

УДК 624.04

А. С. Моргун¹
М. М. Сорока²

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ANSYS

¹Вінницький національний технічний університет;²Одеська державна академія будівництва та архітектури

Розглянуто розв'язання задач параметричної оптимізації будівельних конструкцій із застосуванням програмного комплексу ANSYS.

Ключові слова: будівельні конструкції, оптимальне проектування, оптимізація, програмні комплекси.

Вступ

Задачі раціонального розподілу матеріалу в будівельних конструкціях виникли з того самого моменту, коли людство почало зводити інженерні споруди. Але і на сьогоднішній день ця проблема є актуальною. Перед будівельниками і архітекторами стоїть задача проектування архітектурно виразних, надійних і дешевих будівель і споруд. І ця задача може мати розв'язок за умови використання методів оптимізації у проектуванні несучих конструкцій. Розвиток програмних комплексів і комп'ютерної техніки може значно спростити проектування оптимальних конструкцій. Кожний проектний розрахунок будівельних конструкцій включає необхідність оптимізації їх елементів.

Питання оптимізації таких конструкцій розглянуто в роботах В. А. Баженова [1], А. В. Перельмутера [3], А. В. Каплуна [6], М. М. Сороки [5] та інших.

Метою роботи є аналіз можливостей програмного комплексу ANSYS у розв'язанні деяких задач оптимізації будівельних конструкцій.

Параметрична оптимізація

З математичної точки зору задача параметричної оптимізації зводиться до пошуку невідомого вектора змінних x_i , який мінімізує цільову функцію $f(x_i)$, за заданих обмежень у вигляді рівнянь і нерівностей. Змінні x_i називаються змінними проектування. До них можуть бути віднесені розміри поперечних перетинів елементів, зусилля в елементах, координати характерних вузлів конструкції. До обмежень-нерівностей відносяться граничні характеристики матеріалів, обмеження, пов'язані з конструктивними вимогами, вимоги невід'ємності деяких значень змінних проектування.

До обмежень, що записуються у вигляді рівнянь, відносяться рівняння рівноваги, рівняння сумісності деформацій та фізичні рівняння. За цільову функцію може бути об'єм матеріалу в конструкції, що прямо пов'язано з її вартістю, накреслення осі конструкції, розподіл зусиль в елементах конструкції, величина навантаження.

Формально процес знаходження оптимального розв'язку відповідає задачі математичного програмування (лінійної, або нелінійної). Такі задачі в загальному вигляді є досить складними і аналітичний розв'язок отримано для обмеженого класу задач. У більшості випадків задачі параметричної оптимізації розв'язуються з використанням наближених числових методів за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Деякі універсальні програмні комплекси (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS) мають у своєму складі модулі, що дозволяють розв'язувати задачі оптимізації. Алгоритм пошуку оптимального варіанта стисло можна подати у такій послідовності:

1 – введення вихідних даних і початкових значень змінних проектування;

- 2 – розв’язання базової задачі (визначення зусиль і переміщень) за заданих параметрів;
- 3 – формування обмежень і цільової функції;
- 4 – перевірка цільової функції на мінімум;
- 5 – корегування змінних проектування і перехід до п. 2, якщо перевірка не задовольняється;
- 6 – друк результатів оптимізації.

Розглянемо приклади параметричної оптимізації деяких конструкцій у програмному комплексі ANSYS [1].

Приклад 1. Оптимізація окреслення осі арки із симетричним навантаженням

За змінні проектування взяті значення ординат осі арки y_i . Обмеженням є границі зміни ординат $0 \leq y_i \leq f$, де f — стріла підйому арки. За цільову функцію, що мінімізується, взята сума квадратів згинальних моментів у вузлах арки ($f(y_i) = \sum M_i^2$). Враховуючи те, що арка і навантаження симетричні, розглядалась лише ліва половина арки з урахуванням умов симетрії.

Як вихідну взято схему арки у вигляді трикутника. На рис. 1 показані приклади оптимізації такої арки під дією деяких навантажень. Перші два приклади оптимізації, коли на арку діє рівномірно розподілене навантаження (вертикальне і нормальне до осі), добре відомі. У цих випадках оптимізована вісь арки набуває вигляду дуги параболи і дуги кола.

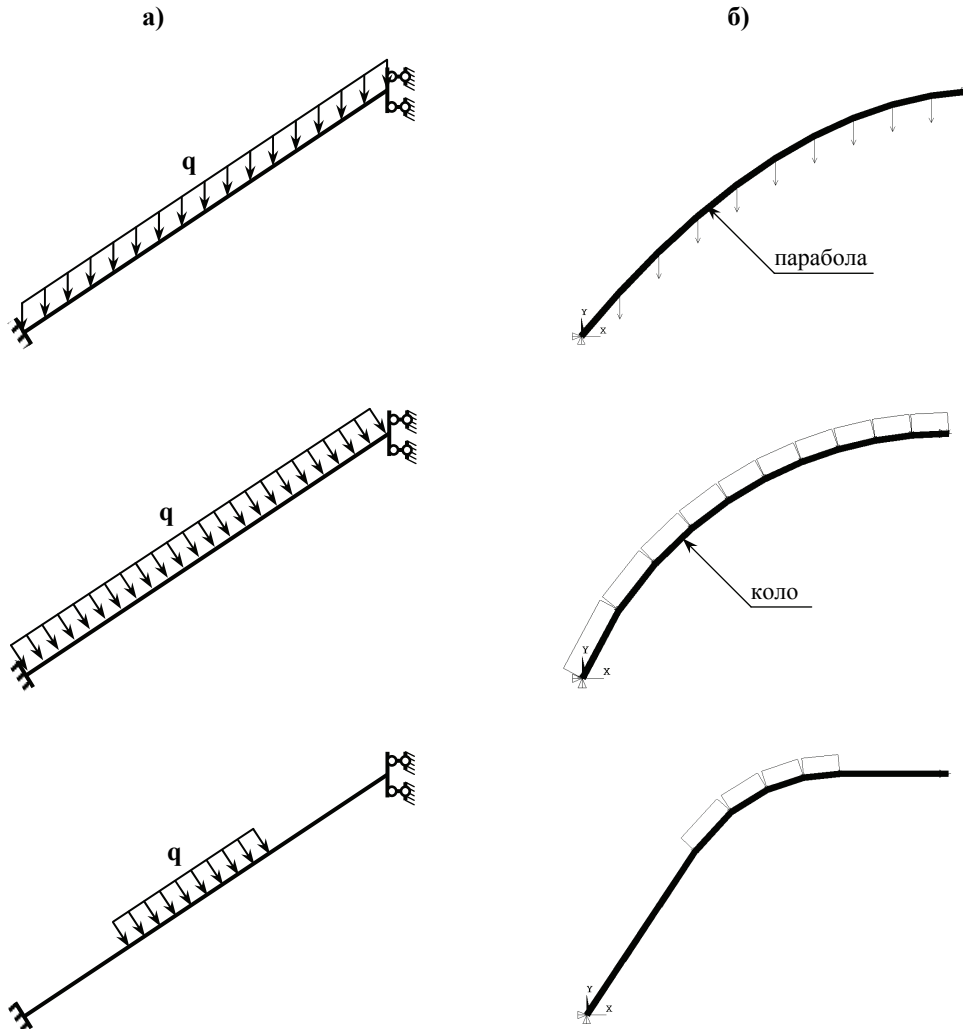


Рис. 1: а — вихідна схема арки; б — вісь арки після оптимізації

Приклад 2. Оптимізація ваги ферми [2]

Для ферми, зображеної на рис. 2, потрібно підібрати площі поперечних перетинів стрижнів так, щоб вага ферми була мінімальною. Вихідні дані: проліт ферми 16 м; висота ферми 3 м; початкові

площі стрижнів $0,01 \text{ м}^2$; модуль пружності матеріалу $2 \cdot 10^8 \text{ кН/м}^2$, коефіцієнт Пуассона $0,3$; допустиме напруження на стиск $1,5 \cdot 10^5 \text{ кН/м}^2$; допустиме розтягувальне напруження $2 \cdot 10^5 \text{ кН/м}^2$; допустиме вертикальне переміщення вузлів нижнього поясу ферми 18 мм .

За змінні проектування взяті площі перетинів стиснутих (A_c) і розтягнутих (A_p) стрижнів. Обмеженнями є допустимі напруження у стрижнях ферми і вертикальні переміщення вузлів нижнього поясу ферми. Цільова функція — об'єм ферми $V = \sum l_i \cdot A_i$.

Результати параметричної оптимізації вихідної схеми ферми, показаної на рис. 2: початковий об'єм ферми $0,53 \text{ м}^3$, об'єм ферми після оптимізації $0,1748 \text{ м}^3$, площі перетинів стиснутих стрижнів $30,70 \text{ см}^2$, площі перетинів розтягнутих стрижнів $35,55 \text{ см}^2$, максимальне напруження в стиснутих стрижнях 128919 кН/м^2 , максимальне напруження у розтягнутих стрижнях 103146 кН/м^2 , вертикальне переміщення вузлів нижнього поясу: $y_2 = 14,1 \text{ мм}$; $y_3 = 17,9 \text{ мм}$; $y_4 = 13,2 \text{ мм}$.

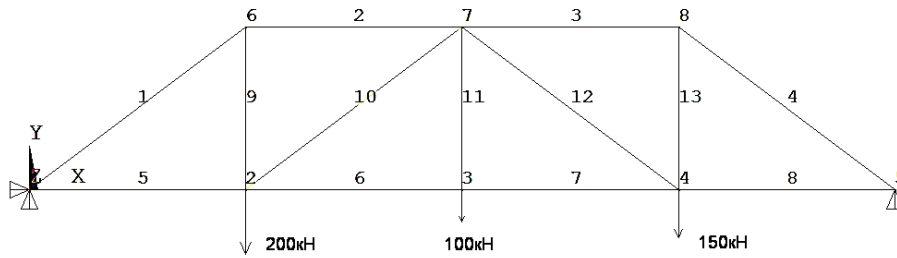


Рис. 2. Схема ферми

Якщо за змінні проектування для ферми (рис. 2) взяті площі перетинів стрижнів і ординати вузлів ферми за тих самих обмежень, то геометрична схема ферми дещо зміниться (рис. 3) і об'єм ферми буде дорівнювати $0,0950 \text{ м}^3$, що на 46% менше ніж у попередньому прикладі. Усі обмеження при цьому виконуються.

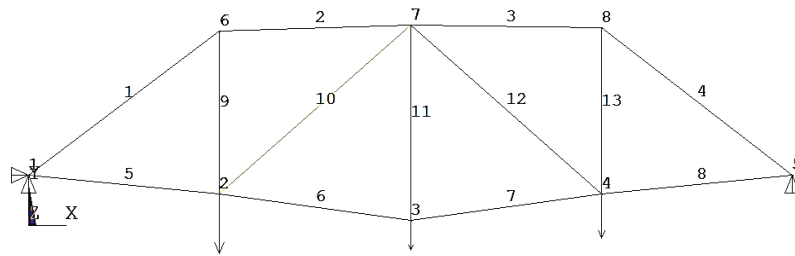
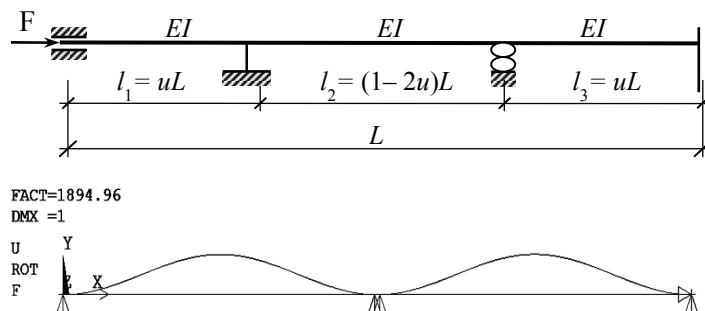


Рис. 3. Оптимізована схема ферми

Приклад 3. Регулювання стійкості

Розглянуто задачу знаходження максимальної критичної сили у разі зміни деяких параметрів конструкції. Ця задача може бути сформульована як задача знаходження максимуму цільової функції F_{cr} , або мінімуму цільової функції $1/F_{cr}$.

Розглянемо нерозрізну балку (рис. 4), для якої потрібно знайти положення проміжних опор, за якого критична сила буде максимальною.



ФАСТ=1894.96
DMX =1
U
ROT
F

$l_1 = l_2 = l_3 = 4 \text{ м}$;
 $E = 2 \cdot 10^8 \text{ кН/м}^2$;
Поперечний перетин балки
 $b \times h = 0,06 \times 0,12 \text{ м}$;
 $EI = 1728 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$

Рис. 4. Розрахунок стійкості нерозрізної балки

За змінні проектування взяті координати проміжних опор. Обмеженнями є границі зміни координат проміжних опор $0 \leq x \leq L/2$; $L/2 \leq x_3 \leq L$. Як цільову функцію взято обернену величину критичної сили $1/F_{cr}$.

В результаті розрахунку в ANSYS проміжні опори перемістились на середину балки (рис. 4) і створили там жорстке защемлення. Отримана в результаті оптимізації критична сила $F_{cr} = 1894,956$ кН. Зважаючи на те, що за оптимального положення проміжних опор нерозрізну балку можна розділити на дві однопрогонові балки з жорстким защемленням кінців, критичну силу можна обчислити за стандартною формулою

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0,5l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 1728}{(0,5 \cdot 6)^2} = 1894,964 \text{ кН.}$$

Як бачимо, значення критичних сил збігаються.

Розглянемо стійкість балки з пружною опорою на правому кінці (рис. 5а).

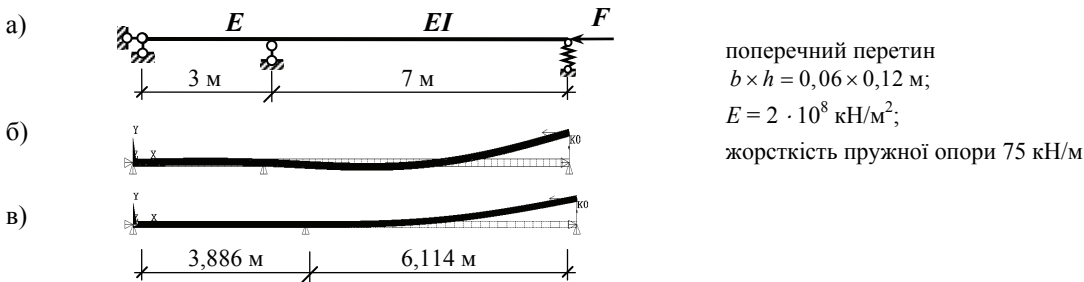


Рис. 5. Розрахунок стійкості балки з пружною опорою

За змінну проектування взято координату проміжної опори балки x_2 . Обмеженнями є границі зміни координати проміжної опори. Як цільову функцію взято обернену величину критичної сили $1/F_{cr}$.

До зміни положення проміжної опори критична сила дорівнює 441,612 кН. Форма втрати стійкості у цьому випадку показана на рис. 5б.

Максимальне значення критичної сили становить 457,776 кН у разі положення проміжної опори, як це показано на рис 5в. Аналітичне розв'язання цієї задачі [3] приводить до величини критичної сили 457,778 кН. Форма втрати стійкості показана на рис. 5в. Цікавою особливістю форми втрати стійкості в цьому випадку є те, що перший проліт балки не деформується і залишається прямим.

Приклад 4. Топологічна оптимізація об'ємного тіла

Найбільший інтерес на сьогодні становить топологічна оптимізація об'ємних тіл. І цьому є декілька причин. По-перше, топологічна оптимізація приводить до значної економії матеріалу, що в свою чергу значно знижує власну вагу конструкцій і виробів. По-друге, з появою 3D-принтерів дуже легко вирішується проблема виготовлення виробів складної форми, що створюються в результаті оптимізації. Найактуальнішим є використання топологічної оптимізації у літакобудуванні і виготовленні космічних апаратів, де вага повинна бути якомога менша. А зважаючи на те, що деякі вироби для забезпечення міцності виготовляються з дуже вартісних сплавів, економія матеріалу значно зменшує вартість виробів.

На сьогоднішній день для виконання топологічної оптимізації використовується такий підхід. Вважається, що матеріал є пористим і задача оптимізації розв'язується відносно ступеня щільності матеріалу. Розроблені спеціальні скінчені елементи, які мають всередині порожнини. Розрахунковий модуль ПК ANSYS [2, 5, 6] збільшує розміри порожнин у тих скінчених елементах, де матеріал навантажений не досить сильно, і зменшує розміри порожнин там, де матеріал більше завантажений. В результаті оптимізації об'єкта створюється малюнок щільностей, який характеризує його напружений стан.

Для ілюстрації реалізації наукової задачі топологічної оптимізації у будівництві на рис. 6 показано приклад створення конструкції моста. Компонується програма на алгоритмічній мові APDL ANSYS, задаються вихідні дані — створюється паралелепіпед, розміри якого є розмірами моста, який потрібно запроектувати, характеристики матеріалу. Опори встановлені на поперечних ребрах паралелепіпеда, навантаження розподілене по верхній грані.

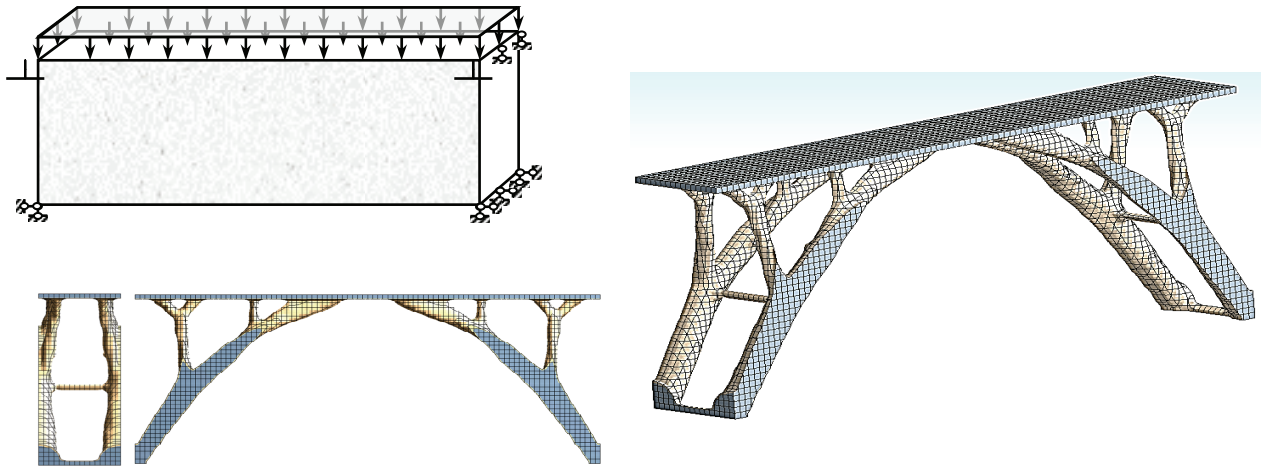


Рис. 6. Топологічна оптимізація об'ємного тіла

У результаті досліджень весь «зайвий» матеріал видаляється і отримується зображення досить легкого арочного моста. Звичайно, щоб це зображення стало проектом моста над ним повинен попрацювати конструктор. Але, користуючись цим зображенням, конструктор буде мати впевненість у раціональному використанні матеріалу.

Висновки

1. Оптимізація конструкцій на сьогоднішній день є досить актуальною і дозволяє значно знизити матеріалоемність і вартість будівель і споруд.
2. Програмний комплекс ANSYS дозволяє якісно і швидко проводити наукові дослідження з використанням параметричної та топологічної оптимізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Информатика. Інформаційні технології в будівництві автоматизованого проектування : підручник / [В. А. Баженов, В. З. Крискунов, А. В. Перельмутер, О. В. Шишов]. — К. : Каравелла, 2004. — 360 с.
2. Основы работы в ANSYS 17 / [Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова]. — М. : ДМК Пресс, 2017. — 210 с.
3. Пермяков В. А. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций / В. А. Пермяков, А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко. — К. : ТОВ «Издательство «Сталь», 2008. — 538 с.
4. Бекшаев С. Я. Об оптимальном расположении промежуточной опоры продольно сжатого стержня / С. Я. Бекшаев // Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури. — 2012. — Вип. 60. — С. 400—406.
5. Сорока М. М. ANSYS в задачах стійкості плоских стрижневих систем / М. М. Сорока. — Одеса : ОГАСА, 2017. — 141 с.
6. Каплун А. В. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. — 2-е изд. испр. / А. В. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олиферьева. — М. : Едиториал УССР, 2004. — 272 с.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.09.2017

Моргун Алла Серафимівна — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, e-mail: bmga.pcb@gmail.com ;

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Сорока Микола Миколайович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки.

Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса

A. S. Morgun¹
M. M. Soroka²

Solution of Parametric Optimization of Building Structures in ANSYS PC

¹Vinnytsia National Technical University;

²Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

The use of the ANSYS software complex for solving parametric optimization of building constructions has been considered.

Keywords: building constructions, optimal design, optimization, software complexes.

Morgun Alla S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Construction, Urban and Architecture, e-mail: bmga.pcb@gmail.com ;

Soroka Mykola M. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistante Professor of the Chair of Construction Mechanics

А. С. Моргун¹
Н. Н. Сорока²

Решение задач параметрической оптимизации строительных конструкций в программном комплексе ANSYS

¹Винницкий национальный технический университет;

²Одесская академия строительства и архитектуры

Рассмотрено решение задач параметрической оптимизации строительных конструкций с использованием программного комплекса ANSYS.

Ключевые слова: строительные конструкции, оптимальное проектирование, параметрическая оптимизация, программные комплексы.

Моргун Алла Серафимовна — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: bmga.pcb@gmail.com ;

Сорока Николай Николаевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительной механики