



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2013, ТОМ 19, НОМЕР 1, 37–47

УДК 624.014.04

(13)-0281-0

ФОРМУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ І ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТРИЖНЕВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ У ПРОЦЕСІ РЕКОНСТРУКЦІЇ Й ПІДСИЛЕННЯ

І. Д. Пелешко¹, З. Я. Бліхарський², І. М. Балук³

Національний університет «Львівська політехніка»,

вул. Ст. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013.

E-mail: ¹ipeleshko@hotmail.com, ²blikharskyu@ukr.net, ³baluk_igor@ukr.net

Отримана 24 січня 2013; прийнята 22 лютого 2013.

Анотація. У роботі запропоновано формалізований спосіб представлення розрахункових схем стрижневих металевих конструкцій, що підлягають реконструкції й підсиленню шляхом зміни конструктивної схеми і регулювання зусиль у «зайвих» в'язях. Для визначення напружено-деформованого стану конструкції з урахуванням змін розрахункової схеми в процесі реконструкції запропоновано формувати й розв'язувати одну матричну систему рівнянь методу скінченних елементів з декількома правими частинами для базової розрахункової схеми, що містить існуючі, видалені, нові стрижні й в'язі, які накладаються або ліквідовуються при змінах конструкції протягом реконструкції і підсилення. Запропоновано визначати зусилля в конструкції як суму зусиль у базовій розрахунковій схемі від зовнішніх навантажень і лінійної комбінації зусиль від одиничних навантажень у «зайвих» в'язях цієї схеми. Описано задавання базової розрахункової схеми й процесу реконструкції для програми оптимізації OptCAD.

Ключові слова: металеві конструкції, реконструкція, підсилення, стрижнева система, розрахункова схема, напружено-деформований стан.

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОЦЕССЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И УСИЛЕНИЯ

И. Д. Пелешко¹, З. Я. Блихарский², И. М. Балук³

Национальный университет «Львовская политехника»,

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013.

E-mail: ¹ipeleshko@hotmail.com, ²blikharskyu@ukr.net, ³baluk_igor@ukr.net

Получена 24 января 2013; принята 22 февраля 2013.

Аннотация. В работе предложен формализованный способ представления расчетных схем стержневых металлических конструкций, подлежащих реконструкции и усилению путем изменения конструктивной схемы и регулирования усилий в «лишних» связях. Для определения напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом изменений расчетной схемы в процессе реконструкции предложено формировать и решать одну матричную систему уравнений метода конечных элементов с несколькими правыми частями для базовой расчетной схемы, содержащей существующие, удаляемые и новые стержни и «лишние» связи, которые накладываются или ликвидируются при изменениях конструкции

при реконструкції і посиленні. Предложено визначати зусилля в конструкції як сумму зусиль в базовій розрахунковій схемі від зовнішніх навантажень і лінійної комбінації зусиль від одиничних навантажень в «лишніх» зв'язках цієї схеми. Описано задання базової розрахункової схеми і процесу реконструкції для програми оптимізації OptCAD.

Ключевые слова: металічні конструкції, реконструкція, посилення, стержневая система, розрахункова схема, напружено-деформоване стан.

FORMATION OF DESIGN SCHEMAS AND DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF STEEL STRUCTURES IN THE PROCESS OF RECONSTRUCTION AND REINFORCEMENT

Ivan Peleshko ¹, Zinoviy Blikharskyi ², Igor Baluk ³

National University «Lviv Politechnique»,

12, St. Bandery, Lviv, Ukraine, 79013.

E-mail: ¹ ipeleshko@hotmail.com, ² blikharskyi@ukr.net, ³ baluk_igor@ukr.net

Received 24 January 2013; accepted 22 February 2013.

Abstract. The formalized method of presenting design schemes of steel structures subject to reconstruction and reinforcement by changing the structural scheme and regulation efforts in the «redundant» linkages is proposed. To determine the stress-strain state structure with regard to changes in the design scheme during the process of reconstruction proposed to form and solve a matrix system of equations finite element method with multiple right parts for the basic design scheme. This scheme includes current, deleted, new rods and linkages imposed or liquidated during the reconstruction and reinforcement. Forces in structure is propose to determine as the sum of force in the basic design scheme of external loads and linear combination of forces from units of loads in the «redundant» linkages of the scheme. The input of basic design scheme and process of reconstruction in program optimization OptCAD are described.

Keywords: steel structures, reconstruction, reinforcement, rod system, the design scheme, the stress-strain state.

Постановка проблеми

В Україні експлуатується понад 35 млн тонн несучих металевих конструкцій [1], серед яких велика частка стрижневих металевих конструкцій (СМК) потребує заміни, посилення або реконструкції. Будівельно-монтажні роботи в процесі реконструкції можуть викликати зміну конструктивної схеми й регулювання зусиль у «зайвих» в'язях статично невизначуваних конструкцій.

З метою економії витрат ресурсів на реконструкцію й посилення СМК потрібно під час проектування використовувати методи оптимізації, що знаходять найкраще рішення за певним критерієм оптимальності. Для розробки програм, де застосовують ці методи, необхідно формалізувати спосіб представлення розрахункових схем конструкції, що виникають під час

її реконструкції й посилення (у подальшому – розрахункових схем).

Збільшення кількості розрахункових схем і, відповідно, збільшення витрат часу на аналіз напружено-деформованого стану (НДС) конструкції є особливо відчутним під час використання методів оптимального проектування, що виконують аналіз багаторазово. Необхідно розробити спосіб визначення НДС конструкції під час оптимального проектування реконструкції й посилення, який би забезпечував зменшення обсягу обчислень завдяки врахуванню подібності її розрахункових схем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основні методи й способи реконструкції будівель і споруд та посилення конструкцій розглянуто в [2–5]. Описано відповідні зміни роз-

рахункової схеми й навантажень під час виконання будівельно-монтажних робіт. Необхідно забезпечити формалізацію цих змін у програмах для оптимального проектування реконструкції і підсилення СМК.

Схеми послідовного перерахунку статично невизначуваної стрижневої системи при поетапній зміні відносної жорсткості її елементів, видаленні деяких існуючих і приєднанні нових стрижнів розглянуто в [6, 7]. Потрібно розробити алгоритм розрахунку конструкції при її реконструкції й підсиленні, який би ефективно враховував у комплексі всі зміни конструктивної схеми (видалення й приєднання стрижнів, накладання в'язей, уведення шарнірів) і регулювання зусиль.

У [8, 9] розглянуто зміни конструкції, що пов'язані з монтажем системи і процесом попереднього напруження. У процесі розрахунку систем зміна розрахункової схеми відображається відповідною зміною матриці жорсткості [9]. Моделювання процесу зведення споруди реалізовано в режимі «Монтаж» програми SCAD Office [17], який ураховує можливість установаження й видалення деяких стрижнів, установаження або видалення баластних вантажів, регулювання довжин елементів тощо.

Теореми про структурні зміни для лінійних пружних шарнірно-стрижневих конструкцій сформульовано й обґрунтовано в [10]. 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 інші типи металевих конструкцій.

Спосіб визначення зусиль від попереднього напруження «зайвих» в'язей у статично невизначуваних стрижневих конструкціях загального виду розроблено й обґрунтовано в [11]. Показано, що для аналізу НДС конструкції за її різними розрахунковими схемами, що відрізняються відкинутими «зайвими» в'язями, можна формувати й розв'язувати лише одну систему рівнянь методу скінченних елементів (МСЕ) з декількома правими частинами. Цей спосіб використано в [12] для врахування змін розрахункової схеми, що викликані замиканням шарнірів при реконструкції й підсиленні СМК. Необхідно розробити загальний спосіб урахування інших видів змін розрахункової схеми в алгоритмах оптимізації металевих конструкцій.

У [13] розглянуто формалізацію процесу реконструкції й підсилення СМК як послідовності елементарних змін розрахункової схеми, змін навантажень і регулювання зусиль. Необхідно формалізувати розрахункові схеми й описати спосіб розрахунку конструкції, яка підлягає реконструкції й підсиленню, при якому потрібно формувати і розв'язувати одну матричну систему рівнянь методу скінченних елементів.

Формулювання цілі статті

Ціллю статті є формалізувати представлення розрахункових схем конструкцій, що підлягають реконструкції й підсиленню, і визначити НДС за допомогою формування й розв'язування однієї матричної системи рівнянь методу скінченних елементів з декількома правими частинами.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо **представлення в розрахункових схемах змін конструкції**, що відбуваються в процесі її реконструкції й підсилення.

Як зазначено в [13], процес реконструкції можна представити як послідовність етапів реконструкції, що впорядковані відповідно до послідовності виконання будівельно-монтажних робіт і змін СМК від початку й до завершення її реконструкції й підсилення. Етап реконструкції – це частина процесу реконструкції, яка може включати певну послідовність змін розрахункової схеми, прикладання контрольованого (базового) навантаження [13, 17] й перевірки P_1, P_2, P_3 відповідності конструкції вимогам (рис. 1).

Зміни розрахункової схеми можуть бути викликані в процесі реконструкції й підсилення різними способами, зокрема: приєднанням нового стрижня (іноді з регулюванням зусиль); видаленням існуючого стрижня; заміною стрижнів; зміною конструктивної схеми всієї споруди або її окремих елементів. Указані способи можна звести до включення в роботу нових стрижнів і видалення існуючих стрижнів.

Приєднання нового стрижня конструкції включає операції розміщення цього стрижня в проектному положенні й з'єднання його з конструкцією з або без регулювання зусиль.

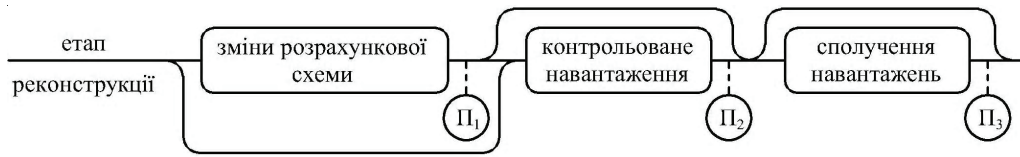


Рисунок 1. Діаграма етапу реконструкції.

Цей стрижень, зазвичай, приєднують до існуючих елементів конструкції, а іноді – одним кінцем до нового фундаменту.

Операцію розміщення нового стрижня в проектному положенні в конструкції можна представляти у вигляді відповідного доповнення розрахункової схеми новим стрижнем і приєднання його до інших її елементів за допомогою шарнірів і в'язей таким чином, щоб у ньому не могли виникати зусилля від будь-яких навантажень, що прикладені до конструкції поза цим стрижнем. Новий стрижень, що так приєднаний до розрахункової схеми, не впливає на НДС до моменту його з'єднання з конструкцією й до прикладання навантажень. Тому цей стрижень може існувати у всіх розрахункових схемах, у тому числі й тих, що відображають зміни конструкції до приєднання цього стрижня.

Операцію з'єднання нового стрижня з конструкцією можна представляти 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 існуючих чи прикладання нових навантажень.

Видалення існуючого стрижня може складатися із трьох операцій: знімання навантажень, що прикладені безпосередньо до стрижня, зведення до нуля його взаємодії з конструкцією й рознімання з'єднань [5] його з конструкцією.

Першу операцію можна представити в розрахунковій схемі як прикладання нових навантажень, що збігаються з існуючими навантаженнями на стрижень, але діють у протилежному напрямку [9].

Другу операцію можна представити 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 уве-

дення шарнірів замість цих в'язей. Третю операцію в розрахунковій схемі можна не враховувати, а стрижень, що видалений із конструкції, можна залишити в розрахунковій схемі, оскільки при шарнірному приєднанні в ньому не виникатимуть зусилля від навантажень, що прикладені до конструкції поза стрижнем. Тому цей стрижень може існувати у всіх розрахункових схемах, що відображають зміни конструкції після видалення цього стрижня.

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.

Розглянемо ці розрахункові схеми з урахуванням змін конструкції в процесі реконструкції і підсилення.

Нехай для деякої СМК в процесі реконструкції і підсилення виконують m змін конструкції у вигляді накладання в'язей, введення шарнірів, приєднання нових чи видалення існуючих стрижнів, регулювання зусиль. Ці зміни можна представити як певні дії із деякими існуючими в'язями і шарнірами, а також із в'язями, які приєднують нові і видалені стрижні до інших елементів схем. До таких дій можна віднести накладання в'язі, відкидання в'язі (уведення шарніра), а також регулювання зусилля у існуючій в'язі або у в'язі, що замикається [13]. Множину в'язей, що накладаються, відкидаються, і в'язей, в яких регулюється зусилля при j -й зміні конструкції, позначимо через L_j^A . Тоді множину в'язей L , над якими потрібно виконати певні дії в процесі реконструкції, можна визначити як об'єднання множин L_j^A за формулою:

$$L = \bigcup_{j=1}^m L_j^A. \quad (1)$$

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.

Для того, щоб для розрахунку i -ї і $i+1$ -ї розрахункових схем не потрібно було додаткової інформації про послідовність дій, прийемо, що ці схеми: 1) відрізняються внаслідок виконання таких дій одного виду, як накладання в'язей, відкидання в'язей, регулювання зусилля у в'язі, що утворюється замиканням шарніра; 2) є однаковими під час регулювання зусиль в існуючих в'язях.

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^- . При цьому $L_i^+ \cap L_i^- = \emptyset$, $L_i^+ \subset L$, $L_i^- \subset L$, $L_i^+ \neq \emptyset \Rightarrow L_i^- = \emptyset$, $L_i^- \neq \emptyset \Rightarrow L_i^+ = \emptyset$. При регулюванні зусилля в існуючій в'язі $L_i^+ = \emptyset$, $L_i^- = \emptyset$, а при регулюванні зусилля у в'язі, що утворюється замиканням шарніра, $|L_i^+| = 1$.

Нехай L_i – множина в'язей, що належать множині L і є накладеними в i -й розрахунковій схемі. Тоді наступну, $i+1$ -у розрахункову схему можна отримати з i -ї схеми за формулою:

$$L_{i+1} = \begin{cases} L_i \cup L_i^+, \text{ при } L_i^- = \emptyset, L_i^+ \neq \emptyset; \\ L_i \setminus L_i^-, \text{ при } L_i^- \neq \emptyset, L_i^+ = \emptyset; \\ L_i, \text{ при } L_i^- = \emptyset, L_i^+ = \emptyset. \end{cases} \quad (2)$$

Розглянемо визначення НДС конструкції з урахуванням змін розрахункової схеми у процесі реконструкції.

Для визначення НДС конструкції у процесі реконструкції введемо поняття базової розрахункової схеми – схеми, що має в проектному положенні існуючі, видалені й нові стрижні конструкції і в'язі множини L .

Базова розрахункова схема може збігатися з деякими розрахунковими схемами, що моделюють процес реконструкції і підсилення. Наприклад, базова схема може збігатися з початковою ($i = 1$) розрахунковою схемою конструкції, що існує до початку реконструкції й підсилення, або з кінцевою ($i = k$) розрахунковою схемою. З початковою схемою вона збігається тоді, коли зміни конструкції включають лише видалення існуючих стрижнів конструкції, що в розрахунковій схемі представляється як відкидання відповідних в'язей. З кінцевою схемою вона збігається тоді, коли передбачено лише підведення нових стрижнів, що в

розрахунковій схемі представляється як накладання відповідних в'язей [12].

Початкову розрахункову схему можна отримати з базової розрахункової схеми відкиданням «зайвих» в'язей, що належать множині L і не накладені в початковій схемі.

Для розрахунку подібних схем конструкції, що відрізняються між собою лише множинами L_p , можна формувати й розв'язувати систему рівнянь МСЕ для базової розрахункової схеми, а для визначення НДС конструкції за іншими схемами враховувати властивості епюр у стрижневих системах, що підлягають принципу суперпозиції.

Визначення НДС конструкції за різними подібними розрахунковими схемами розглянемо на прикладі задачі із двома ($k = 2$) схемами, що відрізняються однією «зайвою» в'яззю n : $|L| = 1$, $|L_1| = 1$, $|L_2| = \emptyset$. Будь-який тип зусилля (згинальний момент, поперечна сила тощо) позначимо через S . Від дії зовнішнього навантаження в першій розрахунковій схемі (позначимо її $C1$) виникає епюра S_1^{3H} , у другій (позначимо її $C2$) – епюра S_2^{3H} . Треба визначити епюри S_1^{3H} і S_2^{3H} .

Для визначення епюр S_1^{3H} і S_2^{3H} можна, незважаючи на подібність розрахункових схем $C1$ і $C2$, для кожної з цих схем формувати і розв'язувати систему рівнянь МСЕ. При цьому будуть сформовані дві системи рівнянь МСЕ з різними матрицями жорсткості.

Для зменшення обсягів обчислень при визначенні епюр S_1^{3H} і S_2^{3H} можна поступати так: за допомогою формування й розв'язування системи рівнянь МСЕ визначити епюру S_1^{3H} для розрахункової схеми $C1$, що збігається з базовою, а для визначення епюри S_2^{3H} у схемі $C2$ врахувати властивості епюр у стрижневих системах, що підлягають принципу суперпозиції. Для цього проаналізуємо епюри S_1^{3H} і S_2^{3H} . Вони відрізняються між собою значеннями зусиль у поперечних перерізах елементів конструкції, зокрема: на місці «зайвої» в'язі n у S_1^{3H} виникає зусилля s_{1n}^{3H} , що, зазвичай, відмінне від нуля, а в S_2^{3H} – зусилля $s_{2n}^{3H} = 0$, оскільки у шарнірі зусилля відсутні.

Епюру S_2^{3H} можна визначити, враховуючи зменшення до нуля зусилля s_{1n}^{3H} в «зайвій» в'язі n :

$$S_2^{3H} = S_1^{3H} + S_n^{OD} x_n, \quad (3)$$

де S_n^{OD} – одинична епюра в $C2$ від дії пари позавузлових протилежних за напрямком одиничних сил $X_{oo}=1$ (позначимо це завантаження OD), прикладених у перерізах, що знаходяться на стержні нескінченно близько від відкинutoї «зайвої» в'язі n ;

x_n – коефіцієнт, що визначається із залежності (4), що виражає відсутність зусиль $s_{2n}^{3H}=0$ у в'язі n після регулювання зусиль.

Додатним напрямком X_{oo} вважається такий напрямок, при якому в $C1$ або $C2$ в перерізах, що розміщені близько до шарніра n , виникає відповідне до типу в'язі n додатне зусилля.

Запишемо умову, що виражає зменшення до нуля зусилля s_{1n}^{3H} в «зайвій» в'язі n :

$$s_{1n}^{3H} + s_{nn}^{OD} x_n = 0, \quad (4)$$

де $s_{nn}^{OD}=1$ – зусилля у «зайвій» в'язі n від дії у ній одиничних сил $X_{oo}=1$.

Після визначення x_n в (4) необхідно ще визначити епюру S_n^{OD} .

Зауважимо, що аналогічно можна вивести залежності для визначення епюри S_2^{3H} у розрахунковій схемі, що утворена із $C1$ відкиданням декількох «зайвих» в'язей ($|L| > 1$). Епюру S_2^{3H} можна представити як суму епюри S_1^{3H} і лінійної комбінації одиничних епюр від дії одиничних сил $X_{ooi}=1$, прикладених у перерізах, що знаходяться нескінченно близько від відкинутих в'язей. При цьому для визначення коефіцієнтів лінійної комбінації (компонентів деякого вектора \bar{X}) замість рівняння (4) треба формувати систему лінійних алгебраїчних рівнянь, що виражають нульові значення епюри S_2^{3H} у відкинутих в'язях. Кількість рівнянь у цій системі дорівнює $|L|$ – кількості відкинутих в'язей.

Для побудови епюри S_n^{OD} можна використати спосіб визначення зусиль у деякій заданій статично невизначуваній стрижневій конструкції від дії пари одиничних сил у «зайвій» в'язі n , що наведений в [11]. Розглянемо основну ідею цього способу на прикладі вище представленої конструкції, у якій уводиться один шарнір.

В [11] розглянуто три стрижневі системи $CC1$, $CC2$ і $CC3$. Системам $CC1$ і $CC2$ відповідають розрахункові схеми $C1$ і $C2$, що описані вище для конструкції, у яку вводиться шарнір у процесі її реконструкції і підсилення. Системі $CC3$ відповідає розрахункова схема $C3$, яка ут-

ворена із $C2$ закріпленням всіх її вузлів від будь-яких можливих переміщень. Завантаження вузловими силами, отриманими в $C3$ зведенням позавузлових навантажень $X_{oo}=1$ до вузлових [14], позначено через $3B$.

Перший нижній індекс при S характеризує номер розрахункової схеми (1, 2, 3 для $C1$, $C2$, $C3$ відповідно), а другий (при необхідності) – місце виникнення (поперечний переріз) і тип зусилля [11]. Верхній індекс при S характеризує вид навантаження. Наприклад, S_2^{OD} – силовий фактор довільного типу в довільному перерізі $C2$ від одиничного зусилля $X_{oo}=1$ (шукана величина), а s_{1n}^{3B} – силовий фактор (тип якого відповідає типу «зайвої» в'язі n) в $C1$ у перерізі із «зайвою» в'яззю n від завантаження $3B$.

Показано, що зусилля в деякій заданій статично невизначуваній стрижневій конструкції від дії пари одиничних сил у «зайвій» в'язі n можна визначити за формулою:

$$S_2^{OD} = \frac{S_1^{3B} + S_3^{OD}}{1 + s_{1n}^{3B}}, \quad (5)$$

де S_3^{OD} – епюра довільного типу в $C3$ від одиничного зусилля $X_{oo}=1$.

Залежність (5) отримана з використанням принципу суперпозиції, тобто епюру S_2^{OD} представлено як суму епюр двох розрахункових схем: епюри S_1^{3B} схеми $C1$ від дії завантаження $3B$ і епюри S_3^{OD} схеми $C3$ від дії завантаження OD з урахуванням того, що зусилля s_{2n}^{OD} має дорівнювати одиниці.

Визначення епюри S_3^{OD} можна виконати за допомогою розрахунку в $C3$ одного стрижня із «зайвою» в'яззю n на дію OD за методами опору матеріалів [14].

Для визначення епюри S_1^{3B} можна формувати і розв'язувати систему рівнянь МСЕ з матрицею жорсткості для $C1$ і з правою частиною, що відповідає зведеному навантаженню $3B$. Дві системи рівнянь, що сформовані для визначення епюр S_1^{3H} і S_1^{3B} , можна об'єднати в одну матричну систему із двома правими частинами, що виражають зовнішнє і зведене навантаження відповідно.

Оскільки обсяг обчислень зменшується внаслідок розрахунку однієї системи рівнянь із двома правими частинами замість двох систем рівнянь з різними матрицями жорсткості, то доцільно при подібності розрахункових схем

формувати й розв'язувати систему рівнянь МСЕ для базової розрахункової схеми. Для визначення НДС конструкції за іншими схемами потрібно враховувати властивості епюру у стрижневих системах, що підлягають принципу суперпозиції.

Узагальнюючи, уведемо такі позначення: P^{3H} – множина всіх зовнішніх навантажень і впливів, що можуть діяти на конструкцію на будь-якому етапі реконструкції, P^{OD} – множина одиничних сил $X_{oo}=1$, прикладених у перерізах, що знаходяться на стержнях нескінченно близько від відкинутих в'язей множини L , $P=P^{3H} \cup P^{OD}$ – множина навантажень, на які потрібно розрахувати базову розрахункову схему. При цьому: $P^{3H} \cap P^{OD} = \emptyset, |P^{OD}| = |L|$.

Внаслідок розрахунку базової розрахункової схеми на завантаження P отримаємо епюри $S=S^{3H} \cup S^{OD}$, де S^{3H} – епюри від зовнішніх навантажень P^{3H} , S^{OD} – одиничні епюри від навантажень P^{OD} .

Тоді на основі виконаного аналізу основну ідею розрахунку конструкції під час проектування її реконструкції і підсилення можна сформулювати так: для визначення НДС конструкції достатньо формувати й розв'язувати одну матричну систему рівнянь МСЕ з декількома правими частинами для базової розрахункової схеми, а епюри на будь-якому етапі реконструкції можна представити як суму відповідних епюр S^{3H} і лінійної комбінації епюр S^{OD} .

Розрахунок СМК під час оптимального проектування реконструкції і підсилення реалізовано в програмі OptCAD [15, 16]. Розглянемо задавання базової розрахункової схеми й процесу реконструкції в програмі OptCAD.

Для задавання базової розрахункової схеми конструкції у вікнах програми OptCAD спочатку необхідно описати її вузли, стрижні, типи жорсткості, опори (зовнішні в'язі) й шарніри. [15]. При цьому потрібно описати стрижні, які в процесі реконструкції видаляють, приєднують або залишають без змін. В'язі, що належать множині L , мають бути накладеними. Потім треба задати завантаження одиничними силами, що прикладені у в'язях множини L , тим самим виділивши ці в'язі серед інших. Кожній в'язі з множини L має відповідати одне завантаження одиничними силами. Описом навантажень одиничними силами завершується за-

давання базової розрахункової схеми конструкції.

Потім треба описати інші завантаження, що будуть прикладені до конструкції в процесі реконструкції, підсилення й подальшої експлуатації. При цьому описують контрольовані навантаження й завантаження змінними короткочасними навантаженнями.

Із заданих завантажень формують сполучення навантажень. Ці сполучення формують для перевірки Π_3 відповідності конструкції вимогам (рис. 1) наприкінці етапів реконструкції (в тому числі й після завершення реконструкції і підсилення). Контрольовані навантаження, як і базові завантаження в [17], автоматично входять до всіх сполучень навантажень.

Після формування базової розрахункової схеми, завантажень і сполучень навантажень задають процес реконструкції в розробленому вікні програми OptCAD «Реконструкція та підсилення» (рис. 2).

Під час відкривання цього вікна у ньому відображаються раніше введені дані, що використовуються для подальшого задавання процесу реконструкції: список в'язей, що належать множині L (розміщений на панелі «Зміни розрахункової схеми»), списки всіх завантажень і сполучень навантажень (розміщені на панелі «Шаблони етапів реконструкції»).

У програмі OptCAD передбачена можливість вибору оптимального варіанта реконструкції СМК. Варіант реконструкції є певною послідовністю деяких етапів реконструкції. Варіанти можуть відрізнятися кількістю й послідовністю етапів, використовуваними методами і способами реконструкції і підсилення. При цьому деякі з етапів реконструкції можуть використовуватись у різних варіантах реконструкції.

Для забезпечення зручності задавання множини варіантів реконструкції прийнято рішення попередньо формувати допоміжний список для шаблонів етапів реконструкції. Шаблон етапу реконструкції містить ті ж елементи й у тій же послідовності, що й етап реконструкції. Шаблон можна використати декілька разів під час задавання етапів різних варіантів реконструкції.

Розглянемо послідовність задавання процесу реконструкції за допомогою вікна «Реконструкція та підсилення».

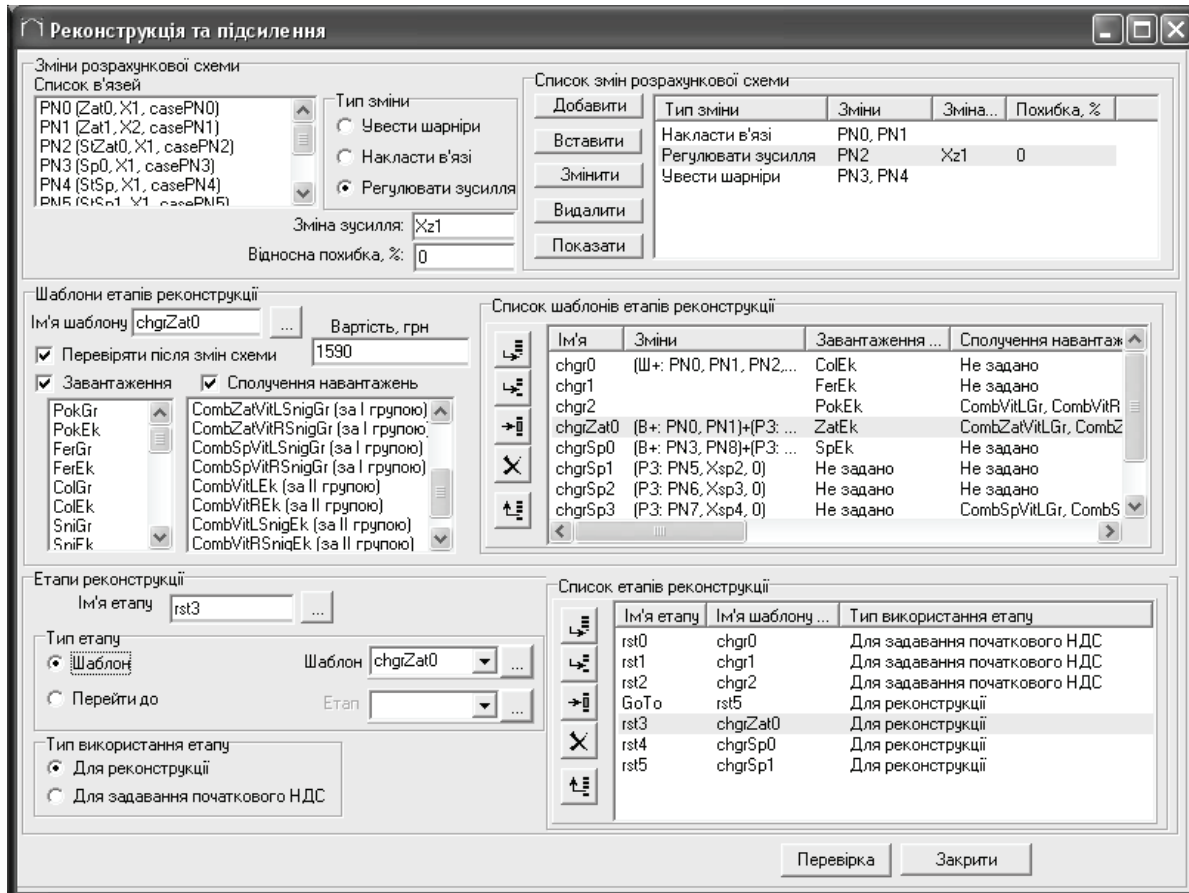


Рисунок 2. Вікно програми OptCAD для задавання процесу реконструкції.

Спочатку описують множину шаблонів етапів реконструкції. Під час опису шаблону проєктувальник повинен вибрати, за необхідності, одне контрольоване навантаження і одне або декілька сполучень навантажень, задати відповідні зміни розрахункової схеми і внести цей шаблон у список шаблонів реконструкції (рис. 2).

Під час задавання змін розрахункової схеми використовують такі типи змін: «Увести шарніри», «Накласти в'язі» і «Регулювати зусилля». Для кожного типу зміни розрахункової схеми необхідно вибрати тип зміни, вказати в'язі, у яких відбувається зміна, і внести її у список змін розрахункової схеми. Наприклад, для введення шарнірів потрібно вказати тип зміни «Увести шарніри», вибрати у відповідному списку в'язі, замість яких вводяться шарніри (в'язі множини L_i), і внести ці зміни в «Список змін розрахункової схеми». Для опису регулювання зусилля у в'язі необхідно додатково ввести значення зміни зусилля і відносну похибку регулювання зусилля.

Базова розрахункова схема конструкції, зазвичай, не збігається з початковою розрахунковою схемою, що існує до початку реконструкції і підсилення. У такому разі початкову розрахункову схему отримують із базової розрахункової схеми відкиданням в'язей, що належать до множини L_1 – доповнення множини L_1 до множини L $L_1 = L \setminus L_1$. Для цього в списку в'язей вікна «Реконструкція та підсилення» необхідно вибрати в'язі множини L_1 , задати тип зміни «Увести шарніри» і внести ці зміни в список змін розрахункової схеми.

Процес реконструкції описують на панелі «Етапи реконструкції» (рис. 2). Для опису одного варіанта процесу реконструкції (з відомими змінами СМК й навантажень, заданою їхньою послідовністю) під час формування етапу реконструкції вказують тип етапу «Шаблон», тип використання етапу і вибирають шаблон. Потім вносять цей етап у «Список етапів реконструкції». Вносити етапи реконструкції у цей список необхідно у послідовності, що відпо-

відає 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 базової схеми (рис. 2). Для наступних етапів реконструкції вказують тип «Для реконструкції».

Для задавання варіантів реконструкції і підсилення використовують змінні проектування, які можна описати з допомогою елементів групи «Тип етапу» панелі «Етапи реконструкції».

Висновки

Формалізовано представлення розрахункових схем конструкції, що підлягає реконструкції і підсиленню. Запропоновано використовувати розрахункові схеми, які містять у проектному

положенні всі стрижні конструкції (існуючі, видалені й нові) і відрізняються лише в'язями, що приєднують нові й видалені стрижні до інших елементів.

Під час розрахунку конструкції, що підлягає реконструкції і підсиленню, запропоновано формувати і розв'язувати одну матричну систему рівнянь МСЕ з декількома правими частинами для базової розрахункової схеми, а для визначення НДС конструкції за іншими схемами враховувати властивості епюру стрижневих системах, що підлягають принципу суперпозиції. Базова розрахункова схема містить усі стрижні, а також «зайві» в'язі, які накладають, вилучають або у яких регулюють зусилля протягом реконструкції і підсилення.

Задавання базової розрахункової схеми і процесу реконструкції реалізовано в програмі оптимізації OptCAD.

Література

1. Лобанов, Л. М. Технічний стан конструкцій та споруд [Текст] / Л. М. Лобанов // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2010. – № 3. – С. 31–34.
2. Ребров, И. С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет [Текст] / И. С. Ребров. – Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 288 с.
3. Бліхарський, З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд [Текст] : Навчальний посібник / З. Я. Бліхарський. – Л. : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 108 с.
4. Основи реконструкції будівель і споруд [Текст] : навч. посіб. / І. Г. Іваник, С. І. Віхоть, Р. С. Пожар, Я. І. Іваник, Ю. Ю. Вибранець; за ред. І. Г. Іваника. – Л. : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 276 с.
5. ДБН В.3.1-1-2002. Ремонт та підсилення несучих і огорожувальних конструкцій і основ промислових будівель та споруд [Текст]. – Вводяться вперше; введені в дію з 01.07.2003. – К. : Держкомітет України буд-ва і архіт., 2003. – 82 с.
6. Сергеев, Н. Д. Расчет статически неопределимых систем при их многоэтапной последовательной модификации [Текст] / Н. Д. Сергеев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1975. – № 6. – С. 11–16.
7. Сергеев, Н. Д. К расчету статически неопределимых систем при их многоэтапной последовательной модификации [Текст] / Н. Д. Сергеев //

References

1. Lobanov, L. M. Engineering status of constructions and structures. In: *Industrial building and engineering constructions*, 2010, Number 3, p. 31–34. (in Ukrainian)
2. Rebrov, I. S. Strengthening of rod assembled sections: design and analysis. Leningrad: Building Publishing house. Leningrad Department, 1988. 288 p. (in Russian)
3. Blihariskii, Z. Ya. Reconstruction and strengthening of buildings and constructions. Textbook. Lviv: Publication National University «Lviv Politechnique», 2008. 108 p. (in Ukrainian)
4. Ivanyk, I. G.; Vihot, S. I.; Pozhar, R. S.; Ivanik, Ya. I.; Vybranets, Yu. Yu. Edited by Ivanyk, I. G. Principles of buildings and constructions reconstruction. Textbook. Lviv: Publication National University «Lviv Politechnique», 2010. 276 p. (in Ukrainian)
5. DBN B.3.1-1-2002. Repair and strengthening of bearing and enclosing structures and frameworks of industrial buildings and structures. Kyiv: Ukraine National Committee of Civil Engineering and Architecture, 2003. 82 p. (in Ukrainian)
6. Sergeev, N. D. Analysis of statically indeterminate systems under their many-stage consistent modification group. In: *Building mechanics and analysis of structures*, 1975, Number 6, p. 11–16. (in Russian)
7. Sergeev, N. D. To the analysis of statically indeterminate systems under their many-stage consistent modification group. In: *Building mechanics analysis of structures*, 1976, Number 4, p. 26–31. (in Russian)

- Строительная механика и расчет сооружений. – 1976. – № 4. – С. 26–31.
8. Трофимович, В. В. Проектирование предварительно напряженных вантовых систем [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. – К. : Будівельник, 1970. – 140 с.
 9. Перельмутер, А. В. Управление поведением несущих конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – Москва : Изд-во АСВ, 2011. – 184 с.
 10. Мажид, К. И. Оптимальное проектирование конструкций [Текст] : пер. с англ. / К. И. Мажид. – М. : Высшая школа, 1979. – 237 с.
 11. 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. – Л. : Вид-во НУЛП, 2004. – № 495. – С. 151–153.
 12. Пелешко, І. Д. Оптиміальне проектування стрижневих металевих конструкцій з урахуванням монтажних станів [Текст] / І. Д. Пелешко, І. Д. Іванейко, І. М. Балук // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури : збірник наукових праць / Міністерство освіти і науки України, Донбаська національна академія будівництва і архітектури. – Макіївка : Вид-во ДонНАБА, 2010. – Вип. 2010-5(85) : Сучасні будівельні матеріали, конструкції та інноваційні технології зведення будівель і споруд. – С. 353–359.
 13. Пелешко, І. Д. Формалізація процесу реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій [Текст] / І. Д. Пелешко, І. М. Балук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – Л. : Вид-во НУЛП, 2012. – № 742. – С. 149–154.
 14. 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.
 15. Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] / В. О. Пермяков, М. В. Гоголь, І. Д. Пелешко, М. Р. Більський, Б. С. Чайка. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2005. – 180 с.
 16. 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.
 17. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, А. В. Перельмутер. – М. : Издательство СКАД СОФТ, 2009. – 656 с.
 8. Trofimovich, V. V.; Permiakov, V. A. Design of prestressed cable system. Kyiv: Budivelnyk, 1970. 140 p. (in Russian)
 9. Perelmuter, A. V. Control of load carrying structure action. Moscow: ASV, 2011. 184 p. (in Russian)
 10. Mazhid, K. I. Optimal design of constructions. Moscow: High school, 1979. 237 p. (in Russian)
 11. Peleshko, I. D. About a method of effort determination from prestress under the optimization of rod steel structure. In: *Proceeding of the National University «Lviv Politechnique». Theory and practice of building*, 2004, Number 495, p. 151–153. (in Ukrainian)
 12. Peleshko, I. D.; Ivaneyko, A. D.; Baluk I. M. Optimum designing of rod metal taking into account the state assembling. In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2010, Issue 2010-5(85): Present-day constructional materials, constructions and innovative technology of buildings and structures, p. 353–359. (in Ukrainian)
 13. Peleshko, I. D.; Baluk I. M. Formalization of process of reconstruction and strengthening of rod steel structures. In: *Proceeding of the National University «Lviv Politechnique». Theory and practice of buildings*, 2012, Number 742, p. 149–154. (in Ukrainian)
 14. Smirnov, A. F.; Aleksandrov, A. V.; Lashchenikov, B. Ya.; Shaposhnikov, N. N. Edited by Smirnov, A. F. Building mechanics. Bar Systems. Moscow: Stroizdat, 1981. 512 p. (in Russian)
 15. Permiakov, V. O.; Gogol, M. V.; Peleshko, I. D.; Bilskii, M. R.; Chaika, B. S. Design of rational composite metal constructions. Lviv: Publication National University «Lviv Politechnique», 2005. 180 p. (in Ukrainian)
 16. Peleshko, Ivan D.; Yurchenko, Vitalina V.; Beliaev, Nikita A. Computer-aided design and optimization of steel structural systems. In: *Zeszyt naukowy Politechniki Rzeszowskiej Nr 264. Budownictwo i Inzynieria Srodowiska z. 52.* Rzeszow, 2009, p. 145–154.
 17. Karpilovskii, V. S.; Kriksunov, E. Z.; Maliarenko, A. A.; Perelmuter, A. V. SCAD Office. Computer system SCAD. Moscow: SKAD SOFT, 2009. 656 p. (in Russian)

Пелешко Іван Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: оптимальне проектування складних технічних систем, оптимізація лінійно-деформованих стержневих конструкцій, різноманітні методології пошуку оптимального рішення.

Бліхарський Зіновій Ярославович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій та мостів, директор Інституту будівництва та інженерії довкілля Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: дослідження впливів агресивного середовища на напружено-деформований стан бетонних і залізобетонних конструкцій, їх міцність, деформативність, надійність, довговічність з прогнозуванням термінів безпечної експлуатації; реконструкція та підсилення будівельних конструкцій, будівель і споруд.

Балук Ігор Мирославович – асистент кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: оптимальне проектування реконструкції і підсилення стержневих металевих конструкцій.

Пелешко Иван Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: оптимальное проектирование сложных технических систем, оптимизация линейно-деформируемых стержневых конструкций, различные методологии поиска оптимального решения.

Блихарский Зиновий Ярославович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и мостов, директор Института строительства и инженерии окружающей среды Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: исследование влияния агрессивной среды на напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций, их прочность, деформативность, надежность, долговечность с прогнозированием сроков безопасной эксплуатации; реконструкция и усиление строительных конструкций, зданий и сооружений.

Балук Игорь Мирославович – ассистент кафедры строительного производства Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: оптимальное проектирование реконструкции и усиления стержневых металлических конструкций.

Ivan Peleshko – CSc., Associate Professor, Building Production Department, Lviv Politechnique National University. Scientific interests: optimum designing of complex technical systems, optimization of elastic frame structures, development of different techniques for optimum search decision.

Zinoviy Blikharskyu – DSc (Eng.), Professor, Head of the Building Structures and Bridges Department, Head of the Institute of Building and Environmental Engineering, Lviv Politechnique National University. Scientific interests: research of the aggressive environment impact on the stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures, their strength, deformability, reliability, durability with forecasting the timing of safe exploitation; reconstruction and reinforcement of structures and buildings.

Igor Baluk – lecturer, Building Production Department, Lviv Politechnique National University. Scientific interests: optimum designing of reconstruction and reinforcement of steel structures.