елементи, матеріали трубопроводу, типи жорсткості, опори, шарніри, вплив температури тощо. При цьому вводиться інформація про моделюючі стрижні, для яких створюється окремий тип жорсткості та задається параметр жорсткості $E_o A_o$, розрахований за формулою (5.2).

3. Уведення інформації про завантаження трубопроводу та формування сполучень навантажень. При цьому враховуються два окремі завантаження температурним впливом, що враховують максимальну і мінімальну температуру трубопроводів.

4. Формулювання функції мети $l_2 \rightarrow \max$. Пошук розв'язку задачі оптимізації градієнтним методом.

Значення змінних проектування, отриманих внаслідок розв'язку сформульованих задач оптимізації показано в табл. 5.5.

Оскільки газопровід та нафтопровід мають спиратися на одні й ті ж опори, то за результати оптимізації реконструкції переходу братимемо результати розв'язку задачі оптимізації нафтопроводу, з меншим отриманим значенням $l_2 = 39,57$ м. Напружено-деформований стан газопроводу із

прийнятими довжинами ($l_1 = 39,57$ м, $l_2 = 21,025$ м, $l_3 = 2,24$ м) задовольняє нормативні вимоги.

Таблиця 5.5

Розв'язки задач оптимізації реконструкції переходу

Значення змінних для задачі оптимізації					
газопроводу			нафтопроводу		
l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м
21,199	42,953	2,24	21,025	39,570	1,86

Для оцінки отриманих результатів порівняно середню оптимальну довжину двох додаткових прольотів $l_1 / 2 = 39,57 / 2 = 19,785$ м і довжину останнього існуючого прольоту $l_4 = 17,5$ м. Середня оптимальна довжина на 13,06 % більша за довжину існуючого прольоту.

Оцінимо вплив властивостей ґрунту та зміни розрахункової схеми переходу на його напружено-деформований стан для восьми розрахункових моделей переходу (РМП), відмінності між якими представлено в табл. 5.6. Оцінювати різні варіанти РМП будемо за коефіцієнтом використання несучої здатності конструкції (надалі – коефіцієнт використання). Даний коефіцієнт може бути визначеним за значеннями складових елементів φ_i і $[\varphi]_i$ нормативних обмежень $\varphi_i \leq [\varphi]_i$, де φ_i – фактичне значення деякої характеристики (зусилля, напруження тощо), а $[\varphi]_i$ – граничне значення цієї характеристики. Для обмежень, заданих у такій формі, коефіцієнт використання визначається у відсотках за формулою $k = \max(\varphi_i / [\varphi]_i) * 100$, де $i = \overline{1, n}$, n – загальна кількість нормативних обмежень. В оптимальному варіанті конструкції коефіцієнти використання її стрижнів завжди є меншими або рівними 100%.

Для аналізу напружено-деформованого стану переходу в усіх його РМП використано однакові значення $l_1 = 39,57$ м, $l_2 = 21,025$ м, а також $l_3 = 1,86$ м для нафтопроводу та $l_3 = 2,24$ м для газопроводу.

У результаті аналізу напружено-деформованого стану розглянутих РМП встановлено, що найнапруженішими є два додаткових проєктованих прольоти. Для РМП 1 коефіцієнт використання цих прольотів, що є максимальним у їхньому спільному перерізі над першою додатковою опорою, складає 100%, для РМП 3 – є меншим на 2,04%. Для РМП 5 та 7 даний коефіцієнт дорівнює 100,36% та 99,92% відповідно, що свідчить про незначний вплив ґрунту на кожух нафтопроводу. Реалізація РМП 5 з абсолютно податливим ґрунтом є практично нездійсненою, тому незначним перевищенням на 0,36% несучої здатності найнапруженішого спільного перерізу двох додаткових проєктованих прольотів при цій моделі можна знехтувати.

Таблиця 5.6

Характеристика РМП

Ознака	Номер РМП							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип трубопроводу	н	г	н	г	н	г	н	г
Модель ґрунту	а	а	а	а	б	б	в	в
Урахування змін розрахункової схеми	+	+	–	–	+	+	+	+
Коефіцієнт використання, %	100	86,98	97,96	83,35	100,3	89,57	99,92	86,53

Умовні позначення: н, г – нафтопровід та газопровід відповідно, а – пружної місцевої деформації, б – абсолютно податливий, в – абсолютно жорсткий, “+”, “–” – зміни враховано та не враховано відповідно.

При порівнянні значень коефіцієнта використання для конструкції переходу газопроводу виявлено, що в РМП 4 порівняно із РМП 2 даний коефіцієнт у описаному перерізі двох додаткових проєктованих прольотів переходу є меншим на 3,63%, у РМП 6 – більшим на 2,59%, у РМП 8 – меншим на 0,45%.

Різниця значень коефіцієнта використання, отриманих у найнапруженішому спільному перерізі двох додаткових проєктованих прольотів газопроводу при РМП 4 та РМП 6, складає 6,22%.

5.6. Висновки до розділу 5

1. Залучення мови для запису задач оптимізації стрижневих металевих конструкцій до інтерфейсу програмного забезпечення дозволило врахувати специфіку проектної конструкції та конкретні умови проектування.

2. Наведено приклади постановки та результати розв'язування задачі оптимізації кількості типів жорсткості для 10-елементної консольної ферми. Виявлено збіжність отриманих результатів з даними інших авторів.

3. Прийнято та обґрунтовано розрахункову схему фрагмента стрижневої сталевий конструкції покриття торгово-розважального комплексу, сформульовано й розв'язано задачі його оптимізації за критерієм маси. Виявлено оптимальні розміри тригранних ферм і розміри поперечних перерізів їхніх елементів, які забезпечили зниження маси металевих конструкцій покриття на 10.29 % у порівнянні з масою базової конструкції-прототипу.

4. Сформульовано й розв'язано задачу оптимального проектування реконструкції конструкції покриття торгово-розважального комплексу. Виявлено можливість збільшення на 29 % початкового значення навантаження від освітлювального обладнання під час реконструкції.

5. Виконано оптимальне проектування реконструкції надземного переходу нафтогазопроводу через р. Стрий за розробленими методиками з урахуванням технології монтажу додаткових прольотів нафтопроводу та газопроводу. Визначено середню оптимальну довжину додаткових прольотів переходу, що на 13,06 % більша за довжину існуючого прольоту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Запропоновано представляти процес реконструкції СМК як послідовність змін розрахункової схеми, поперечних перерізів стрижнів і навантажень, а також регулювання зусиль, що впорядковані відповідно до послідовності будівельно-монтажних робіт. Розроблено графічне представлення процесу реконструкції та підсилення у вигляді діаграм.

2. Розроблено математичну модель реконструкції та підсилення СМК. До вихідних даних віднесено дані, що описують БРС конструкції, навантаження і процес реконструкції та підсилення. Алгоритм аналізу цієї моделі передбачає визначення зусиль і переміщень характерних точок конструкції, перевірки обмежень на кожному етапі реконструкції. До змінних стану віднесено техніко-економічні показники варіанта реконструкції та підсилення, зусилля в поперечних перерізах стрижнів, переміщення характерних точок конструкції тощо.

3. Удосконалено методику визначення напружено-деформованого стану СМК шляхом поділу на дві частини. У першій частині формується і розв'язується одна матрична система рівнянь методу скінченних елементів з декількома правими частинами для БРС, а в другій – визначаються поточні зусилля і переміщення на основі отриманих розв'язків, враховуючи властивості зусиль і переміщень у стрижневих системах, що підлягають принципу суперпозиції.

4. Удосконалено методику оптимізації параметрів конструкції підсилення і регулювання зусиль шляхом розширення множини типів змінних проектування, удосконалення мови запису задач оптимізації стрижневих металевих конструкцій внаслідок розширення множини спеціальних функцій для проектування реконструкції та підсилення.

5. Розроблено підсистему для оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК, що залучена до програми OptCAD і реалізовує розроблені методики.

6. Сформульовано і розв'язано задачі оптимального проектування реконструкції конструкції покриття торгово-розважального комплексу і надземного переходу нафтогазопроводу через р. Стрий. Виявлено можливість збільшення на 29 % початкового значення навантаження від освітлювального обладнання під час реконструкції комплексу. Середня оптимальна довжина додаткових прольотів переходу на 13,06 % більша за довжину існуючих прольотів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер. – М.: Надра, 1991. – 288 с.
2. Алгоритмы расчета стальных конструкций / Е.В. Горохов, В.Ф. Мущанов, А.М. Югов и др. // Под ред. Е.В. Горохова. – М.: Стройиздат, 1989. – 368 с.
3. Аналіз технічного стану та проблем експлуатації будівельних металевих конструкцій в Україні / О.В. Шимановський, В.М. Гордєєв, М.О. Микитаренко та ін. // Будівельні конструкції. – К., 2001. – № 3. – С. 18-24.
4. Баженов В.А. Оптимизация оболочек вращения с ограничениями по прочности / В.А. Баженов, В.И. Гуляев, В.Л. Кошкин, Ю.А. Шинкарь // Строительная механика и расчет сооружений. – 1988. – № 6. – С. 1-5.
5. Баженов В.А., Перельмутер А.В., Шишов О.В. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології: Підручник / За заг. ред. д. т. н., проф. В.А. Баженова. – К.: Каравела, 2009. – 696 с.
6. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш – К.: Изд-во “Сталь”, 2014. – 301 с.
7. Барабаш М. С. Программные комплексы САПФИР и ЛИРА-САПР – основа отечественных ВІМ-технологий: Монография / М. С. Барабаш, О. И. Палиенко, Д. В. Медведенко. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2013. – 366 с.
8. Барабаш М. С. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану конструкцій з урахуванням стадій життєвого циклу будівель і споруд: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 “Будівельні конструкції, будівлі і споруди” / М. С. Барабаш. – Одеса, 2014. – 40 с.

9. Бараненко В.О. Багатокритеріальні задачі синтезу ШСС та динамічне програмування // Придніпровська ДАБіА. Вісник академії. – 2000. – № 10. – С. 4-12.

10. Бараненко В.О. Генетичні алгоритми в оптимальному проектуванні конструкцій. Огляд // Придніпровська ДАБіА. Вісник академії. – 2002. – № 10. – С. 4-9.

11. Бараненко В.О. Проектування ферм мінімальної ваги з урахуванням локальних пошкоджень // Теоретичні основи будівництва. Theoretical Foundations of Civil Engineering / Придніпровська державна академія будівництва. Warsaw university of technology faculty of Civil engineering: В. Шесняк, В.І. Большаков (ред.). – Вип. 7. – 1999. – С. 39-46.

12. Барашиков А.Я. Надежность восстанавливаемых и усиливаемых зданий и сооружений / А.Я. Барашиков, Д.М. Подольский, М.Д. Сирота. – Черкассы, 1993. – 44 с.

13. Барашиков А.Я. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений. – К.: НМЦ Держнаглядохорпраці України, 1998. – 238 с.

14. Бельский М.Р., Лебедев А.Н. Усиление стальных конструкций. – К.: Будівельник, 1981. – 118 с.

15. Бирюлев В.В. О выборе оптимального числа типоразмеров сечений стержней металлических ферм // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1975. – № 4. – С. 3-9.

16. Білик А.С. Визначення оптимальних конструктивних рішень ферм у експертній системі одностадійного оптимального проектування //Зб. наук. праць УНДПІСК ім. В.М. Шимановського. – Київ, Вид-во «Сталь», 2009. – Вип. 4. – С. 119-132.

17. Білик А.С. Вирішення задачі кардинального вибору оптимальних конструктивних рішень ферм з гнутозварних замкнених профілів за допомогою експертної системи автоматизованого проектування//

«Строительство, материаловедение, машиностроение», сб. науч. трудов. Вып. 50. – Дн-вск, ПГАСА, 2009. – С.46-55.

18. Більський М.Р. Стійкість сталевих каркасів, підсилених під навантаженням / М.Р. Більський // Теорія і практика будівництва : [збірник наукових праць] / відповідальний редактор З. Я. Бліхарський. – Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2011. – 271 с. : іл. – (Вісник / Національного університету "Львівська політехніка" ; № 697). – С.30-35.

19. Бірюльов В.В. Проектування металевих конструкцій [Текст] / В.В. Бірюльов, І.І. Кошин, І.І. Крилов, А.В. Сильвестров; під ред. В.В. Бирюлева. – 2-е вид. – Л.: Стройиздат, 1990. – 431 с.

20. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2008. – 108 с.

21. Виноградов А.И. Вопросы расчета сооружений наименьшего веса // Тр. ХИИТ им. Кирова. – Вып. 25. – М.: Трансжелдориздат, 1955.

22. Виноградов А.И., Фесик С.П. О наивыгоднейшем распределении усилий в комбинированных системах // Прикладная механика, т. VII, вып. II. – К.: Изд-во АН УССР, 1961.

23. Геммерлиг Г.А. Система автоматизированного проектирования стальных строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1987. – 216 с.

24. Гладишев Д.Г. Дослідження технічного стану будівель, споруд та їх елементів: монографія / Д.Г. Гладишев, Г.М. Гладишев. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 304 с.

25. Гнідець Б.Г. Збірно-монолітні нерозрізні конструкції прогонових будов для будівництва та реконструкції мостів і шляхопроводів. НАН України. Фіз.мех.ін-т ім. Г.В.Карпенка.Збірник наукових праць. Вип. 4 Львів: Каменярь 2002.-с.38-43.

26. Гордеев В.Н., Калинина Л.Г. Опыт решения оптимизационных задач с использованием подсистемы оптимального проектирования САПР //

Исследования систем автоматизированного проектирования стальных конструкций: Сборник научных трудов. – М., Изд. ЦНИИпроектстальконструкция им. Мельникова, 1983. – С. 12-20.

27. Гордеев В.Н. Подсистема оптимального проектирования металлических конструкций САПР-ЦНИИПСК// Исследования по автоматизации проектирования строительных металлических конструкций: Труды ин-та ЦНИИпроектстальконструкция. – М., 1978. – Вып. 25. – С. 135-137.

28. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. – 3-е изд., перераб. – М: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 528 с.

29. Горохов Е.В. Методика и алгоритм оптимального проектирования при реконструкции магистральных линий электропередач / Е.В. Горохов, Г.И. Гримуд, Е.В. Шевченко // Будівельні конструкції, будівлі та споруди : вісник ДонДАБА / ДонДАБА. – Вип. 2 (33). – Макеевка, 2002. – С. 3-7.

30. Гребенюк Г.И. Поэтапный алгоритм оптимизации стержневых конструкций с учетом особенностей работы узлов и соединений / Г.И. Гребенюк, И.В. Кучеренко // Известия вузов. Строительство. – 1997. – № 4. – С. 29-33.

31. Гребенюк Г.И. Разработка структуры эффективного алгоритма параметрической оптимизации гармонически нагруженных конструкций / Г.И. Гребенюк, В.И. Роев, Д.Б. Турилов // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 5. – С. 39-46.

32. Губанов В.В. Забезпечення заданої довговічності металевих промислових висотних споруд. Автореферат дисертації на здобуття наук. ст. док. техн. наук. – Макіївка, 2013. – 36 с.

33. Гуляев В.И. Методы оптимизации в строительной механике : учеб. пособие / В.И. Гуляев, В.А. Баженов, В.Л. Кошкин. – К.: УМК ВО, 1988. – 192 с.

34. Данциг Дж.Б. Линейное программирование, его приложения и обобщения. – М.: Прогресс, 1966. – 265 с.
35. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика: Учебник. 12-е изд., стер. – СПб.: Издательство "Лань", 2010. – 656 с.
36. ДБН 362-93. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації – К.: Держ. Комітет України в справах архіт. буд-ва та охорони історич. середовища, 1995. – 93 с.
37. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінбуд України, 2009. – 37 с.
38. ДБН В.1.2-6-2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. – К.: Мінбуд України, 2006. – 63 с.
39. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції: норми проектування, виготовлення і монтажу. – К.: Мінбуд України, 2011. – 127 с.
40. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції: норми проектування. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
41. ДБН В.3.1-1-2002. Ремонт та підсилення несучих і огорожувальних конструкцій і основ промислових будівель та споруд – К.: Держкомітет України буд-ва і архіт., 2003. – 82 с.
42. Денисов Є.В. Встановлення параметрів напруженого стану елементів металевих фермових конструкцій, що експлуатуються, удосконаленням вібраційним методом. Автореферат дисертації на здобуття наук. ст. канд. техн. наук. – Макіївка, 2006. – 22 с.
43. Демчина Б.Г. Підсилення фундаментів будинків під час їх реконструкції у м. Львові / Б.Г. Демчина, Б.В. Моркляник, Я.О. Базилевич, Т. Пелех // Архітектурний вісник № 1-1(12).- Львів: ПП «Кварт», 2001.- с.34-35.

44. ДСТУ Б В.1.2-16: 2013 Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва. – К.: 2013. – 41 с.

45. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини та переміщення. Вимоги проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 15 с.

46. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990: 2002, IDT). Мінрегіон України. – К.: 2008.

47. Aqtime. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aqtime>

48. Жемочкин Б.Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б.Н. Жемочкин, А.П. Сеницын. – М.: Госстройиздат, 1962. – 240 с.

49. Зеленцов Д.Г. Моделі розв'язання задач оптимізації кородованих багатоелементних балкових конструкцій / Зеленцов Д.Г., Ускова Т.Ю. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – К, 2011, № 3. – С. 30-33.

50. Каганов В.Л. Автоматизация проектирования стальных каркасов // Строительная механика и расчет сооружений, 1991. – № 3. – С. 57-61.

51. Каганов В.Л. Анализ результатов проектирования оптимальных сечений стальных рам // Строительная механика и расчет сооружений, 1987. – № 3. – С. 12-15.

52. Калинин А.А. Обследование, расчет и усиление зданий и сооружений: Учеб. пособие. – М.: АСВ, 2002. – 160 с.

53. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD – М.: Издательство СКАД СОФТ, 2009. – 656 с.

54. Кваша В.Г., Салійчук Л.В., Мельниченко В.В. Підсилення і капітальний ремонт залізобетонного моста після вогневої дії високої інтенсивності. // Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Вип. 64. – К.:НТУ, 2002. – С. 92-94.

55. Кикин А.И. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / А.И. Кикин, А.А. Васильев, Б.Н. Кошутин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 301 с.

56. Клименко Є.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд: Навч. посібник. – К.: Центр навчальної літератури, 2004. – 304 с.

57. Ковров А.В. Напряженно-деформированное состояние неразрезных железобетонных балок, лежащих на упругом основании / А.В. Ковров, Т.А. Синюкина // Вісник НУ “Львівська політехніка” № 662. Теорія і практика будівництва. – Львів: НУ “ЛП”, 2010. – С. 272-279.

58. Колесниченко С.В. Оценка рисков эксплуатации стальных конструкций в условиях истощения их ресурса / Збірник наукових праць УкрПСК ім. В. М. Шимановського. – К.: Сталь, 2012. – Вип. 9. – С. 262-272.

59. Королёв В.П. Нормативные требования оценки коррозионной опасности при проектировании строительных объектов / В. П. Королёв, А. Н. Гибаленко // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2014. - Вип. 13. - С. 133-145.

60. Кошкин В.Л. Численное решение задач оптимального проектирования элементов конструкций при статических и стационарных динамических нагрузках : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.23.17 «Строительная механика» / В.Л. Кошкин. – К.: КИСИ, 1987. – 17 с.

61. Лащенко М.Н. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции. – Л.: Стройиздат. 1987. – 136 с.

62. Лащенко М.Н. Регулирование напряжений в металлических конструкциях. – Л., Стройиздат, 1966.

63. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.

64. Лінійна алгебра та аналітична геометрія: Навч. посібник / В. В. Булдігін, І. В. Алексєєва, В. О. Гайдей, О. О. Диховичний, Н. Р. Коновалова, Л. Б. Федорова; за ред. проф. В. В. Булдігіна. — К.: ТВіМС, 2011. — 224 с.

65. Лобанов Л.М. Технічний стан конструкцій та споруд [Текст] / Лобанов Л.М // Промислове будівництво та інженерні споруди. – К., 2010. – № 3. – С. 31-34.

66. Мажид К.И. Оптимальное проектирование конструкций : пер. с англ. [Текст] / К. И. Мажид. – М.: Высшая школа, 1979. – 237 с.

67. Мельников Н.П. Металлические конструкции: Современное состояние и перспективы развития. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

68. Металеві конструкції: Підручник / О.О. Нілов, В.О. Пермяков, О.В. Шимановський, С.І. Білик та ін.; під заг. ред. О.О. Нілова та О.В. Шимановського. – К.: Сталь, 2010. – 869 с.

69. Металлические конструкции. В 3 т. Т.2. Конструкции зданий: Учеб. для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый и др.; Под ред. В.В. Горева. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 528 с.

70. Металлические конструкции. В 3 т. Т.3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова) – М.: изд-во АСВ, 1999. – 528 с.

71. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво, затверджена наказом Міністерства економіки та з питань європейської інтеграції та Міністерства фінансів України 26.09.2001 № 218/446 // <http://budstandart.ua/read/document/show/3105252/id/3091320?submenu=10722>

72. Методические рекомендации по технологии усиления металлических конструкций на реконструируемых объектах / НИИСП. – К., 1984. – 58 с.

73. Мошкин Л.С. Определение оптимальных усилий предварительного напряжения для вантовых систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Киев, 1974.

74. Ольков Я.И., Холопов И.С. Оптимальное проектирование металлических предварительно напряженных ферм. – М.: Стройиздат, 1985. – 156 с.

75. Основи реконструкції будівель і споруд : навч. посіб. / І.Г. Іваник, С.І. Віхоть, Р.С. Пожар, Я.І. Іваник, Ю.Ю. Вибранець; ред.: І.Г. Іваник. – 2-ге вид., випр. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", 2013. – 270 с.

76. Пелешко И.Д., Юрченко В.В., Балук И.М. Об оптимальном закреплении поперечных сечений за стержнями металлических конструкций // Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство). – Брест: Изд-во БрГТУ, 2009. – С. 222-227.

77. Пелешко И.Д., Юрченко В.В. Анализ работы программного обеспечения для оптимизации стержневых металлических систем // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры “Строительные конструкции, здания и сооружения”, № 2. – Макеевка: Изд-во ДонНАСА, 2002. – С. 36-42.

78. Пелешко І.Д. Оптимізація стрижневих конструкцій з урахуванням скорочених сортamentів металопрокату / І.Д. Пелешко, Ю.Є. Ковальчук, І.М. Балук // Збірник наукових праць “Геодезія, архітектура та будівництво: Матеріали II Міжнар. конференції молодих вчених GAC-2009”. – Л.: НУ “ЛП”, 2009. – С. 95-97.

79. Пелешко І.Д. Удосконалення математичної моделі стрижневих металевих конструкцій для систем автоматизованого проектування / І.Д. Пелешко, В.В. Юрченко, Ю.Є. Ковальчук // Вісник ДонНАБА “Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології”: Збірник наукових праць. – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2009. – Вип. 2009-4(78). – С. 155–160.

80. Пелешко І.Д., Балук І.М. Оптимальне проектування реконструкції надземного балкового переходу трубопроводів // Металеві конструкції. – 2011. – Том 17, № 3. – С. 191-198.

81. Пелешко І.Д., Балук І.М. Оптимальне проектування реконструкції надземного переходу трубопроводу з урахуванням його взаємодії із ґрунтом

// Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 2. – Київ, ДП НДІБК, 2011. – С. 299-306.

82. Пелешко І.Д., Юрченко В.В. Застосування генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних проектних рішень металевих конструкцій // VIII Українська науково-технічна конференція "Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее" (18-22 октября 2004 г., Киев, Украина) / Сб. докл., ч. 1 / Под общ. ред. А. В. Шимановского. – К.: "Сталь", 2004. – С. 250-260.

83. Пелешко І.Д. Оптиміальне проектування стрижневих металевих конструкцій з урахуванням монтажних станів / І.Д. Пелешко, І.Д. Іванейко, І.М. Балук // Вісник ДонНАБА "Сучасні будівельні матеріали, конструкції та інноваційні технології зведення будівель і споруд": Збірник наукових праць. – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2010. – Вип. 2010-5(85). – С. 353-359.

84. Пелешко І.Д. Про аналіз напружено-деформованого стану підсилюваних стрижневих металевих конструкцій / І.Д. Пелешко, І.М. Балук // Збірник наукових праць "Геодезія, архітектура та будівництво: Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених GAC-2010". – Л.: НУ "ЛП", 2010. – С. 84-85.

85. Пелешко І.Д. Проблемно-орієнтована мова запису вихідних даних програми оптимізації стрижневих металевих конструкцій // Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сборник научных трудов. – Одесса: ОГАСА, 2003. – С. 185-191.

86. Пелешко І.Д. Формалізація процесу реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій / І.Д. Пелешко, І.М. Балук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" Теорія і практика будівництва, № 742, 2012 р. – Л.: Вид-во НУЛП, 2012. – С. 149-154.

87. Пелешко І.Д., Балук І.М. Оптимізація типорозмірів поперечних перерізів стрижнів сталевих конструкцій // Збірник наукових праць

УкрНДІПСК ім. В. М. Шимановського. – К.: Сталь, 2009. – Вип. 4. – С. 142-151.

88. Пелешко І.Д., Балук І.М. Удосконалення та використання мови для запису задач оптимізації стрижневих металевих конструкцій // Збірник наукових праць УкрНДІПСК ім. В.М. Шимановського. – К.: Сталь, 2010. – Вип. 6. – С. 172-179.

89. Пелешко І.Д., Балук І.М. Формалізація снігових навантажень для системи оптимізації стрижневих конструкцій OptCAD // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – К.: ДП НДІБК, 2009. – Вип. 72. – С. 257-264.

90. Пелешко І.Д., Лісоцький Р.В., Балук І.М. Оптимальне проектування сталеві стрижневої конструкції покриття торгово-розважального комплексу // Збірник наукових праць УкрНДІПСК ім. В. М. Шимановського. – К.: Сталь, 2010. – Вип. 5. – С. 181-191.

91. Пелешко І. Д. Оптимальне проектування двошарових поперечних рам з елементами наскрізного перерізу для критого складу зі збереженням технічної сірки / І. Д. Пелешко, М. М. Пальчик, В. В. Юрченко, М. А. Біляєв // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2009. – Вип. 3. – С. 55-70.

92. Пелешко И.Д. Оптимизация и исследование параметров металлических плоских стержневых систем при проектировании их реконструкции и усиления. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Киев, 1986. – 19 с.

93. Пелешко И. Д. Переменные проектирования для формулировки задач оптимизации топологии стержневых конструкций / И. Д. Пелешко, В. М. Иванейко, В.В. Юрченко // Збірник наукових праць Національного університету водного господарства та природокористування. – 2013. – Вип. 3(63). – С. 365-374.

94. Пелешко І.Д. Про один спосіб визначення зусиль від попереднього напруження при оптимізації стрижневих металевих конструкцій [Текст] / І.Д. Пелешко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" Теорія і практика будівництва, № 495, 2004 р. – Л.: Вид-во НУЛП, 2004. – С. 151-153.

95. Пелешко І.Д. Про удосконалення одного з методів оптимізації сталевих конструкцій / І.Д. Пелешко, В.В. Юрченко // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. – 1998 р. – № 360. – С. 168-175.

96. Пелешко І. Д. Про формулювання задач оптимізації металевих стрижневих конструкцій в системах автоматизованого проектування / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // Вісник НУ "Львівська політехніка" № 441. Теорія і практика будівництва. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2002. – С. 148-152.

97. Пелешко І. Д. Урахування зміни жорсткості елементів під час визначення зусиль у процесі оптимального проектування підсилення стрижневих металевих конструкцій / І. Д. Пелешко, З.Я. Бліхарський, І. М. Балук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – 2014. – С. 614-620.

98. Пелешко І.Д. Формування розрахункових схем і визначення напружено-деформованого стану стрижневих металевих конструкцій у процесі реконструкції й підсилення / І.Д. Пелешко, З.Я. Бліхарський, І.М. Балук // Металеві конструкції. – 2013. – Том 19, № 1. – С. 37-47.

99. Перельмутер А.В. Основы расчета вантово-стержневых систем / А.В. Перельмутер – М.: Книга по Требованию, 2012. – 193 с.

100. Перельмутер А.В. Управление поведением несущих конструкций – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 184 с.

101. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – 4-е изд., перераб. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.

102. Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций. – К.: Сталь, 2008. – 538 с.

103. Пермяков В.О. Про вибір цільової функції при оптимальному проектуванні металевих конструкцій // VI Міжнародна наукова конференція "Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля" Львів-Кошице-Жешув: Збірник матеріалів конференції. – Ч.1 – Будівництво. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2001. – С. 176-182.

104. Пермяков В.А., Ременников А.М. Комплекс программ для решения задач оптимизации стержневых конструкций // Металлические конструкции и испытание сооружений: Межвузовский тематический сборник трудов / Под ред. Белого Г.И. – Л.: ЛИСИ, 1989. – С. 60-63.

105. Пермяков В.А., Ременников А.М. Поиск геометрических схем металлических конструкций на основе методов нелинейного программирования // Совершенствование сварных металлических конструкций / Под ред. Жербина М.М.; АН Украины, ин-т электросварки им. Патона Е.О. – К.: Наукова думка, 1992. – С. 68-73.

106. Пермяков В.А., Шаучювенас Г.Л. Оптимальное проектирование пространственных стержневых конструкций // Промышленное строительство и инженерные сооружения, № 1, 1992. – С. 38-42.

107. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.

108. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) / УкрНИИпроектстальконструкция. – М.: Стройиздат, 1989. – 159 с.

109. Почтман Ю. М., Пятигорский Э. П. Оптимальное проектирование строительных конструкций. – Киев-Донецк: Вища школа, 1980. – 112 с.

110. Практична реалізація розрахункового методу регулювання НДС в комбінованих конструкціях / М.В. Гоголь // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2009. – № 655. – С. 58-66.

111. Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій : Навч. посіб. / В.О. Пермяков, М.В. Гоголь, І.Д. Пелешко, М.Р. Більський, Б.С. Чайка; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л., 2005. – 180 с.

112. Расчет машиностроительных конструкций на прочность и жесткость / Н. Н. Шапошников, Н. Д. Тарабасов, В. Б. Петров, В. И. Мяченков – М.: Машиностроение, 1981. – 333 с.

113. Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет [Текст] / И.С. Ребров – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1988 – 288 с.

114. Ребров И.С. Работа сжатых элементов стальных конструкций, усиленных под нагрузкой. – Л.: Стройиздат, 1976. – 176 с.

115. Регулювання зусиль у будівельних конструкціях у процесі проектування та експлуатації / М. В. Гоголь, М. Р. Більський // Вісн. Львів. терит. від-ня Акад. буд-ва України. – 2010. – № 5. – С. 102-107.

116. Регулювання посилення поздовжньо-стиснених сталевих конструкцій за допомогою стягування розпірок / М. Р. Більський, М. В. Котів // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2008. – № 627. – С. 5-9.

117. Рейтман М. И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел. – М.: Наука, 1976. – 266 с.

118. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1989. – 65 с.

119. Реконструкция зданий и сооружений / А.Л. Шагин, Ю.В. Бондаренко, Д.Ф. Гончаренко, В.Б. Гончаров / Под ред. А.Л. Шагина. – М.: Высшая школа, 1991. – 352 с.

120. Реконструкция промышленных предприятий / О.Б. Белостоцкий, Б.С. Дамаскин, Т.П. Третьак. – К., Будівельник, 1986. – 144 с.

121. Реконструкция промышленных предприятий [Текст] : в 2 т. / под ред. В.Д. Топчия, Р.А. Гребенника. – М. : Стройиздат, 1990. – (Справочник строителя). Т. 1. – 591 с.

122. Реконструкція будівель і споруд агропромислового комплексу / За ред. Вахненка П.Ф. – К.: Урожай, 1994. – 295 с.

123. Ремонт и реконструкция жилых и общественных зданий [Текст] / А.Г. Ройтман, Н.Г. Смоленская. – Москва : Стройиздат, 1978. – 319 с.

124. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. – М., Стройиздат, 1977. – 129 с.

125. Розин Л.А. Стержневые системы как системы конечных элементов. – Л.: ЛГУ, 1976. – 232 с.

126. Розрахунок регулювання зусиль у процесі підсилення стиснутих елементів сталевих каркасів / М.Р. Більський, Р.І. Кінаш // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2012. – № 737. – С. 5-14.

127. Ройтман А.Г. Предупреждение аварий жилых зданий. – М.: Стройиздат, 1990. – 240 с.

128. Сахновский М.М. Металлические конструкции [Текст] : [техническая эксплуатация] / под общ. ред. М.М. Сахновского. – Киев : Будівельник, 1976. – 256 с.

129. Сахновский М.М. Уроки аварий стальных конструкций [Текст] : научное издание / М.М. Сахновский, А. М. Титов. – Киев : Будівельник, 1969. – 200 с.

130. Сергеев Н.Д. К расчету статически неопределимых систем при их многоэтапной последовательной модификации [Текст] / Н.Д. Сергеев // Строительная механика и расчет сооружений. – М., 1976. – № 4. – С. 26-31.

131. Сергеев Н.Д. Расчет статически неопределимых систем при их многоэтапной последовательной модификации [Текст] / Н.Д. Сергеев // Строительная механика и расчет сооружений. – М., 1975. – № 6. – С. 11-16.

132. Сильвестров А. В. Повышение надежности стальных конструкций при низких температурах. – Новосибирск, НИСИ, 1977. – 72 с.

133. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.
134. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы [Текст] / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 52 с.
135. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
136. Стальные конструкции производственных зданий: Справочник / А.А. Нилов, В.А. Пермяков, А.Я. Прицкер. – К.: Будівельник, 1986. – 272 с.
137. Стійкість позацентрово-стиснених сталевих стрижнів, підсилених з регулюванням зусиль / М. Р. Більський, М. В. Котів, Р. М. Котів // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2012. – № 742. – С. 30-34.
138. Стрелецкий Н. С., Стрелецкий Д. Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. – М.: Стройиздат, 1964. – 360 с.
139. Строительная механика. Стержневые системы [Текст] / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лащеников, Н. Н. Шапошников; Под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1981. – 512 с.
140. Технічна експлуатація, реконструкція і модернізація будівель : Навч. посіб. / А.І. Гавриляк, І.Б. Базарник, Р.І. Кінаш, М.В. Котів, М.Р. Більський; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л., 2006. – 538 с.
141. Технологія будівельного виробництва: Підручник / В.К. Черненко, М.Г. Ярмоленко, Г.М. Батура та ін.; За ред. В.К. Черненка, М.Г. Ярмоленка. – К.: Вища шк., 2002. – 430 с.
142. Трофимович В.В. Оптимальное проектирование металлических конструкций [Текст] / В.В. Трофимович, В.А. Пермяков – К: Будівельник, 1981. – 136 с.
143. Трофимович В.В. Оптимизация металлических конструкций / В.В. Трофимович, В.А. Пермяков. – К.: Вища школа, 1983. – 200 с.

144. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции / В.Н. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров. – М.: Стройиздат, 1987. – 220 с.

145. Федоренко К.Г. Эффективность использования капитальных вложений при реконструкции предприятий / К.Г. Федоренко, В.А. Нагорный, Н.П. Денисенко. – К.: Будівельник, 1983. – 206 с.

146. Хило Е.Р., Попович Б.С. Усиление строительных конструкций. – Львов: Вища шк., 1985. – 156 с.

147. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции. – М.: Мир, 1983. – 478 с.

148. Царинник О.Ю. Металеві конструкції. Спецкурс: Навчальний посібник [Текст] / О.Ю. Царинник. – Л: Вид-во “Бескид Біт”, 2004. – 304 с.

149. Шевченко Е.В. Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи. – Макеевка: ДонГАСА, 1999. – 169 с.

150. Шимановский А.В. Методы и мероприятия по устранению дефектов и повреждений при усилении и реконструкции высотных сооружений / А. В. Шимановский, С. М. Кондра // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2014. - Вип. 13. - С. 5-11.

151. Шимановский В.Н. Оптимальное проектирование пространственных решетчатых покрытий / В.Н. Шимановский, В.Н. Гордеев, М.Л. Гринберг. – Киев: Будівельник, 1987. – 224 с.

152. Югов А.М. Программный комплекс расчета пространственной размерной цепи для металлических стержневых конструкций / А.М. Югов, А.Б. Бондарев // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2013. - Вип. 11. - С. 62-71.

153. Юрченко В.В. Про дискретну оптимізацію металевих стрижневих систем // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменярь, 2002. – С. 429-436.

154. Baluk I. M. On the calculation forces from the regulation forces in the structure with variable design scheme / I. M. Baluk // Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених GAC-2013. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 1 електрон. опт. Диск (CD-ROM) С. 144-145.

155. Farkas J. Design and optimization of metal structures / J. Farkas, K. Jármai. – Chichester: Horwood Publishing Ltd., 2008. – 300 p.

156. Fully Constrained Design: A general and scalable method for discrete member sizing optimization of steel truss structures // [Computers & Structures Volume 140](#), 30 July 2014, Pages 55–65. (Forest Flagera, Grant Soremekunb, Akshay Adyac, , Kristina Shead, , John Haymakere, Martin Fischer).

157. Gedig, M.H., Stiemer, S.F. Decision Tools for the Engineering of Steel Structures // Electronic Journal of Structural Engineering. – Volume 6, 2006. – pp.19-39.

158. Gorochoy E.V. Durability of steel structures under reconstruction / E.V. Gorochoy, V.P. Korolev, A.A. Balkena. – Rotterdam, Brookfield, 1999. – 305 p.

159. Peleshko I.D. An optimum structural computer-aided design using update gradient method / I.D. Peleshko, V.V. Yurchenko // Proceedings of the 8th International conference “Modern building materials, structures and techniques” / Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. – 2004. – P. 860-865.

160. Peleshko I. D. Computer-aided design and optimization of steel structural systems / Ivan D. Peleshko, Vitalina V. Yurchenko, Nikita A. Beliaev // Zeszyt naukowy Politechniki Rzeszowskiej Nr 264. Budownictwo i Inzynieria Srodowiska z. 52. – Rzeszow, 2009. – P. 145-154.

161. Rajesh Kumar Cost Optimization of Industrial Building using Genetic Algorithm // International Journal of Scientific Engineering and Technology Volume 2 Issue 4, pp : 185-191

162. Recent advances in optimal structural design // Edited by Burns S.A.; Structural Engineering Institute. Technical Committee on Optimal Structural Design (Corporate Author). – Reston, Va.: ASCE Publications, 2002. – 385 p.

163. Rosen J.B. The gradient projection method for nonlinear programming. Part II. Nonlinear constraints // Journ. SIAN. – 1961. – P. 514-532.
164. Spillers W. R. Structural Optimization / W. R. Spillers, K. M. MacBain. – New York; London: Springer, 2009. – 302 p.
165. Yurchenko V. Hybrid genetic algorithm with gradient learning of the best individual for optimum computer-aided design of steel structural systems / V. Yurchenko, I. Peleshko // Proceedings of Eighth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO-8 (1-5 June 2009, Lisboa, Portugal) / Eds. H. C. Rodrigues, J. M. Guedes, P. R. Fernandes, J. O. Folgado, M. M. Neves. – 2009. – p. 40.
166. Mezura-Montes, E. and B.C. Lopez-Ramirez, Comparing bio-inspired algorithms in constrained optimization problems, in Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on. 2007. p. 662-669.
167. Noilublao N, Bureerat S. Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms. Computers and Structures. Volume 89. Issue 23-24, 2011. pp 2531–2538
168. Ozturk, H. T., Durmus, A. (2013). Optimum cost design of RC columns using artificial bee colony algorithm. Structural Engineering and Mechanics, 45(5) 643-654
169. Schumacher, A. (2013). Optimierung mechanischer Strukturen (2nd ed.). Springer Vieweg.
170. Sonmez, M. (2011a). Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures. Applied Soft Computing, 11(2), 2406–2418.
171. Yang, X. S., ‘Harmony search as a metaheuristic algorithm’, in: Music-Inspired Harmony Search: Theory and Applications (Eds Z. W. Geem), Springer, 2009, pp.1-14.

ДОДАТОК А

Впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер

ДП «Львівський Промбудпроект»


 В.Й. Гнатюк

2012 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Балук І. М. на тему
 “Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих
 металевих конструкцій” при проектуванні реконструкції будівлі
 пакувального відділення ВАТ «Миколаївцемент» в с. Розвадів
 Миколаївського району Львівської області

Ми, що нижче підписалися – представник ДП «Львівський Промбудпроект»: начальник архітектурно-будівельного відділу Кушнірук В.В. з однієї сторони і представники Національного університету “Львівська політехніка” кафедри будівельного виробництва: аспірант Балук І.М., к.т.н., доц. Пелешко І.Д. з другої сторони, склали даний акт про те, що при реконструкції будівлі пакувального відділення ВАТ «Миколаївцемент» було застосовано розроблену Балуком І.М. методику врахування сумісної роботи запроєктованої системи додаткових металевих рам з існуючою конструкцією будівлі та технологію їх зведення.

Задачі оптимізації, що виникали при оптимальному проектуванні конструкцій посилення даної будівлі, розв’язані з допомогою програми оптимізації стрижневих металевих конструкцій OptCAD, у якій Балук І.М. реалізував результати своїх досліджень.

Представник ДП “Львівський Промбудпроект”:

Начальник АБВ

Кушнірук В.В.

Представники Національного університету “Львівська політехніка”:

Аспірант

Балук І.М.

Доцент, к.т.н.

Пелешко І.Д.



Затверджено

Проректор з наукової роботи

Національного університету

"Львівська політехніка"

проф. З.Г. Піх

2013 р.

АКТ

**про використання результатів дисертаційної роботи Балука Ігоря
Мирославовича на тему "Оптимальне проектування реконструкції та
підсилення стрижневих металевих конструкцій", представленої на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук**

Комісія в складі голови комісії д.т.н., проф. А.О. Лозинського та членів комісії: завідувач кафедри будівельного виробництва д.т.н., проф. Саницький М.А., зав. відділу організації наукових досліджень та маркетингу Віннічек Н.Р., заст. нач. планово-фінансового відділу Чулой Т.М. та керівник госпдоговірної теми №1117 Іванейко І.Д. цим актом підтверджують, що результати дисертаційних досліджень Балука Ігоря Мирославовича на тему "Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій" використані при виконанні госпдоговірної теми Національного університету "Львівська політехніка" № 1117 від 19.02.2010 – Розробка робочого проекту "Реконструкція надземного переходу нафтопроводу і газопроводу через ріку Стрий на Стиновській ділянці Стрийського р-ну Львівської обл."

Під час оптимального проектування реконструкції надземного переходу використано розроблену Балуком І.М. математичну модель реконструкції цього переходу, що враховує вплив технології монтажу додаткових прольотів нафтопроводу та газопроводу на його напружено-деформований стан.

Голова комісії, д.т.н., проф.

А.О. Лозинський

Члени комісії:

Зав. каф. будівельного виробництва

М.А. Саницький

Зав. відділу наукових досліджень та маркетингу

Н.Р. Віннічек

Заст. нач. ПФВ

Т.М. Чулой

Керівник госпдоговірної теми №1117

І.Д. Іванейко

“Затверджую:”

Проректор

Національного університету

«Львівська політехніка»

доц. Давидчак О.Р.

2015 р.

Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи Балука Ігоря Мирославовича
на тему: «Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих
металевих конструкцій»

Комісія у складі голови науково-методичної ради ІБІД, д.т.н., професора Соболя Х.С, завідувача кафедри «Будівельне виробництво», д.т.н., професора Саницького М.А., заступника зав. кафедри «Будівельне виробництво», к.т.н., доцентом Парнети Б.З. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Балука І. М. впроваджені в навчальний процес. Зокрема, у навчальному процесі використовуються запропоновані Балуком І.М:

– методика оптимального проектування реконструкції і підсилення стрижневих металевих конструкцій і розроблене програмне забезпечення у курсовому проектуванні (“Проектування реконструкції і підсилення стрижневих металевих конструкцій”) і в лабораторній роботі (заняття № 5 “Розрахунок конструкцій при проведенні зведення, ремонту, і реконструкцій будівель та споруд”) з дисципліни “Розрахункові методи в технології зведення будівель та споруд” для студентів спеціальності 8.06010103 “Міське будівництво та господарство”;

– основні теоретичні положення оптимального проектування реконструкції і підсилення стрижневих металевих конструкцій у курсі “Розрахункові методи в технології зведення будівель та споруд. Частина 1, 2” (розділ № 2 “Система оптимального проектування стержневих систем OptCAD” і розділ № 11 “Формалізація процесу проектування”).

Голова
науково-методичної ради ІБІД,
д.т.н., професор

Соболь Х. С.

Завідувач кафедри
«Будівельне виробництво»,
д.т.н., професор

Саницький М.А.

Заступник завідувача кафедри
«Будівельне виробництво»,
к.т.н.

Парнета Б.З.

ДОДАТОК Б

ВІКНА ПРОГРАМИ OptCAD

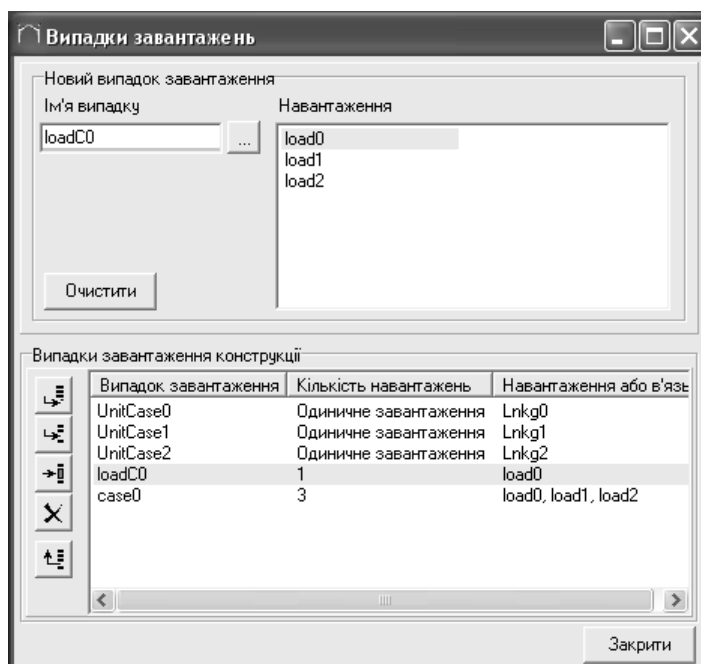


Рис. Б.1 Вікно для задавання випадків навантажень

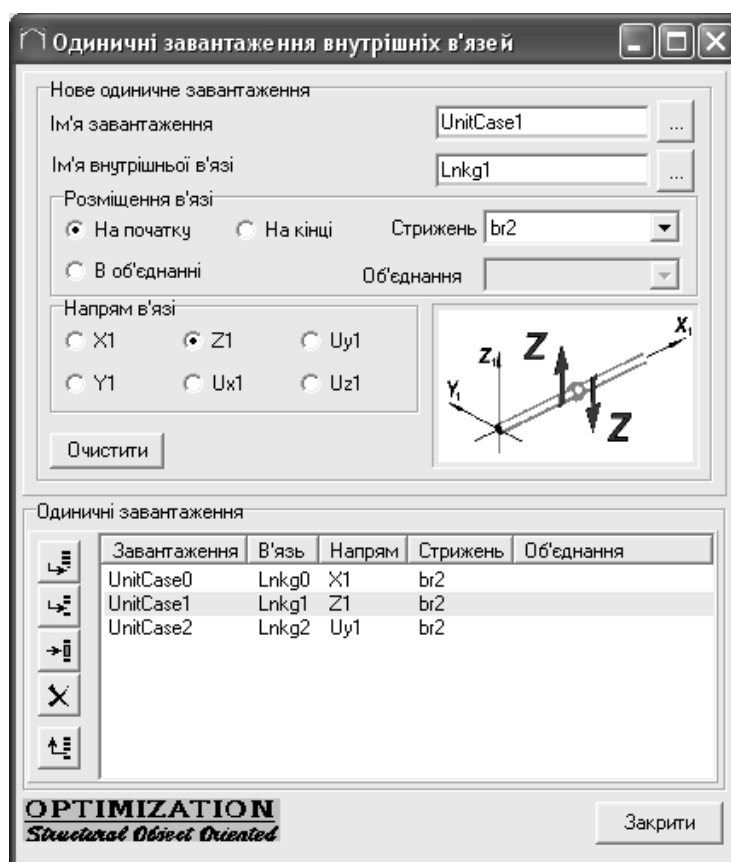


Рис. Б.2. Вікно для задавання в'язей і одиничних завантажень

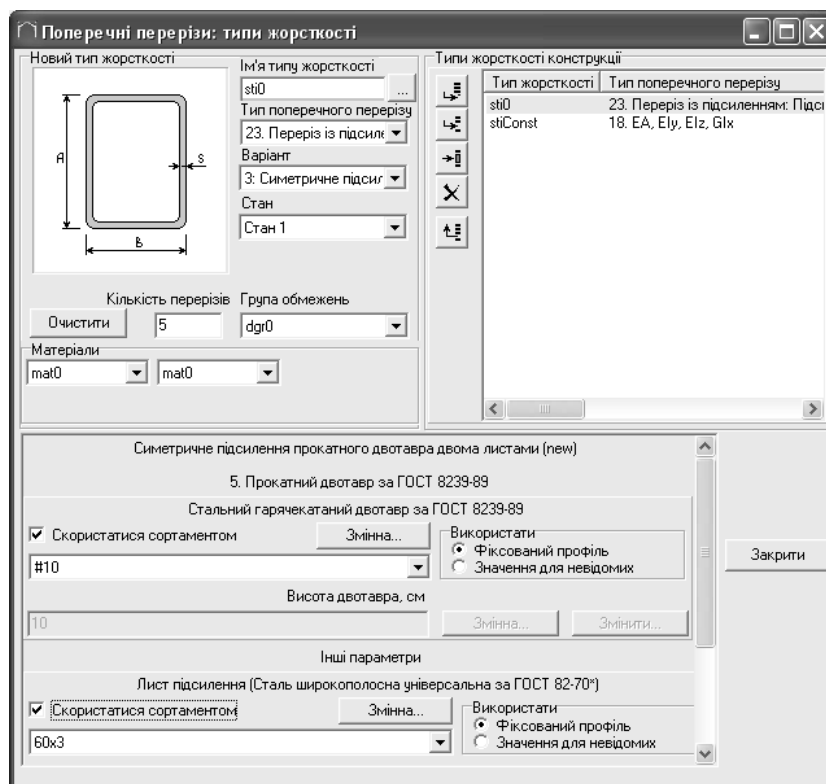


Рис. Б.3. Вікно для задавання типів жорсткості

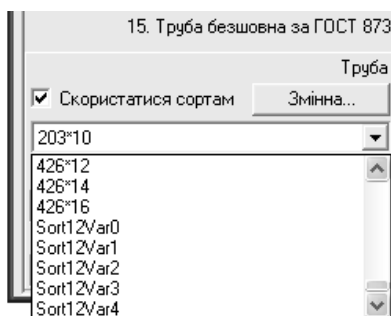


Рис. Б.4. Фрагмент вікна “Поперечні перерізи: типи жорсткості”

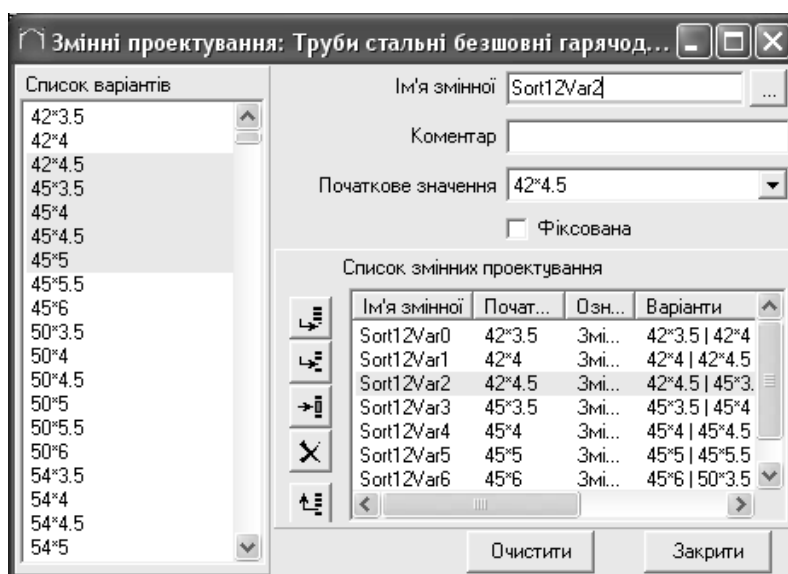


Рис. Б.5. Вікно для створення сортаментних змінних

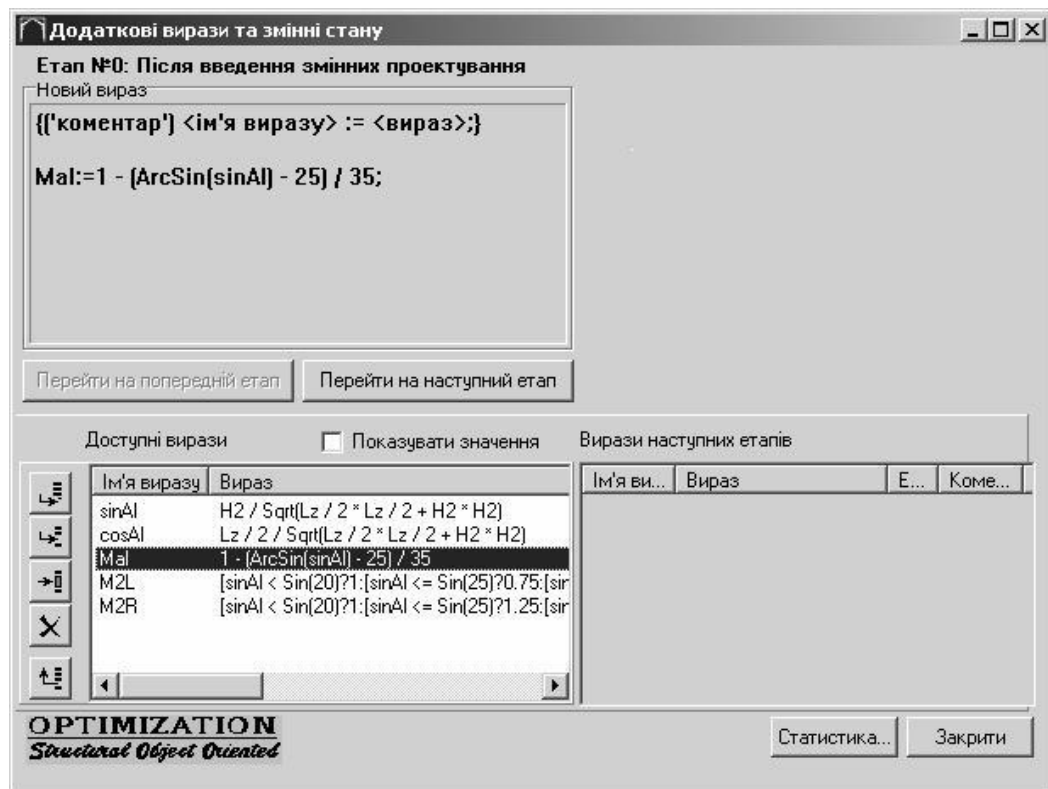


Рис. Б.6. Вікно “Додаткові вирази та змінні стану”

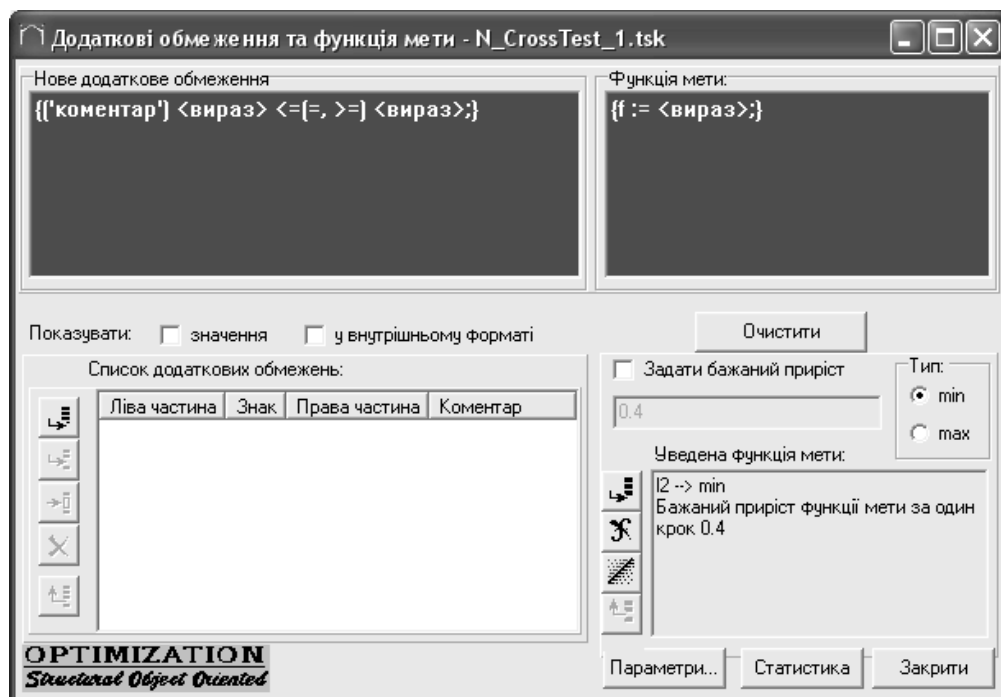


Рис. Б.7. Вікно для задавання додаткових обмежень і функції мети

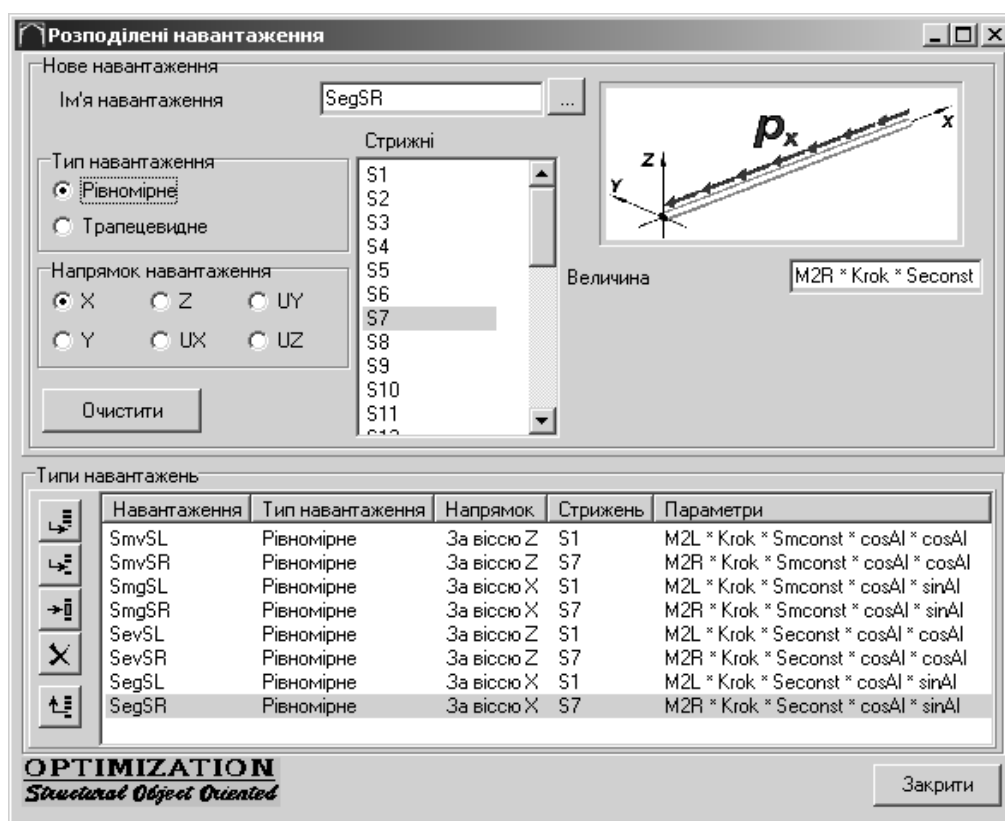


Рис. Б.8. Вікно “Розподілені навантаження”

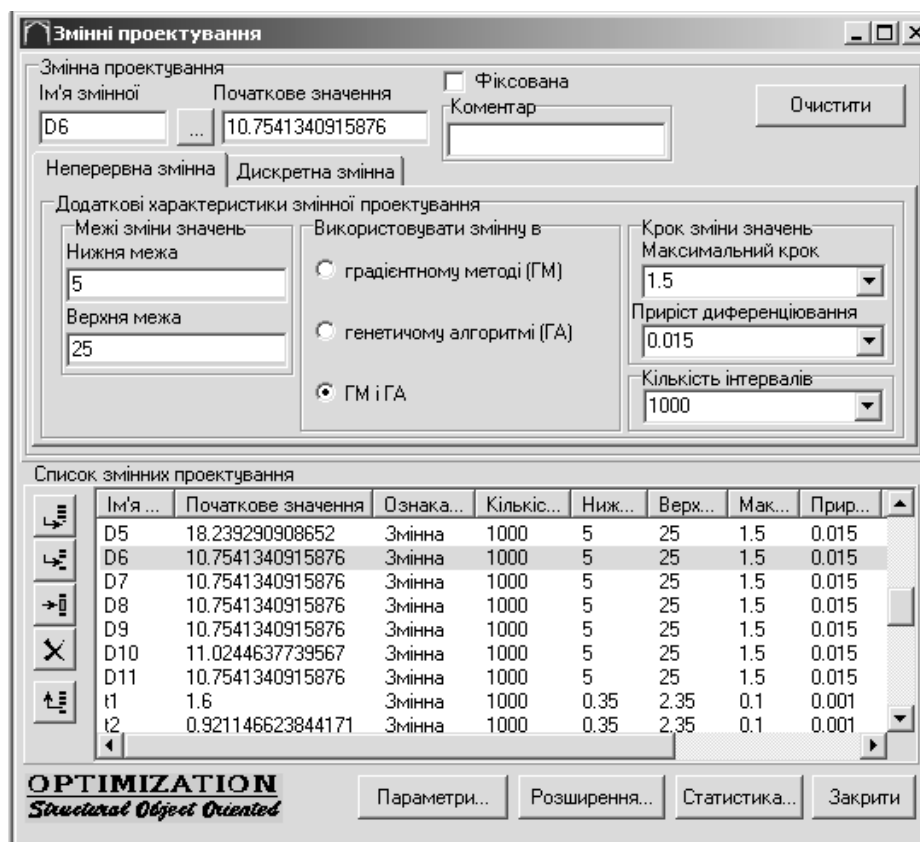


Рис. Б.9. Вікно для задавання змінних проектування

Геометрія конструкцій: вузли

Новий вузол стрижневої конструкції

Ім'я вузла: ...

☐ Задати тільки як вузол орієнтації

Координата X, м:

Координата Y, м:

Координата Z, м:

Координати вузлів стрижневої системи

Вузол	Координата X	Координата Y	Координата Z
nd2	$Bf * 0.5 * 0.44 / Kr$	$Kr - Bf / 2$	$Ho + Hf$
nd3	$Bf * 0.5 * 0.44 / Kr$	$Kr - Bf / 2$	$Ho + Hf + 0$
nd4	$0.44 * Lzf / \sqrt{0.44 * 0.44 \dots}$	$Kr - Kr * Lzf / \sqrt{\dots}$	$Ho + Hf$
nd5	$Bf * 0.5 * (L5 - L6) * 0.5 / Kr$	$Kr + Bf / 2$	$Ho + Hf$
nd6	$Bf * 0.5 * (L5 - L6) * 0.5 / Kr$	$Kr + Bf / 2$	$Ho + Hf + 0$
nd7	$0.44 * Lzf / \sqrt{0.44 * 0.44 \dots}$	$Kr - Kr * Lzf / \sqrt{\dots}$	Ho
nd8	$0.44 * Lzf / \sqrt{0.44 * 0.44 \dots}$	$Kr / 2$	$Ho + Hf$
nd11	$Lzf * (L5 - L6) / (2 * \sqrt{(L5 \dots)}$	$Kr + Lzf * Kr / \sqrt{\dots}$	$Ho + Hf$
nd12	$Lzf * (L5 - L6) / (2 * \sqrt{(L5 \dots)}$	$Kr + Lzf * Kr / \sqrt{\dots}$	Ho
nd20	$(L5 - L6) / 2 - Lzf * 0.5 / (L5 \dots)$	$2 * Kr - Lzf * Kr / \sqrt{\dots}$	Ho

Рис. Б.10. Вікно для задавання координат вузлів конструкції покриття

Сполучення навантажень

Нове сполучення

Ім'я сполучення: ...

Для перевірки обмежень за:

- ☒ I групою граничних станів
- ☐ II групою граничних станів

Розрахункова ситуація:

- ☒ усталена
- ☐ перехідна
- ☐ аварійна

Увести коефіцієнт сполучення:

☒ для всіх однаковий

Випадки завантажень і коефіцієнти сполучення

- ☐ UnitCase2
- ☐ UnitCase3
- ☐ p1
- ☐ m2
- ☒ p1
- ☐ UnitCase0

Сполучення

Ім'я	Кількість завантажень	Завантаження	Коефіцієнти	Група, ситуація
Comb0	1	p1	1	I група, усталена

OPTIMIZATION
Structural Object Oriented

Рис. Б.11. Вікно для задавання сполучень навантажень