

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**БАЛУК ІГОР МИРОСЛАВОВИЧ**



УДК 624.014.04

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

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник -** кандидат технічних наук, доцент  
**Пелешко Іван Дмитрович,**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
доцент кафедри будівельного виробництва.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Білик Сергій Іванович,**  
Київський національний університет будівництва і  
архітектури,  
завідувач кафедри металевих та дерев’яних  
конструкцій;

кандидат технічних наук, доцент  
**Романюк Володимир Володимирович,**  
Національний університет водного господарства та  
природокористування,  
професор кафедри промислового, цивільного  
будівництва та інженерних споруд.

Захист відбудеться «13» травня 2016 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, навчальний корпус ІІ, ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «    » квітня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к. т. н., доцент



Холод П.Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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. 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 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.

*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 дисертації.** 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.), колоквиумі “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 симпозиуму “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 та 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, об’єкт і предмет досліджень; указано зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету та задачі досліджень; наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; зазначено особистий внесок

здобувача та апробацію результатів роботи, наведено публікації по темі дисертації.

**У першому розділі** розглянуто сучасний стан проблеми оптимального проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій.

Розвитку реконструкції та підсилення СМК і методів їхнього проектування присвячено праці М.С. Барабаш, М.Р. Більського, В.В. Бірюльова, З.Я. Бліхарського, М.В. Гоголя, В.М. Гордєєва, В.В. Горева, Є.В. Горохова, Б.Г. Демчини, І.Г. Іваника, В.Г. Кваші, Р.І. Кінаша, Є.В. Клименка, В.П. Корольова, В.В. Кузнецова, М.М. Лаценка, Л.С. Мошкіна, І.Д. Пелешка, А.В. Перельмутера, С.Ф. Пічугіна, Б.С. Поповича, І.С. Реброва, А.Г. Ройтмана, Н.Д. Сергєєва, А.В. Сильвестрова, О.В. Шимановського та інших.

Основні способи реконструкції будівель і споруд та підсилення конструкцій передбачають зміни розрахункової схеми й навантажень під час виконання будівельно-монтажних робіт. 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, 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 та підсилення СМК свідчить про складність розв'язування задач визначення їхніх оптимальних значень.

Значну роль у розвитку теорії оптимального проектування відіграли праці Баженова В. А., Бараненка В.О., Білика А. С., Бірюльова В. В., Віноградова А. І., Геммерлінга А. В., Гордєєва В. М., Горохова Є. В., Гребенюка Г. І., Гуляєва В. І., Кошкіна В. Л., Олькова Я. І., Пелешка І.Д., Перельмутера А. В., Пермякова В. О., Почтмана Ю. М., Рейтмана М. І., Трофимовича В. В., Холопова І. С., Шевченка Є. В., Шимановського В. М., Юрченко В.В., Хога Є., Majid K.J., Farkas J., Spillers W. R. та інших.

Для розв'язування задач оптимізації конструкцій використовують різні методи оптимізації, зокрема градієнтний метод, генетичний алгоритм і метод пошуку гармонії. Ці методи оптимізації можна використовувати під час розв'язування задач оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК у залежності від типу змінних проектування.

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.

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 прийнятним техніко-економічним показником, враховуючи вимоги будівельних норм і параметри, зумовлені технічним завданням.

**У другому розділі** представлено розроблену математичну модель реконструкції і підсилення стрижневих металевих конструкцій.

Формалізовано представлення розрахункових схем конструкції, що підлягає реконструкції та підсиленню. Для цього запропоновано використовувати розрахункові схеми, які містять у проектному положенні всі стрижні конструкції (існуючі, тимчасові, видалені й додані). Ці схеми відрізняються між собою жорсткісними характеристиками підсилюваних стрижнів і множиною накладених внутрішніх в'язей. Зокрема, додатковий стрижень може бути приєднаний до інших елементів розрахункових схем СМК так, щоб у ньому не виникали зусилля від навантажень, що прикладені до конструкції поза цим стрижнем. Так приєднаний стрижень не впливає на напружено-деформований стан (НДС) до моменту його з'єднання з конструкцією й до прикладання навантажень.

Розроблено діаграми процесу реконструкції та підсилення СМК (рис. 1), у яких зміни конструкції й навантажень на неї, що передбачаються згідно з проектом реконструкції та підсилення, запропоновано представляти 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 відповідності нормативним і додатковим вимогам. Перевірки виконують після зміни розрахункової схеми (перевірки  $\Pi_1$  на рис. 1) і зміни навантажень (перевірки  $\Pi_2$  і  $\Pi_3$ ).

Під час проектування реконструкції та підсилення СМК розглядають, зазвичай, певну множину варіантів реконструкції та підсилення, які можуть відрізнитися як способами підсилення, так і їхньою послідовністю. З метою забезпечення зручності опису множини варіантів реконструкції та підсилення введено поняття етапу реконструкції – впорядкованої неподільної найкоротшої сукупності змін розрахункової схеми і навантажень, а також відповідних перевірок.

До вихідних даних математичної моделі залучено розрахункові схеми конструкції у процесі її реконструкції та підсилення (вузли, існуючі і нові стрижні, шарніри, опори, типи жорсткості, матеріали тощо), параметри, що описують цей процес, прикладені і прогнозовані навантаження тощо.

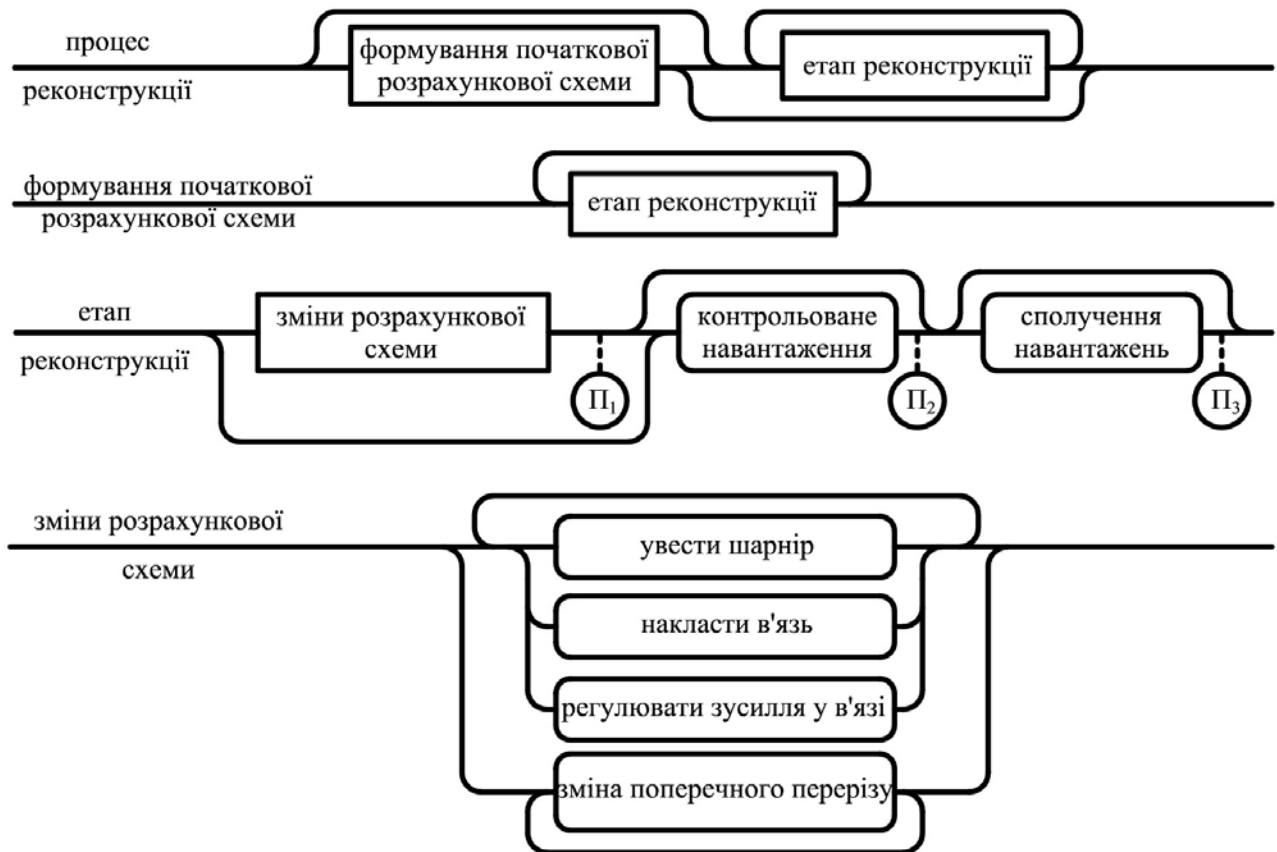


Рис. 1. Діаграми процесу реконструкції

До змінних стану залучено множину величин, які залежать від параметрів входу й необхідні для аналізу НДС конструкції в процесі її реконструкції та підсилення (зусилля і переміщення вузлів, техніко-економічні показники варіантів реконструкції та підсилення на етапах реконструкції тощо).

Алгоритм аналізу конструкції під час реконструкції та підсилення передбачає розрахунок СМК на кожному етапі реконструкції. Розроблено блок-схему алгоритму визначення НДС СМК під час її реконструкції та підсилення, яка на одному етапі реконструкції передбачає три кроки розрахунку (рис. 2). Один крок розрахунку враховує або зміни розрахункової схеми, або прикладання контрольованого навантаження, або сполучення навантажень. Кожний крок розрахунку передбачає визначення поточного НДС і виконання відповідних перевірок.

У **третьому розділі** представлено удосконалення методики визначення НДС СМК під час їхньої реконструкції та підсилення.

Для скорочення обсягу обчислень під час визначення НДС СМК для одного варіанта проекту реконструкції та підсилення пропонується формувати і розв'язувати одну систему рівнянь (СР) методу скінченних елементів (МСЕ) з декількома правими частинами для однієї розрахункової схеми. Під час визначення НДС конструкції для інших подібних схем, що відрізняються між собою лише множинами накладених в'язей і жорсткісними характеристиками підсилюваних стрижнів, пропонується враховувати властивості зусиль і переміщень у стрижневих системах, що підлягають принципу суперпозиції.



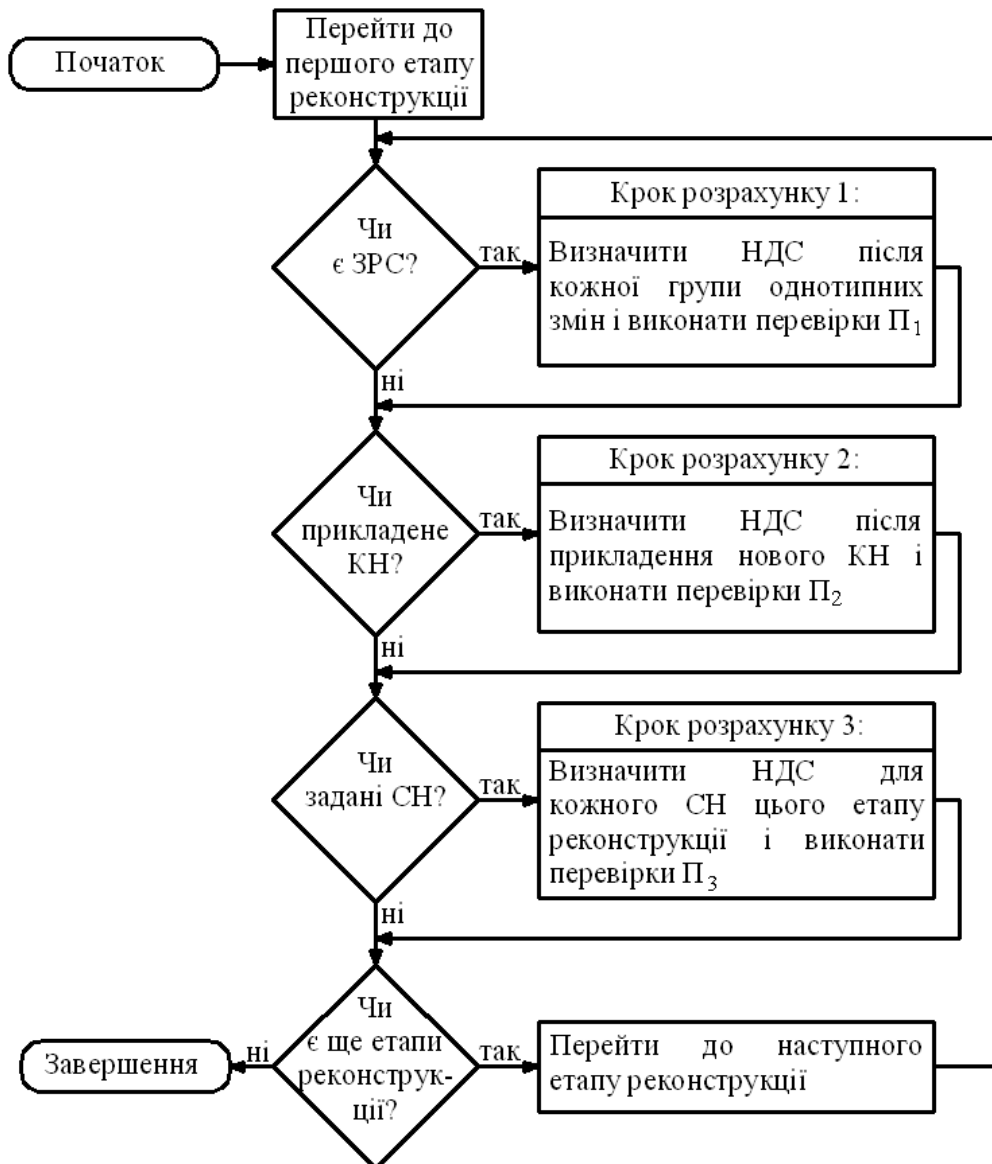


Рис. 2. Блок-схема визначення НДС СМК під час реконструкції та підсилення (ЗРС – зміни розрахункової схеми, КН – контрольоване навантаження, СН – сполучення навантажень)

Систему рівнянь необхідно скласти для базової розрахункової схеми (БРС)  $S^0$  – схеми, що містить стрижні, які існують перед початком реконструкції та підсилення (зокрема, ті, що будуть видалятися або підсилюватися шляхом збільшення площі поперечного перерізу у процесі реконструкції), нові й тимчасові стрижні, а також накладені всі в'язі з множини розрахункових в'язей  $L$ , яка визначається за залежністю (1). У БРС підсилювані стрижні мають параметри жорсткості перерізів до збільшення площі.

$$L = \bigcup_{k=2}^{N_c} L_{\Delta}^k, \quad (1)$$

де  $L_{\Delta}^k$  – множина в'язей, що враховуються під час  $k$ -ї зміни розрахункової схеми і залежать від типу цієї зміни (наприклад, множина в'язей, що накладаються);  $N_c$  –

кількість змін розрахункової схеми, які розглядаються під час проектування варіанта реконструкції та підсилення.

Праві частини СР МСЕ потрібно формувати з урахуванням фактичних навантажень, що прикладаються на СМК у процесі її реконструкції, підсилення й експлуатації, і деяких додаткових навантажень, які необхідні для визначення переміщень і зусиль для змінених подібних розрахункових схем.

За додаткові навантаження пропонується використовувати: 1) для кожної  $j$ -ої в'язі ( $j = \overline{1, |L|}$ , де  $|L|$  – потужність множини  $L$ ) – пару позавузлових протилежних за напрямком одиничних сил, що прикладені на стрижні нескінченно близько від відкинутої  $j$ -ої в'язі у допоміжній розрахунковій схемі  $C_j^0$ , яка утворюється з БРС  $C^0$  відкиданням цієї в'язі; 2) для кожного напрямку переміщення характерних точок конструкції, що обмежуються нормами, – одиничну силу, прикладену до цієї точки у цьому напрямку.

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

$$\|K\| \|\Delta\| = \|R\|, \quad (2)$$

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 додаткових навантажень.

На основі  $\|\Delta\|$  визначають епюри, які названо базовими, і формують дві матриці цих епюр: матрицю базових епюр від зовнішніх навантажень  $\|S^{bp}\|$  (зі стовпцями  $S_j^{bp}$ ,  $j = \overline{1, N_P}$ , де  $N_P$  – кількість зовнішніх навантажень) і матрицю одиничних базових епюр (ОБЕ)  $\|S^{bu}\|$  (зі стовпцями  $S_j^{bu}$ ,  $j = \overline{1, N_L}$ , де  $N_L = |L|$ ). Зауважимо, що  $N_R = N_P + N_L$ . 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, що дозволяє формувати і розв'язувати одну систему рівнянь МСЕ, враховуючи при цьому різні розрахункові схеми для визначення ОБЕ.

Для визначення зусиль і переміщень у розрахункових схемах, що розглядаються під час проектування реконструкції та підсилення, розроблено алгоритм визначення зусиль і переміщень, який на кожному етапі реконструкції використовує елементи матриць  $\|S^{bp}\|$  і  $\|S^{bu}\|$  для визначення поточних зусиль, що враховуються під час виконання перевірок  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  і  $\Pi_3$  (див. рис. 1).

Алгоритм передбачає визначення  $N_R$  поточних розрахункових епюр зусиль, кожна з яких отримується з урахуванням залежності

$$S_j^k = S_j^b + \|S^{bu}\| \cdot \overline{\gamma_j^k}, \quad (3)$$

де  $S_j^k$  – еюра зусиль від  $j$ -го навантаження після  $k$ -ї зміни розрахункової схеми;  $S_j^b$  – еюра зусиль від цього ж навантаження у БРС;  $\overline{\gamma_j^k} = \overline{\gamma_j^{k-1}} + \overline{\chi_j^k}$  – вектор коефіцієнтів лінійної комбінації (КЛК) ОБЕ, що враховує вплив  $k$  послідовних змін розрахункової схеми на епюру  $S_j^b$ ;  $\overline{\gamma_j^{k-1}}$  – те саме, тільки враховує вплив  $k-1$  послідовних змін схеми;  $\overline{\chi_j^k}$  – те саме, тільки враховує вплив  $k$ -ої зміни на епюру  $S_j^{k-1}$  до цієї зміни.

Для визначення  $\overline{\chi_j^k}$  враховується тип  $k$ -ї зміни, особливості навантаження і момент його прикладання до розрахункової схеми.

Фактичне переміщення  $\Delta_i^k$  за напрямком “ $i$ ” від прикладених навантажень до схеми  $C^k$  і виконаних регулювань зусиль пропонується визначити за формулою:

$$\Delta_i^k = \Delta_i^{zov} + \sum_{j=1}^{KP} \Delta_{i,j}^{pn}, \quad (4)$$

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

Для визначення переміщень  $\Delta_i^{zov}$  і  $\Delta_{i,j}^{pn}$  використовується формула Максвела-Мора і відповідні епюри зусиль.

Розроблену схему математичної моделі реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій, що відображає удосконалену методику визначення НДС СМК, представлено на рис. 3.

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.

**У четвертому розділі** представлено розроблену методику оптимального проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій.

Ця методика передбачає спочатку вибір варіантів реконструкції та підсилення існуючої СМК, на основі аналізу яких потім задаються елементи математичної моделі реконструкції та підсилення СМК і математичної моделі задачі оптимізації її параметрів, розв’язується поставлена задача і приймаються проектні рішення.

На основі аналізу варіантів реконструкції та підсилення СМК формується її БРС, множина з усіх ( $N_R$ ) навантажень, етапи реконструкції і послідовності цих етапів.

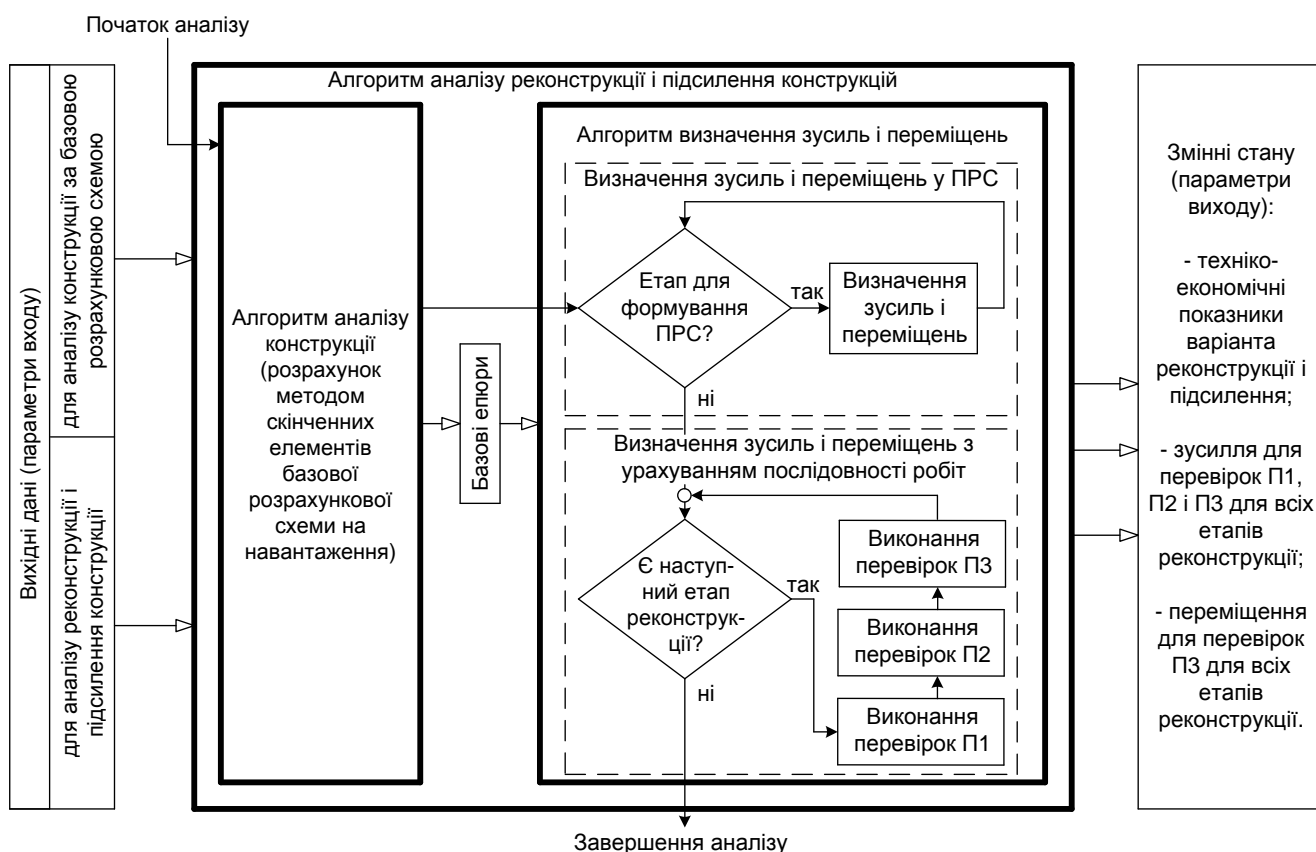


Рис. 3. Схема математичної моделі реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій

За змінні проектування задачі оптимізації реконструкції та підсилення СМК можна прийняти: 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 (наприклад, баластних пригрузів); 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 послідовності реконструкції та підсилення СМК.

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

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

Розроблено критерії для оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК.

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

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

У вихідних даних математичної моделі реконструкції та підсилення необхідно задавати: 1) дані, що описують БРС СМК і множину усіх навантажень; 2) дані, що описують процес реконструкції та підсилення.

В алгоритмі аналізу реконструкції та підсилення СМК пропонується використовувати розроблену удосконалену методику визначення НДС СМК, яка дозволяє зменшити обсяги обчислень під час розв'язування задачі оптимізації і враховувати різні типи змін розрахункової схеми і навантажень.

До змінних стану математичної моделі реконструкції та підсилення СМК віднесено базові епюри зусиль і переміщень, зусилля і переміщення характерних вузлів на кожному етапі реконструкції, техніко-економічні показники варіанта реконструкції та підсилення тощо.

У **п'ятому розділі** описано розроблену підсистему для оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК, що залучена до програми OptCAD, та виконано числові дослідження для виявлення її техніко-економічної ефективності.

Розроблено вікно «Реконструкція та підсилення» (рис. 4, 5) і модифіковано деякі з існуючих вікон програми OptCAD для надання можливості проектувальнику задавати БРС і процес реконструкції, враховувати елементи і технологію підсилення поперечних перерізів стрижнів.

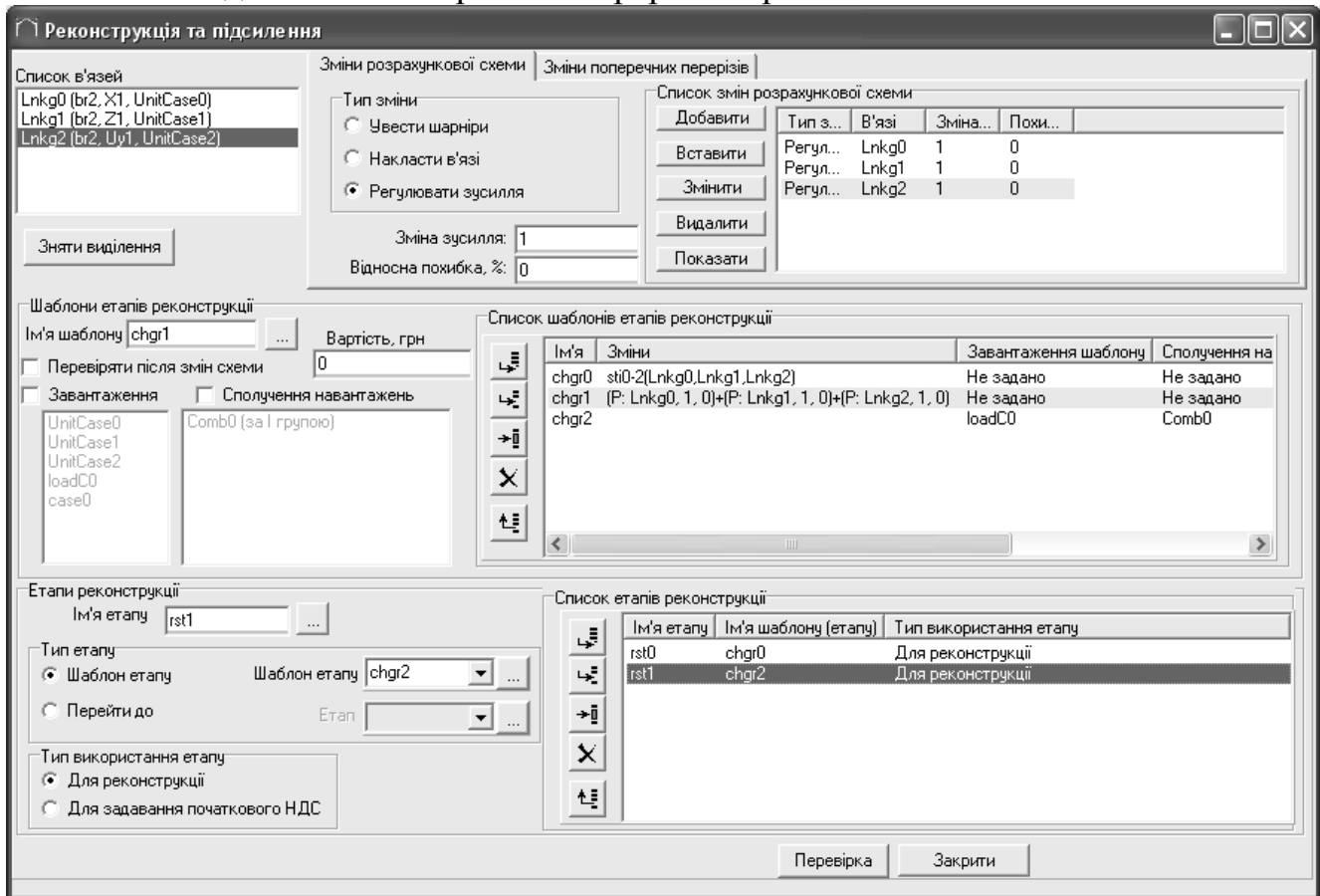


Рис. 4. Вікно програми OptCAD для задавання процесу реконструкції

Удосконалено існуючий алгоритм перевірки нормативних і додаткових

обмежень, зокрема залученням обмежень, що висуваються під час реконструкції та підсилення до елементів СМК.

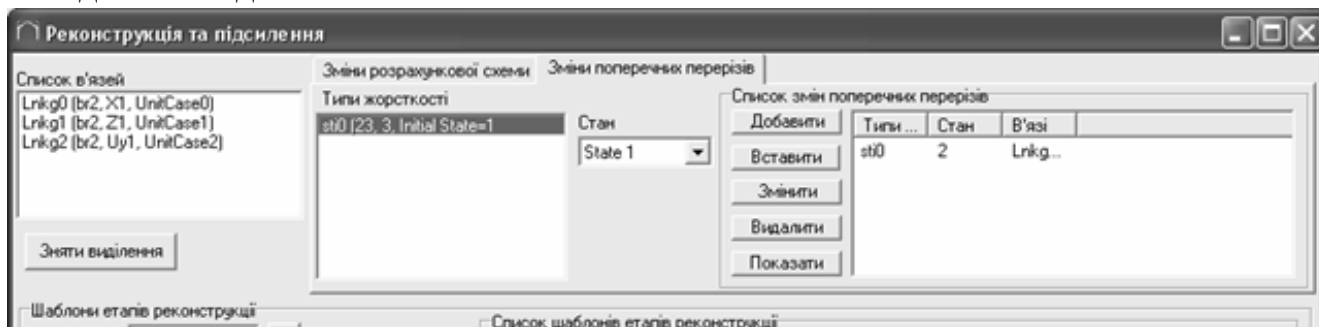


Рис. 5. Фрагмент вікна програми OptCAD для задавання змін поперечних перерізів під час підсилення

Удосконалено схему організації алгоритмів і потоків даних у програмі оптимізації OptCAD (рис. 6) 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.

Оцінку техніко-економічної ефективності розробленої методики проведено на прикладі оптимального проектування сталеві стрижневої конструкції покриття торгово-розважального комплексу “Екватор” (рис. 7), її реконструкції, та оптимального проектування реконструкції надземного переходу нафтогазопроводів через р. Стрий (рис. 8).

З метою визначення ефективності підсистеми автоматизованого проектування реконструкції та підсилення СМК було сформульовано і розв'язано дві задачі оптимального проектування конструкції покриття і одну задачу оптимізації її реконструкції. Перша задача полягає в пошуку таких змінних проектування – розмірів поперечних перерізів стрижнів, при яких маса конструкції є мінімальною. При цьому є фіксованими геометричні параметри розрахункової схеми конструкції-прототипу – ширина  $V_f$  та висота  $H_f$  поперечного перерізу несучих тригранних ферм. Результати розв'язування першої задачі оптимізації слугують еталоном для подальшого порівняння.

Друга задача полягає в пошуку таких значень  $V_f$  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.

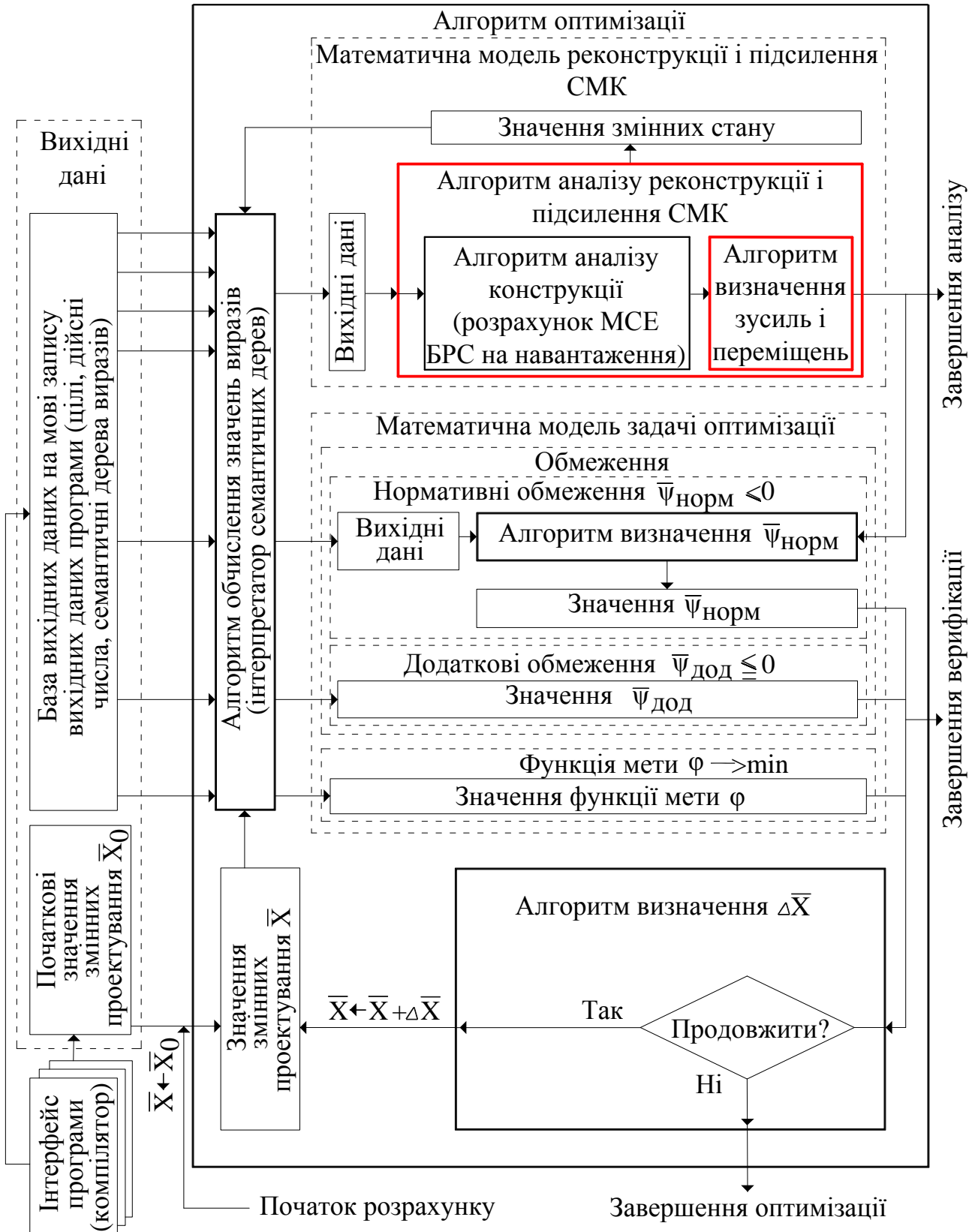
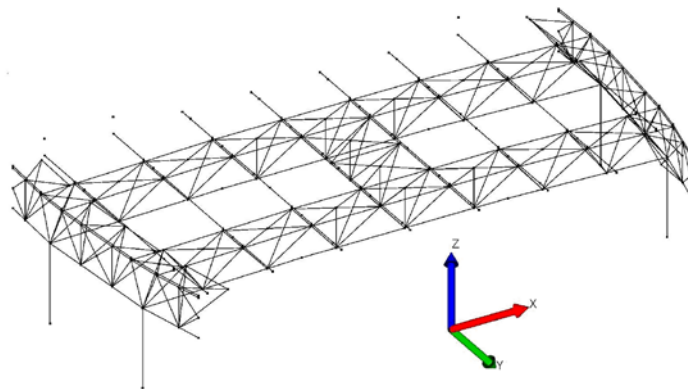


Рис. 6. Удосконалена схема організації алгоритмів і потоків даних у програмі оптимізації OptCAD



а)



б)

Рис. 7. Покриття торгово-розважального комплексу “Екватор”: а) загальний вигляд конструкції; б) схема фрагмента конструкції покриття



а)



б)

Рис. 8. Балковий перехід: а) до реконструкції; б) після реконструкції

У результаті розв’язування третьої задачі встановлено, що під час реконструкції сталеві стрижневі 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  $k = 1,29$  рази.

Застосовано розроблені методики при оптимальному проектуванні реконструкції надземного переходу нафтогазопроводів через р. Стрий Львівської обл. Відповідно до завдання запроектовано два додаткових прольоти переходу з максимальною допустимою сумарною довжиною при заданих навантаженнях та розмірах поперечних перерізів існуючих та проєктованих несучих конструкцій з труб – кожуха нафтопроводу та труби газопроводу (рис. 9).

Для врахування під час оптимального проектування переходу технології виконання робіт із його реконструкції, було розглянуто зміни його розрахункових схем та навантаження на ці схеми. Для цього виділено такі основні два стани переходу, що виникають у процесі здійснення будівельно-монтажних робіт за запропонованою технологією їхньої реконструкції: стан 1 (рис. 9), що виникає після відрізання компенсаторної 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.

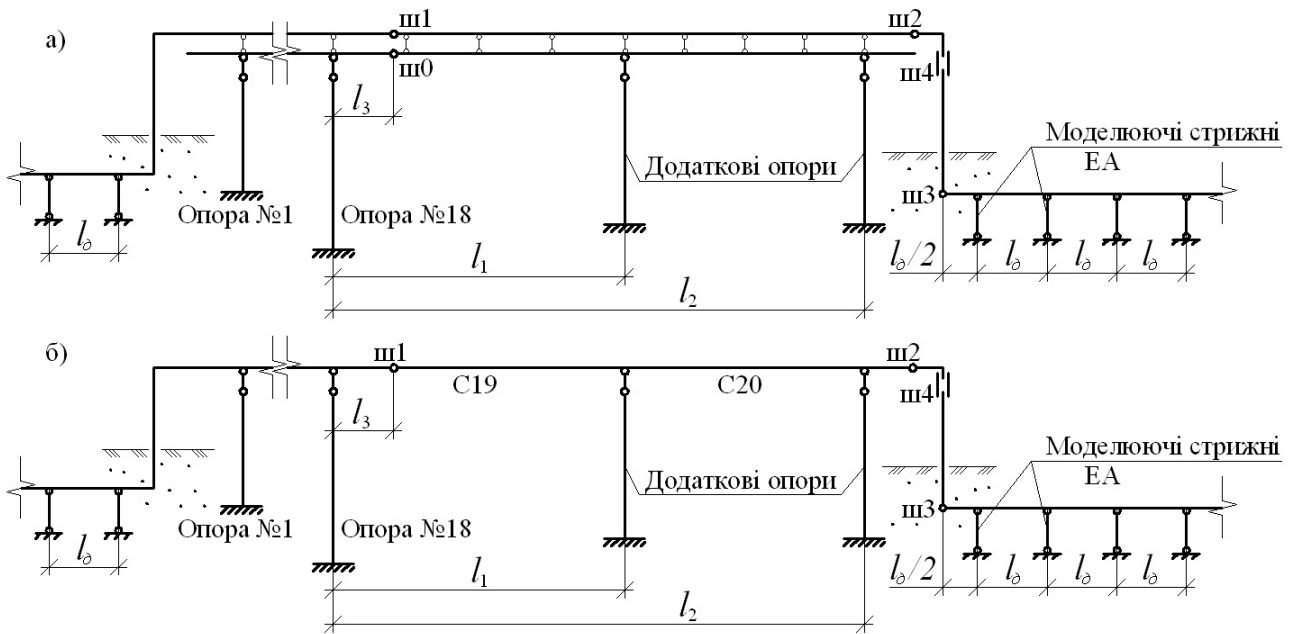


Рис. 9. Розрахункові схеми переходу, що відповідають його стану 1 (прольоти між опорами № 1 та № 18 умовно не показані): а) нафтопроводу; б) газопроводу

Значення змінних проектування, отриманих внаслідок розв'язку сформульованих задач оптимізації показано в табл. 1.

Таблиця 1

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

Оскільки газопровід та нафтопровід мали опиратися на одні й ті ж опори, то за результати оптимізації реконструкції переходу було прийнято результати розв'язування 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.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішено науково прикладне завдання з розробки методики оптимального проектування реконструкції та підсилення СМК з урахуванням конструктивних, технологічних, експлуатаційних і економічних вимог.

Основні результати, що отримані в дисертаційній роботі, такі:

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.

#### **Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах:**

1. Пелешко І. Д. Оптимізація стрижневих конструкцій з урахуванням скорочених сортаментів металопродукції / І. Д. Пелешко, І. М. Балук, Ю. Є. Ковальчук // Збірник наукових праць “Геодезія, архітектура та будівництво: Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених GAC-2009”. – Л.: НУ “Львівська Політехніка”, 2009. – С. 95-97.

2. Пелешко І. Д. Оптимізація типорозмірів поперечних перерізів стрижнів сталевих конструкцій / І. Д. Пелешко, І. М. Балук // Збірник наукових праць УкрНДІПСК ім. В. М. Шимановського. – К.: Сталь, 2009. – Вип. 4 – С. 142-151.

3. Пелешко І. Д. Формалізація снігових навантажень для системи оптимізації стрижневих конструкцій OptCAD / І. Д. Пелешко, І. М. Балук // Будівельні конструкції : Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – К.: ДП НДІБК, 2009. – Вип. 72. – С. 257-264.

4. Пелешко І. Д. Об оптимальном закреплении поперечных сечений за стержнями металлических конструкций / И. Д. Пелешко, В. В. Юрченко,

И. М. Балук // Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство). – Брест: Изд-во БрГТУ, 2009. – С. 222-227.

5. Пелешко І. Д. Удосконалення та використання мови для запису задач оптимізації стрижневих металевих конструкцій / І. Д. Пелешко, І. М. Балук // Збірник наукових праць УкрНДІПСК ім. В. М. Шимановського. – К.: Сталь, 2010. – Вип. 6 – С. 172-179.

6. Пелешко І. Д. Оптимальне проектування сталеві стрижневої конструкції покриття торгово-розважального комплексу / І. Д. Пелешко, Р. В. Лісоцький, І. М. Балук // Збірник наукових праць УкрНДІПСК ім. В. М. Шимановського. – К.: Сталь, 2010. – Вип. 5 – С. 181-191.

7. Пелешко І. Д. Оптимальне 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.

8. 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 ГАС-2010”. – Л.: НУ “Львівська політехніка”, 2010. – С. 84-85.

9. Пелешко І. Д. Оптимальне проектування реконструкції надземного переходу трубопроводу з урахуванням його взаємодії із ґрунтом / І. Д. Пелешко, І. М. Балук // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Київ, ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 2. – С. 299-306.

10. Пелешко І. Д. Оптимальне проектування реконструкції надземного балкового переходу трубопроводів / І. Д. Пелешко, І. М. Балук // Металеві конструкції. – 2011. – Том 17, №3. – С. 191-198.

11. 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, 2004 р. – Л.: Вид-во НУЛП, 2012. – С. 149-154.

12. 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.

13. 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 ГАС-2013. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 1 електрон. опт. Диск (CD-ROM) С. 144-145.

14. 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.

У публікаціях зі співавторами здобувачем виконано: проаналізовано отримані результати числових досліджень оптимального закріплення поперечних перерізів за стрижнями металевих конструкцій [1, 2]; проведено теоретичні дослідження формулювання задач оптимізації реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій [3-5]; проведено аналіз результатів оптимізації фрагмента стрижневої сталеві конструкції покриття торгово-розважального комплексу [6]; визначення залежності зусиль у металевих конструкціях від послідовності змін у розрахунковій схемі під час реконструкції та підсилення [7, 8]; проведено моделювання реконструкції надземного переходу трубопроводу [9]; виконано аналіз оптимальних параметрів реконструкції надземного балкового переходу трубопроводів [10]; проведено теоретичні дослідження процесу реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій [11]; виконано аналіз методик визначення напружено-деформованого стану стрижневих металевих конструкцій у процесі їхньої реконструкції та підсилення [12, 13]; виведено залежності зусиль у стрижневих металевих конструкціях від зміни параметрів поперечних перерізів декількох стрижнів [14].

#### АНОТАЦІЯ

**Балук І.М. Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розробці методики оптимального проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій з урахуванням конструктивних, технологічних, експлуатаційних і економічних вимог. Ця методика передбачає формування математичних моделей реконструкції та підсилення конструкції і задачі її оптимізації. Алгоритм аналізу реконструкції та підсилення формує і розв’язує одну матричну систему рівнянь методу скінченних елементів з декількома правими частинами, а отримані розв’язки використовує для визначення зусиль і переміщень на кожному етапі реконструкції.

Запропонована методика реалізована в програмному забезпеченні, що орієнтоване на вирішення задач оптимізації стрижневих металевих конструкцій. Результати роботи впроваджено в проект реконструкції реальної будівельної споруди та в навчальний процес.

**Ключові слова:** стрижневі металеві конструкції, реконструкція та підсилення, оптимальне проектування, математична модель задачі оптимізації, програмне забезпечення.

#### АННОТАЦИЯ

**Балук И. М. Оптимальное проектирование реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный университет "Львовская политехника", Львов, 2016.

Диссертация посвящена разработке методики оптимального проектирования реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных и экономических требований.

**Содержание диссертации.** Во вступлении обоснована актуальность темы диссертации, объект и предмет проведенных в ней исследований, приведена научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первом разделе рассмотрено современное состояние проблемы оптимального проектирования реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций. Приведены основные способы и методы усиления стержневых металлических конструкций. Выполненный анализ показывает значительное количество типов параметров, которые следует определять для применения различных способов усиления, необходимость дальнейших исследований алгоритмов определения напряженно-деформированного состояния СМК в процессе ее реконструкции и усиления для обеспечения эффективного использования вместе с методами оптимизации, а также необходимость разработки соответствующего программного обеспечения.

Во втором разделе представлена математическая модель реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций.

Разработаны диаграммы процесса реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций, в которых предложено использовать такие простые изменения расчетной схемы и нагрузок, как наложение связи, введение шарнира, регулировка усилия в связи, изменение поперечного сечения и приложения контролируемой нагрузки. Формализовано представление расчетных схем конструкции, подлежащей реконструкции и усилению.

К исходным данным математической модели отнесены данные, описывающие расчетные схемы конструкции, нагрузки и процесс реконструкции и усиления. Алгоритм анализа этой модели предусматривает определение усилий и перемещений характерных точек конструкции, проверки ограничений на каждом этапе реконструкции. К переменным состояниям отнесены технико-экономические показатели варианта реконструкции и усиления, усилия в поперечных сечениях стержней, перемещения узлов конструкции и др.

В третьем разделе представлены усовершенствования методики определения напряженно-деформированного состояния стержневых металлических конструкций при их реконструкции и усилении.

Для сокращения объема вычислений при определении напряженно-деформированного состояния стержневых металлических конструкций для одного варианта проекта реконструкции и усиления предлагается формировать и решать одну систему уравнений метода конечных элементов с несколькими правыми частями для базовой расчетной схемы. При определении напряженно-деформированного состояния конструкции для других подобных схем, отличающихся между собой только множествами наложенных связей и

характеристиками жесткости усиливаемых стержней, предлагается учитывать свойства усилий и перемещений в стержневых системах, подлежащих принципу суперпозиции.

Разработана схема математической модели реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций отражает усовершенствованную методику определения напряженно-деформированного состояния стержневых металлических конструкций.

В четвертом разделе представлена разработанная методика оптимального проектирования реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций. Эта методика предполагает сначала выбор для существующей стержневой металлической конструкции вариантов ее реконструкции и усиления, на основе анализа которых затем задаются элементы математической модели реконструкции и усиления конструкции и математической модели задачи оптимизации ее параметров, решается поставленная задача и принимаются проектные решения.

В пятом разделе представлена разработана подсистема для оптимального проектирования реконструкции и усиления конструкции, вовлечена в программы OptCAD, и выполнено численные исследования для выявления ее технико-экономической эффективности.

В выводах подытожены основные результаты диссертации. Результаты работы внедрены в проект реконструкции реального сооружения и в учебный процесс.

**Ключевые слова:** стержневые металлические конструкции, реконструкция и усиление, оптимальное проектирование, математическая модель задачи оптимизации, программное обеспечение.

## ABSTRACT

**Baluk I. M. Optimal design of the reconstruction and reinforcement steel structures.** – On the right of manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 – “Building constructions, buildings and structures” – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis is devoted to developing method for optimal design of the reconstruction and reinforcement of steel structures considering constructive, technological, exploitation and economical requirements. This method involves the formation of mathematical models of reconstruction and reinforcement of structures and its optimization problem. An algorithm of analysis of the reconstruction and reinforcement creates and solves an one matrix equations of finite element method with a few right-hand sides and uses the obtained solution for determining the forces and displacements at each stage of reconstruction.

The proposed method is implemented in software that is focused on solving problems of optimization steel structures. The results introduced in the reconstruction of a real building structure.

**Keywords:** steel structures, reconstruction and reinforcement, optimal design, mathematical model of optimization problem, software.