

УДК 624.014.2(519.168)

Алгоритмічна оптимізація каркасів багатопверхових будівель за критерієм металоемності

Білик А.С., к.т.н., Терновий М.І., Хмельницький С.В.

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація. У статті обґрунтовано актуальність оптимізації та вибору конструкційної схеми багатопверхових будівель комерційного призначення на передпроектній стадії. Метою досліджень є пошук оптимального конструктивного рішення офісної будівлі висотою до 100 м зі сталевим каркасом та центральним ядром жорсткості. Це досягається за допомогою розроблення комп'ютерного інструменту на основі зв'язку між собою вже існуючих додатних програм.

Аннотация. В статье обоснована актуальность оптимизации и выбора конструктивной схемы многоэтажных зданий коммерческого назначения на предпроектной стадии. Целью исследований является поиск оптимального конструктивного решения офисного здания высотой до 100 м со стальным каркасом и центральным ядром жесткости. Это достигается с помощью разработки компьютерного инструмента на основе связи между собой уже существующих пригодных программ.

Abstract. In the article the importance of structural optimization and choice of optimal structural scheme of high-rise commercial buildings in a preliminary design stage is shown. The purpose of research is to find the optimal solution of the office building up to 100 m with steel frame and central rigid core. The objective is achieved through development of computer tool based on interlinked existing suitable software.

Ключові слова: вибір оптимальних рішень, багатопверхові будівлі, системи автоматизованого проектування, сталеві конструкції.

Опис проблеми. Економія матеріальних ресурсів у будівництві як найбільш матеріаломісткій галузі України є однією із найважливіших державних господарчих задач. Економічна ефективність спорудження будівлі закладається ще на етапі її проектування, а тому дуже важливо, щоб проектувальники мали можливість пошуку найбільш оптимального конструктивного рішення об'єкта. У даній роботі розглядається критерій мінімальної матеріаломісткості.

Пошук оптимального конструктивного рішення особливо важливий для будівель підвищеної поверховості. На сьогоднішній день в Україні збудована значна кількість багатопверхових будівель з металевим каркасом. Це, зокрема, будинок Міністерства транспорту (1986), готель «Київ» (1973), книгосховище бібліотеки ім. Вернадського (1989) у м. Києві. Висота цих будівель сягала 80...100 м. У новітній час зводяться багатопверхові офісні будівлі – бізнес центр Олімпійський (2005), офісний центр Гулівер-В (2013) та ін.

Існуючий аналіз економічної доцільності конструкційних схем висотних будівель (рис. 1, [1]), свідчить, що у будинках із висотою близько 100 м собівартість одного квадратного метра площі зростає по відношенню до будинків середньої поверховості не більше ніж на 10–15 %, але зі збільшенням висоти понад 100 м різниця значно збільшується. Це пов'язано з потребою забезпечення жорсткості будинку пропорційно зростанню вітрових навантажень.

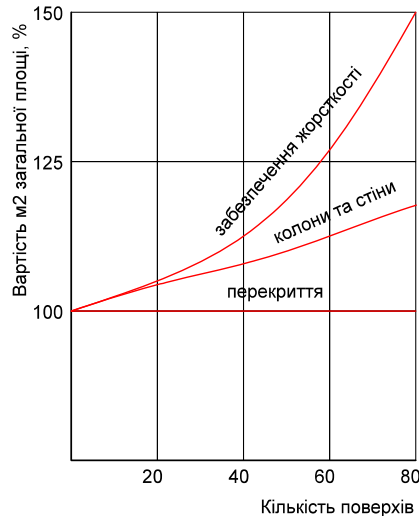


Рис. 1. Залежність питомої вартості площі будинку від кількості поверхів [1]

Огляд останніх досліджень. В Україні вже протягом декількох десятиліть успішно ведуться дослідження у надзвичайно актуальному напрямку для покращення проектування – оптимізації металевих конструкцій і конструктивних рішень будівель [4, 5, 7]. Оптимізаційні задачі поки що, в основному, виконуються вузькоспеціалізовано, у неавтоматизованому або напівавтоматизованому режимі з комп'ютеризацією розрахунків у окремих етапах. Основним недоліком сучасної системи оптимізації конструктивних рішень металевих конструкцій є необхідність високої кваліфікації виконавців, велика трудомісткість, а відповідно її висока вартість і тривалість робіт.

Логічним наступним кроком розвитку оптимізації сталевих конструкцій є створення систем одностадійного оптимального проектування. Такі системи, спочатку виникнувши у авіації, де несуча конструкція, зовнішня форма та функція дуже тісно пов'язані зовнішніми обмеженнями та багатьма жорсткими критеріями, вже зараз прийшли у машинобудування та проектування кораблів та автомобілів. Поступово системи одностадійного оптимального проектування впроваджуються і у будівництво.

У них абриси архітектурної оболонки, характеристики несучого каркасу та будівлі в цілому є наслідком алгоритмічного оптимізаційного розрахунку з урахуванням численних параметрів [6, 7] що отримало назву алгоритмічної архітектури [14].

Постановка задачі. Мета досліджень полягала у створенні автоматизованого комп'ютерного комплексу для пошуку оптимального, за витратами сталі, конструктивного рішення сталевого каркасу каркасно-стовбурної системи офісної будівлі висотою 100 м із центральним ядром жорсткості. Робоча гіпотеза дослідження передбачає пошук і об'єднання у єдиний комплекс існуючих придатних комп'ютерних програм, що дозволяє створити методику та комплекс вибору оптимального, за обраним критерієм, конструктивного рішення. Для досягнення мети було заплановано вирішити наступні задачі:

- вибрати типовий об'єкт-представник, для якого буде розроблено комп'ютеризований комплекс, цільову функцію та метод пошуку оптимального рішення;
- проаналізувати існуючі комп'ютерні програми, призначені для будівельного проектування і відібрати придатні для інтеграції їх у комплекс;
- розробити інтегрований комп'ютерно-проектний комплекс для оптимального вибору оптимального рішення об'єкта;
- провести верифікацію системи шляхом тестових чисельних експериментів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для розроблення розрахункового комп'ютерного інструменту було апробовано ряд існуючих програм: Rhino 3D – Grasshopper – SAP-2000 – Excel із можливістю імпорту в такі програми як Revit, Tekla Structure, Autocad, 3D-max та інші. Оскільки оптимізація передбачає варіювання параметрів каркасу, в першу чергу, було використано логіко-графічний програмний процесор Grasshopper 3D [11]. Ця програма – інструмент для генеративного моделювання параметричної архітектури у графічному середовищі Rhino 3D [12].

Процес моделювання у програмі Grasshopper 3D – це створення алгоритму у логіко-графічному («нодовому») інтерфейсі. Це означає, що скрипт-програмні модулі не пишуться тільки у вигляді коду, а візуально представлені у робочій оболонці-середовищі, де користувач задає ноди (компоненти або «батарейки», суть блок-схемні ікони) та деякі опції – критерії, обмеження тощо (рис. 2).

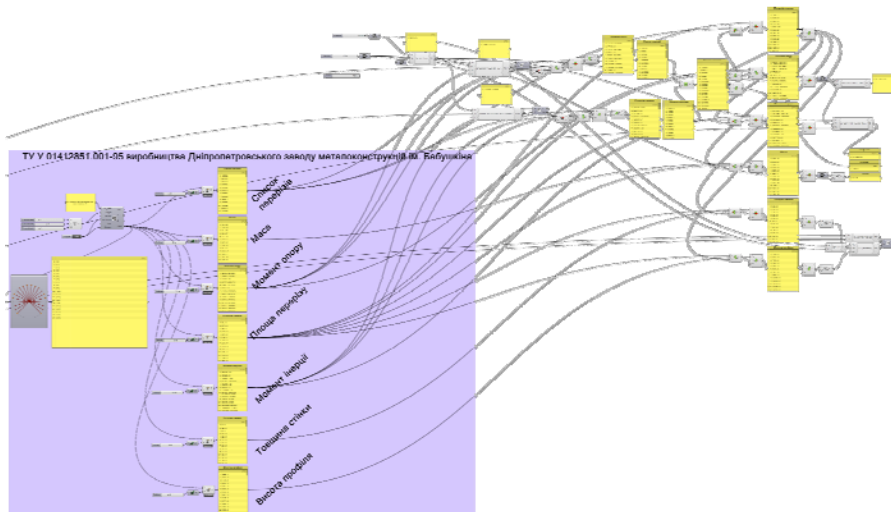


Рис. 2. Приклад фрагмента топології «монтажної» схеми алгоритмічної моделі каркасу будівлі з демонстрацією можливості приєднання зовнішніх виходів та входів інформації

Алгоритм описує взаємозалежності елементів будівлі від вхідних параметрів, обмежень, критеріїв і між собою, та складається із вихідних даних або параметрів (чисел, геометрії або інших даних) та послідовності дій із ними. У результаті на виході алгоритму генеруються обрані параметри, такі як геометрія, кількісні показники та суміжна інформація (об'єми, розміри, площі і таке інше). В будь-який момент вихідні дані можна змінити (наприклад, кількість колон в ряду, висоту поверху, проліт балки тощо), і вся модель перебудується (зі швидкістю введення нових вихідних даних) та зміняться кінцеві замовлені під час моделювання розраховані показники.

Відмінність генеративного алгоритмічного (параметричного) моделювання від традиційного полягає насамперед у тому, що створюється не просто модель, а логічна система, з якої можна отримати модель при довільних інших вихідних даних з області допустимих значень. Створивши програму-скрипт один раз, її можна багаторазово використовувати та редагувати по-новому. Збільшення кількості елементів, ускладнення та множення зв'язків між ними, введення нових параметрів і критеріїв та накопичення інформації щодо прийнятих рішень і вирішених задач надають утвореній програмі властивості системи штучного інтелекту.

Моделювання комп'ютерного комплексу для пошуку оптимального рішення для вибраного об'єкта на першому етапі досліджень прийнято від гравітаційних навантажень. В подальшому є можливість задавання динамічних, температурних, вітрових та інших навантажень.

У якості **критерію оптимізації** сталевого каркасу офісної будівлі на даному первинному етапі прийнято мінімальну металоємність. Геометричні розміри об'єкта-представника (рис. 3) наступні:

- максимальні розміри в плані 50×50 м;
- розміри в плані ядра жорсткості 25×25 м;
- висота будинку близько 100 м;
- висота поверху близько 4,2 м.

Обпирання балок на колони і ядро жорсткості прийнято шарнірними.

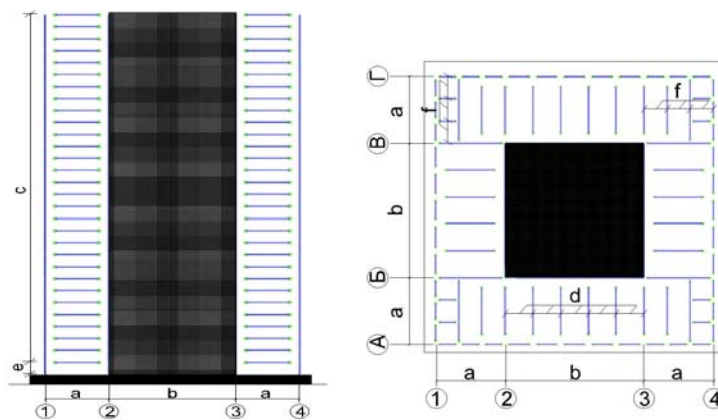


Рис. 3. План та центральний розріз конструкційної системи будівлі:
а – відстань від крайньої фасадної колони до ядра жорсткості (1,8 м до 5,2 м);
b – ширина та довжина ядра жорсткості; c – висота будівлі 100 м (+/-)10 м;
e – висота поверху від 4,2 м до 4,6 м; d – відстань між колонами та балками в межах ядра жорсткості від 1,8 м до 5,2 м; f – відстань між колонами та балками поза межею ядра жорсткості від 2,0 м до 4,3 м

Розробку виконано на основі ряду існуючих програм: Rhino 3D – Grasshopper – SAP-2000 – Excel та із можливістю імпорту в такі програми як: Revit, Tekla Structure, Autocad, 3D-max та інші (рис. 4).

Програмний комплекс у відповідності до цільової функції здатен у автоматичному режимі перебирати можливі варіанти геометрії каркасу з обрахуванням зусиль, поперечних перерізів, ваги конструкції і в кінцевому результаті видати оптимальний (із найменшою металоємністю) варіант геометрії та топології каркасу.

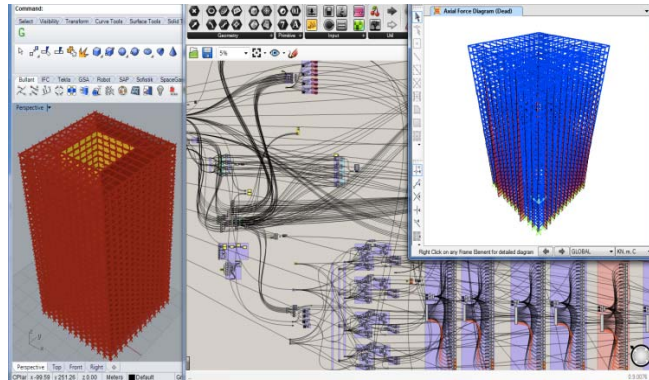


Рис. 4. Візуальне представлення будівлі у розрахунковому комп'ютерному комплексі

Алгоритмічна функція, яка розглядається, може бути класифікована як статична, не випукла, полімодальна, нелінійна, дискретна, розривна, недиференційована та частково сепарабельна. Для алгоритмічної оптимізації таких функцій у якості математичного апарату Grasshopper 3D використовує на вибір два інструменти евристичного пошуку: метод генетичних алгоритмів [8] та контрольованого відпалу [9]. Порівняння зазначених методів вартє окремого розгляду. Зазначимо наразі тільки, що останній, хоч і потребує більше машинного часу на пошук, дає кращу збіжність щодо досягнення глобального оптимуму при сильно нелінійних задачах [10].

Результати досліджень. Для оцінки динаміки змін підрахунків маси балок, колон та загальної маси металевого каркасу був виконаний чисельний експеримент. Вхідні дані для пошуку оптимального варіанту на першому етапі тестових випробувань програмного комплексу були задані наступні. Значення, які були прийняті константами:

- висота поверху – 4,2 м;
- кількість поверхів – 24;
- висота будівлі – 100,8 м;
- відстань від ядра до зовнішньої оболонки фасаду – 12,5 м;
- приведені характеристичне навантаження на перекриття – 12 кН/м²;
- марка сталі – С345.

Перемінним було прийняте значення кроку та розстановки колон по фасаду: від 2,0 м до 5,2 м. Відповідно до зміни кроку колон змінюється також і топологія схеми балкової клітини, що утворює перекриття поверху, а отже задача є дискретно нелінійною. В цілому автоматично було перераховано 81 варіант.

Характерні розрахункові варіанти представлені у табл. 1 та на рис. 5 свідчать про те, що загальна тенденція до збільшення загальної маси каркасу зростає при зменшенні кроку колон, тому що зростає їх кількість і кількість балок, що є логічним. Прослідковується також, у окремих випадках, випадання результату із загальної тенденції, що можна віднести за рахунок дискретної зміни кроку колон та профілів металопрокату. Це підтверджує мультимодальний характер алгоритмічної цільової функції та необхідності автоматизованого перебору варіантів при оптимізаційних розрахунках.

Таблиця 1

Витрати сталі в залежності від кроку колон

Варіант	Маса, т		Загальна маса каркасу, т	Крок колон, м	
	балок	колон		середні	крайні
№5	2296	1952	4248	5,2	4,33
№6	2521	2060	4581	4,33	4,33
№7	2465	2151	4616	3,1	3,25
№8	2231	2282	4513	3,25	3,25
№9	2402	2408	4810	2,88	2,6
№10	2530	2552	5082	2,6	2,6
№11	2445	2702	5147	2,36	2,16
№12	2555	2846	5401	2,16	2,16
№13	2518	3024	5542	2,0	1,85

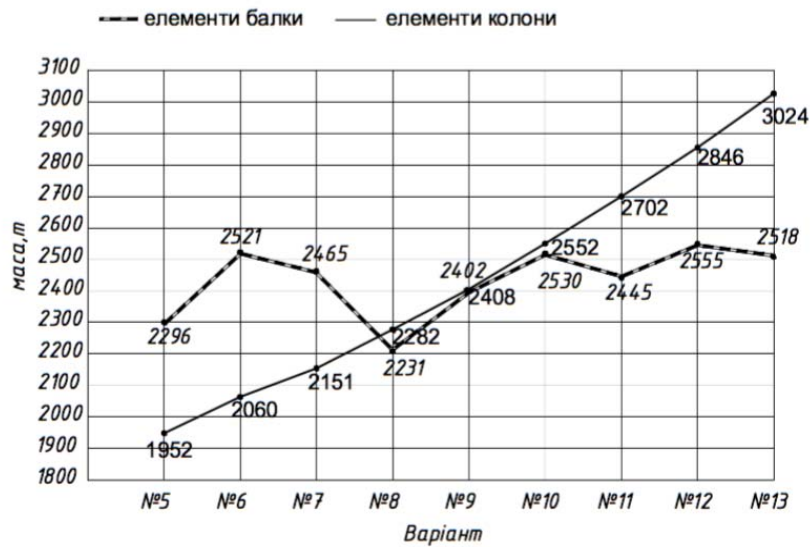


Рис. 5. Залежність маси балок і колон будівлі від кількості кроків колон у межах ядра жорсткості

Висновки

Проміжні результати роботи програмного комплексу підтвердили його придатність до вирішення поставлених задач та достовірність отриманих результатів на тестових прикладах. У подальшому планується розробити кількість конструкційних схем для тестових задач, а також збільшити кількість навантажень до реальних.

У сучасному світі можливості алгоритмічного вирішення зростають експоненціально і випереджають рівень складності прикладних задач. У статті обґрунтовано принципову можливість створення автоматизованого комп'ютерного комплексу для пошуку оптимального (на даному етапі за матеріалоемністю) конструктивного рішення сталюї частини каркасно-стовбурної системи офісної будівлі висотою 100 м з центральним ядром жорсткості. Вибір оптимального рішення за допомогою перспективного програмного забезпечення виконується в термін, що незрівнянно менший за еквівалентний термін при ручному або напівавтоматизованому методах обрахунку, а також може враховувати більшу кількість варіантів, що дає можливість отримати значну економію коштів і часу та прийняти правильне рішення вже на передпроектній стадії. Тематикою подальших досліджень є удосконалення та збільшення кількості вихідних параметрів та простору пошуку можливих рішень у комплексі.

Література

- [1] Khajehpour S. Profitability versus safety of high-rise office buildings. Struct Multidisc Optim 25 / S. Khajehpour, D. E. Grierson. – Ontario (Canada) : Springer-Verlag, 2003. – P. 279–293.
- [2] Гончаренко Д. Ф. Возведение многоэтажных каркасно-монолитных зданий: монография / Д. Ф. Гончаренко, Ю. В. Карпенко, Е. И. Меерсдорф; под ред. Д. Ф. Гончаренко. – К. : Ф + С, 2013. – 128 с.
- [3] Шевченко Е. В. Совершенствование конструкций опор высоковольтных линий электропередачи и создание системы их автоматизированного оптимального проектирования : автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 2000. – С. 5–7.
- [4] Пермяков В. А. Современное состояние проблемы оптимального проектирования стальных конструкций / В. А. Пермяков // Металеві конструкції. – 1998. – № 1. – С. 17–20.
- [5] Зараті А. Багаторівневий еволюційний алгоритм для оптимізації числових функцій / А. Зараті // ІЛЕС 2. – 2011. – С. 419–430.
- [6] Кіркпатрік С. Оптимізація по імітації відпалу / С. Кіркпатрік, С. Д. Желатт, М. П. Веккі // Наука. Нові серії. – 13 травня 1983. – Том 220, № 4598. – С. 671–680.

- [7] Гофф В. Глобальна оптимізація статистичних функцій з використанням методу імітації відпалу / Вільям Гофф, Гері Д. Ферье, Джон Роджерс // Журнал економетрика. – 1994. – Вип. 60. – С 65–99.
- [8] Білик А. Перший Український досвід дослідження вартості комерційних багатоповерхових будинків з бетонним і сталевим каркасом / [А. Білик, Р. Курашов, В. Берган та ін.] // Проектування, виготовлення та економіка металоконструкцій : матеріали Міжнародної конференції; відп. ред. К. Джармай, Дж. Фаркаш (Мішкольц, Угорщина, 24-26 квіт. 2013 р). Спрингер – С. 511–517.
- [9] Билык А. С. Стальные конструкции в архитектуре / А. С. Билык, Р. М. Лоусон // УЦСС. – 2014. – 135 с.
- [10] Білик А. С. Вибір оптимальних рішень сталевих ферм покриттів : автореф. дис... канд. техн. наук. – К., 2009. – 21 с.
- [11] Алгоритмічне моделювання в середовищі rhino 3D : [Електронний ресурс].+2015 – Режим доступу: <http://www.grasshopper3d.com> – Назва з екрана.
- [12] Комерційне програмне забезпечення Rhino 3D : [Електронний ресурс].+2015 – Режим доступу: <https://www.rhino3d.com> – Назва з екрана.
- [13] Програмне забезпечення для статичних та динамічних розрахунків SAP-2000 : [Електронний ресурс].+2015 – Режим доступу: <http://www.csiamerica.com/products/sap2000> – Назва з екрана.
- [14] Tomoko Sakamoto. From Control to Design: Parametric / Tomoko Sakamoto, Albert Ferré //Algorithmic Architecture. – Actar-D, 2008. – 239 p.

Надійшла до редколегії 29.06.2015 р.