УДК 539.3
DOI: 10.32347/0131-579x.2022.3.67-81

д. т. н., професор **Іванченко Г.М.,**
ivgm61@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1172-2845
д. ф. (Ph.D.), доцент **Кошевий О.О.,**
a380982070137@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1903-2905
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИМУШЕНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАННЯ ДВОЗВ'ЯЗНОЇ КОНУСНОЇ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕНІ

Сучасний розвиток техніки приводить до інтенсивного росту статичних і динамічних навантажень, які діють на споруду, деталі машин, приладів, окремих конструкцій і оболонок.

Звичайні методи будівельної і прикладної механіки призначені для визначення характеристик напружено-деформованого стану (зусиль, переміщень і т.д.) різних елементів конструкцій при відомих геометричних параметрів конструкцій і фізико-механічних властивостей матеріалів, із котрих вони виготовлені. Основна ціль при проектуванні як раз і полягає у виборі таких геометричних і фізико-механічних характеристик конструкції, які при заданому навантаженні задовольняли потреби міцності, жорсткості, стійкості та були оптимальними.

В теорії оптимального проектування розглядається задачі визначення форми, розрахункової схеми, внутрішніх властивостей роботи конструкції, в яких виникають екстремуми (мінімум чи максимум) вибраної характеристики конструкції при додатковому обмеженні. Основний етап при вирішенні задачі оптимального проектування деформованих систем – вибір математичної моделі самої системи та моделі її матеріалу. Вирішення математичної моделі зводиться до пошуку невідомого вектора змінних $\bar{X}$*, що визначає геометричні і фізичні характеристики системи, при умові мінімуму цільової функції* $F(\bar{X}) \rightarrow min$

Оптимізаційний розрахунок параметричної оптимізації двозв 'язної конусної оболонки мінімальної поверхні, має такі параметри: цільова функція – вага матеріалу оболонки, змінні проектування від 1 до 200 мм, ліміт представлений у вигляді першої вимушеної частоти коливання 0.40 Гц. Після оптимізаційного розрахунку отримали наступні результати: зменшення ваги оболонки мінімальної поверхні на 25,3%, перерозподіл товщини оболонки від 4.3 мм до 50.2 мм, перша вимушена частота коливання становить 0.4 Гц, що представлено обмеженням.

Методика автора та застосування власного програмного забезпечення дає можливість виконувати ефективний оптимізаційний розрахунок для оболонок мінімальних поверхонь, а застосування двох типів

видів оптимізації на одному об'єкті дослідження є важливою прикладною задачею для будівельної і прикладної механіки.

Ключові слова: оптимізація; параметрична оптимізація; однокритеріальна параметрична оптимізація; вимушені частоти коливань; оптимізація форми; оболонка мінімальної поверхні; цільова функція; вага конструкції; змінні проектування; обмеження; товщина оболонки.

Вступ. Сучасний розвиток техніки приводить до інтенсивного росту статичних і динамічних навантажень, які діють на споруду, деталі машин, приладів, окремих конструкцій та оболонок. В той же час постійний ріст в світі будівництва додають вимог до зниження матеріалоємності і підвищення надійності елементів конструкцій при зберіганні експлуатаційних якостей. Цими питаннями займається наука про оптимальне проектування деформованих систем – на теперішній час один із самих актуальних розділів будівельної і прикладної механіки.

Звичайні методи будівельної і прикладної механіки призначені для визначення характеристик напружено-деформованого стану (зусиль, переміщень і т.д.) різних елементів конструкцій при відомих геометричних параметрах конструкцій і фізико-механічних властивостях матеріалів, із котрих вони виготовлені [1]. Основна ціль при проектуванні як раз і полягає у виборі таких геометричних і фізико-механічних характеристик конструкції, які при заданому навантаженні задовольняли потреби міцності, жорсткості, стійкості та були оптимальними. Саме поняття оптимальності припускає наявність деяких показників (одного або декількох), які дозволяють із множини можливих проектів обрати найкращий. Такими показниками можуть бути вага матеріалу конструкції, її вартість, критичне зусилля, міцність, стійкість, коефіцієнти динамічності. Загальні закономірності оптимальних рішень і методи пошуку вивчаються в теорії оптимального проектування, де виконується пошук максимальних можливостей покращення конструкції, при цьому оцінюється її якість традиційних рішень і відшукуються ефективні способи їх вдосконалення.

Постановка і методи вирішення задач оптимального проектування дуже різноманітні [2-5]. У зв'язку з цим в даній науковій публікації представлені загальні поняття теорії оптимального проектування конструкцій.

Основні поняття теорії оптимального проектування деформованих тіл. В теорії оптимального проектування розглядається задачі визначення форми, розрахункової схеми, внутрішніх властивостей роботи конструкції, в яких виникають екстремуми (мінімум чи максимум) вибраної характеристики конструкції при додаткових обмежень [6].

Перша робота по оптимальному проектуванню деформованих систем виконана Лагранжом більше 200 років тому назад. Він виконав постановку і вирішив методом варіаційного числення задачу про оптимальну колону, яка працювала на стиск. Інтенсивний розвиток теорії оптимального проектування конструкції почалося лиш у другій половині XX століття у зв’язку з розвитком методів математичного програмування і теорії оптимального керування, а також при появі ПК і ЕОМ.

Основний етап при вирішенні задачі оптимального проектування деформованих систем – вибір математичної моделі самої системи і моделі її матеріалу. В залежності від співвідношень загальних геометричних розмірів мова піде про стержньову систему, пластини, або оболонки. Важливим етапом є також вибір моделі матеріалу системи (пружний, пружно-пластичний, жорстко-пластичний і т.д.) Більш того, матеріал може бути ізотропним, ортотропний, або анізотропним. Математична модель конструкції може бути лінійною або геометрично і фізично нелінійною. Значна кількість технічних вимог, яка пред’являється до конструкції, виражається у великої кількості критеріїв оптимальності і обмежень, необхідних при оптимальному проектуванні конструкції, що призводить до великого різноманіття задач оптимального проектування [7].

В процесі оптимального проектування характеристики конструкції зручно представляти у вигляді точки в деякому абстрактному просторі проектуванні. Положення точки в цьому просторі визначається параметрами конструкції і властивості її матеріалу. Параметри проектування можуть бути представлені у вигляді дійсних чисел, функцій, векторів, множина дійсних чисел.

Для повного визначення поняття простору проектування, його опису - перерахуємо параметри, які використовуються у практиці проектувальником для опису конструкції [8].

До першої групи відносяться геометричні параметри:

– функція зміни розмірів поперечного перерізу стержня, стійки, або балки;
– функція зміни товщини диска, пластини, оболонки, форма серединної поверхні оболонки;
– форма границі диска, пластини, оболонки;
– положення в просторі вузлів ферми, або рами;
– конфігурація елементів комбінованої конструкції.

До другої групи відносяться характеристики матеріалу конструкції:

– модуль пружності;
– щільність;
– межа текучості;
– межа міцності;
– коефіцієнти, які визначають закони, за допомогою яких описують пластичну деформацію, пружність і повзучість;
– характеристики армування і т.д.

В якості параметрів проектування є можливість розгляду зусиль попереднього напруження конструкції.

Постановка задачі оптимізації завжди пов’язана із заданням деякого підпростору проектування. Коли конструктор приступає до проектування конструкції, заздалегідь визначає її тип, деякі геометричні розміри і властивості матеріалів, встановлює допустимі межі зміни параметрів проектування.

Підпростір проектування містить проекти конструкції, які можуть не задовольняти множину вимог, необхідної для функціональної придатності конструкції при дії експлуатаційних навантажень. Умови міцності, стійкості, жорсткості, довговічності, і взагалі будь-які обмеження накладені на поведінку конструкції під навантаженням, розглядяться як кордони, які розділяють підпростір проектування на допустимі і недопустимі підпростори.

Теоретичне формулювання однокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі. Задачі оптимального проектування будівельної механіки по своєму задуму схожі до задач математичного програмування з обмеженням у вигляді нерівностей. Їх рішення зводяться до пошуку невідомого вектора змінних $\bar{X}$, що визначає геометричні і фізичні характеристики системи, за умови мінімуму цільової функції $F(\bar{X}) \rightarrow min$. Аналіз багатьох робіт по оптимальному проектуванню в будівельній механіці показує, що основним фактором вибору математичної моделі задачі є прийнятий метод рішення, і тільки в другу чергу вимоги найбільшої відповідності сформульованої моделі своєму фактичному прототипу. Саме цим можна пояснити велике різноманіття моделей і методів вирішення задачі оптимального проектування будівельної механіки [9].

Математичний метод проекції градієнта використовує інформацію тільки перших похідних або градієнту, і полягає в побудові послідовності модифікацій проекту, котрий забезпечує збіжність в точці з мінімальним значенням функції цілі (точці оптимуму), при цьому виконується автоматизований статичний розрахунок:

Знайти такий проект S (вектор $\vec{X}_k$), що

$$\begin{aligned} &h_k(S) = 0 \text{ при } k = 1; 2; \dots\dots\dots k_n \\ &g_j(S) \leq 0 \text{ при } j = 1; 2; \dots\dots\dots j_n \end{aligned} \qquad (1.3)$$

Функція $\varphi(S)$ мінімальна. Через S позначена деяка точка в просторі проектування, яка визначається певними вибраними змінними. В більшості задач умови на функціонали h_k і g_j визначаються обмеженнями на поведінку конструкції під навантаженням, але деякі із них можуть відображати задані розділи підпростору проектування.

Питання в тому, чи має задача рішення визначене в загальному вигляді умови (1.3), залишається відкритим, і тільки в окремих випадках вона може бути вирішена на основі фізичної інтуїції. Теж саме можна сказати і відносно єдиного рішення.

Із (1.3) випливає, що якщо S є оптимальним рішенням, то малі варіації δS всередині підпростору проектування задовольняють вимогам.

$$\begin{aligned} &\delta h_k(S) = 0 && \text{при } k = 1; 2; \dots\dots\dots k_n \\ &\delta g_j(S) \le 0 && \text{для всіх } j, \text{при яких} \\ &\delta g_j(S) \le 0 && g_j(S) = 0 \end{aligned} \qquad (1.4)$$

Це класичне варіаційне формулювання є необхідною умовою оптимального рішення.

Умову (1.4) можна представити в іншій, часто більш в зручній формі. Для простоти припустимо, що змінні проектування визначають N дійних чисел, так, що простір проектування можна представити як N-мірне еквівалентне простору.

Позначимо через S деяке допустиме рішення, а через δS його довільну варіацію в межах підпростору проектування. Якщо $h_k(S) = 0$, то варіації δS перпендикулярні по всім векторам $\nabla h_k(S)(\, k = 1; 2; \dots . k)$, де набла-оператор ∇ означає градієнт. Подібним чином, обмеження у вигляді активних нерівностей $g_j(S) = 0$ потребують, щоб варіація δS не мала компонент в позитивному напрямку $\nabla g_j(S)$

Звідси можна зробити висновок, що для будь-яких дійних чисел $\lambda_k \ge 0$ і $\gamma_j \ge 0$ проекції δS на вектор

$$\sum_{k=1}^{K} \lambda_k \nabla\, h_k(S) + \sum\nolimits_j' \gamma_j \nabla g_j(S) \qquad (1.5)$$

не є позитивними. Символ $\sum_j'$ означає, що сума обмежена лиш тими значеннями j, для котрих $g_j(S) = 0$. Іншими словами, будь-який напрямок, що має компоненту в будь-якому із напрямків (1.5), веде в неприпустимий простір.

Щоб зменшити цільову функцію φ, необхідно рухатися в напрямку, який має будь-яку позитивну компоненту в негативному напрямку $\nabla\varphi$, але якщо цей напрямок $-\nabla\varphi$ є будь-яким із напрямків (1.5), то ніякий рух всередину допустимого простору не зменшить цільової функції. Отже, в будь-якій із оптимальних точок $-\nabla\varphi$ є одним із напрямків (1.5). Використовуючи цю обставину можна зробити висновок, якщо S є оптимальним рішенням, то існує безліч таких дійних чисел $\gamma_j \ge 0$ і додатних чисел λ_k, що

$$-\varphi(S) = \sum_{k=1}^{K} \lambda_k \nabla\, h_k(S) + \sum\nolimits_j' \gamma_j \nabla g_j(S) \qquad (1.6)$$

Формула (1.6) виражає умову оптимізації Куна-Таккера. Коли немає активних обмежень – нерівностей, величина λ_k може інтерпретуватися як множники Лагранжа. Для задачі без обмежень умови Куна-Таккера зводиться к умови $\nabla\varphi = 0$.

Оскільки відношення 1.3, 1.4 задовольняють будь-які стаціонарні рішення, ці умови самі по собі не можуть забезпечити глобальну оптимізацію, але вони створюють основу, на яку будуть посилатися більшість досліджень по оптимальному проектуванню.

Щоб впевнитися в глобальності будь-якого із досягнутих мінімумів, необхідно провести додаткові дослідження. Зокрема, якщо допустимий простір проектування випуклий і якщо цільовий функціонал випуклий або ввігнутий, то деякі теореми нелінійного програмування можуть давати важливу інформацію відносно глобальності, а також про становище можливого рішення.

Якщо цільова функція φ є унімодальною (маючи один екстремум), то пошук оптимального рішення спрощується. Мультимодальні функції можуть мати деякі оптимальні рішення. Для таких функцій глобальне оптимальне рішення надає собою найменше значення $\varphi(S)$, тоді як локальні оптимальні рішення представляють собою найменше значення $\varphi(\vec{X}_k)$ в околиці оптимального проекту S^1. Як для глобального, так і для локального мінімуму $\varphi(S^1) \leq \varphi(S)$, але для глобального оптимального рішення це відношення виконується для всіх $\vec{X}_k$ в E^n, тоді для локального оптимального рішення цей простір має місце тільки для деякої області [10].

На практиці припущення про те, що локальний екстремум є глобальним, може бути перевірено шляхом використання деяких початкових векторів, але якщо знайдено одне найменше локальне рішення, в загальному випадку неможна показати, що це рішення обов'язково є глобальним оптимальним проектом. Як цільова функція є позитивною і володіє єдиним екстремумом. Цей факт встановлюється на основі понять випуклості і ввігнутості функції.

Функція $\varphi\left(\vec{X}_k\right)$ називається випуклою в області R, якщо для любих векторів $\vec{X}_{k1}$ і $\vec{X}_{k2} \in R$

$$\varphi\left(\theta\vec{X}_{k1} + (1-\theta)\vec{X}_{k2}\right) \leq \theta\varphi\left(\vec{X}_{k1}\right) + (1-\theta)\varphi\left(\vec{X}_{k2}\right), \tag{1.7}$$

якщо має місце нерівність, що зворотна (1.7) то функція називаються ввігнутою.

Диференціальна випукла функція володіє наступними властивостями

1. $\varphi\left(\vec{X}_{k2}\right) - \varphi\left(\vec{X}_{k1}\right) \geq \nabla^T\varphi\left(\vec{X}_{k1}\right)\left(\vec{X}_{k2} - \vec{X}_{k1}\right)$; для всіх $\vec{X}_{k1}$ і $\vec{X}_{k2}$
2. Матриця $\frac{\partial\varphi}{\partial x_i \partial x_j}$ (матриця Гессе) позитивно визначена;
3. В області R функція $\varphi\left(\vec{X}_k\right)$ має тільки один екстремум.

Із поняття випуклості витікає важливий результат математичного програмування. Якщо мінімізація функції φ випукла і кожна функція $g_j(\vec{X}_k)$, яка задає обмеження у вигляді нерівності – ввігнута функція, то локальний мінімум є також і глобальним мінімумом. І аналогічно локальний максимум увігнутої функції є глобальним максимумом [5].

Чисельне дослідження однокритеріальної параметричної оптимізації при цільовій функції: вага для двозв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні. Оптимізаційних розрахунок параметричної оптимізації двозв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні має такі параметри: цільова функція – вага матеріалу оболонки, змінні проектування від 1 до 200 мм, ліміт представлений у вигляді першої вимушеної частоти коливання 0.40 Гц. В ході оптимізаційного розрахунку виконується 10 циклів оптимізації, в кожному скінченному елементі на 20 мм., в частинах оболонки, де не потрібно збільшувати товщину, або зменшувати оптимізаційний розрахунок припиняється, при цьому цикли оптимізації пришвидшуються [11]. На рис. 1.1. зображена блок схема, що показує як в деталях іде процес оптимізаційного розрахунку. Побудова розрахункової скінчено-елементної моделі виконується у Femap with Nastran, параметрична оптимізація виконується на розробленому власному оптимізаторі, за допомогою якого процес відбувається в автоматизованому режимі.

Рис 1.1 Блок-схема оптимізації при обмеження вимушених частот коливань

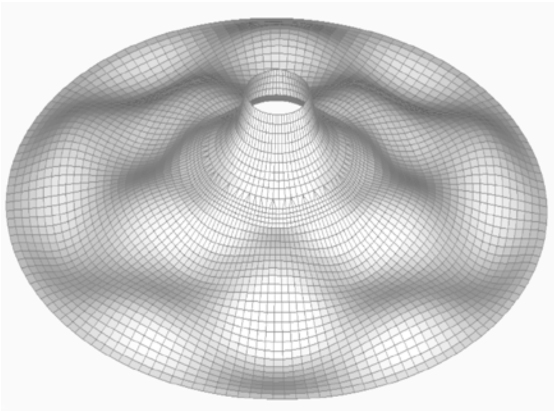

Рис. 1.2 Перша форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.216 Hz

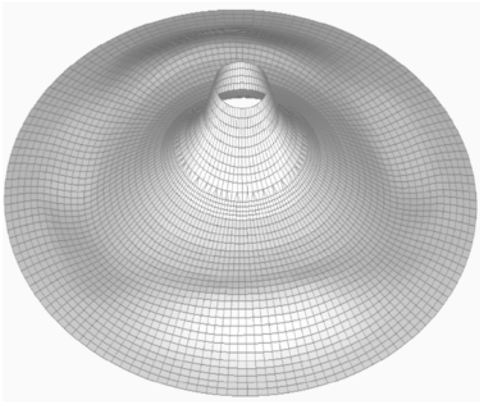

Рис. 1.12 Перша форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.400 Hz

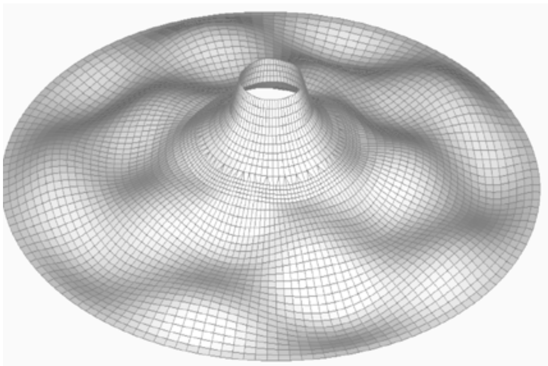

Рис. 1.3 Друга форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.216 Hz

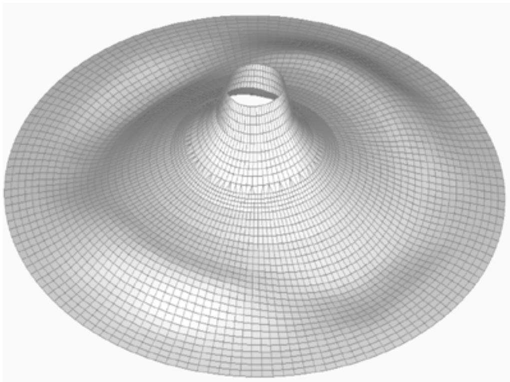

Рис. 1.13 Друга форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.400 Hz

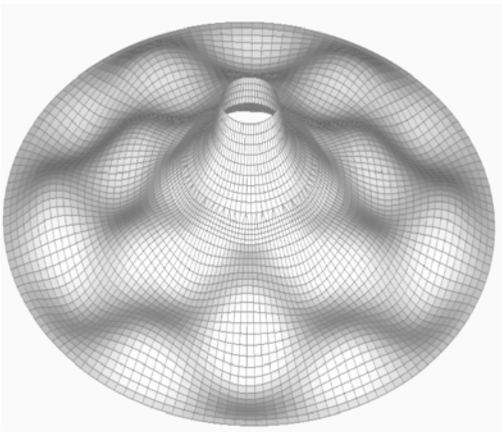

Рис. 1.4 Третя форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.219 Hz

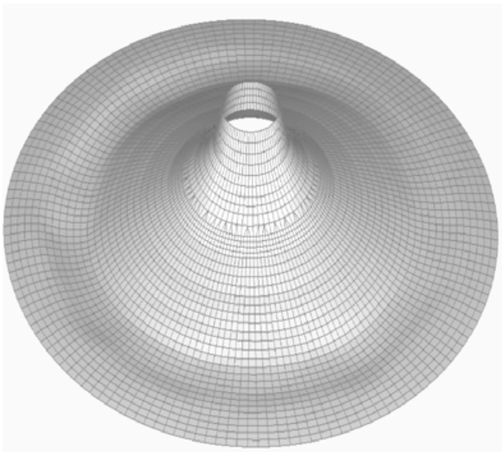

Рис. 1.14 Третя форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.412 Hz

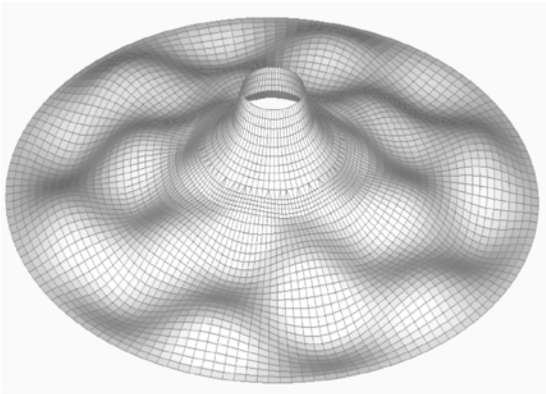

Рис. 1.5 Четверта форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.219 Hz

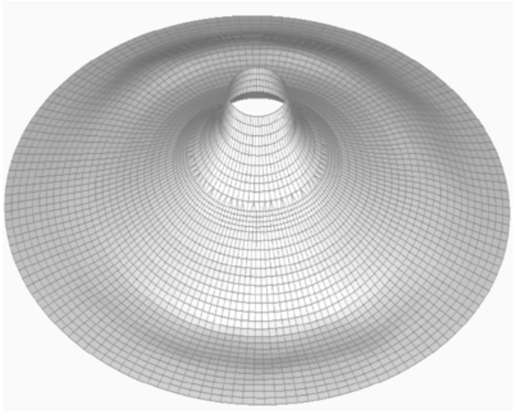

Рис. 1.15 Четверта форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.412 Hz

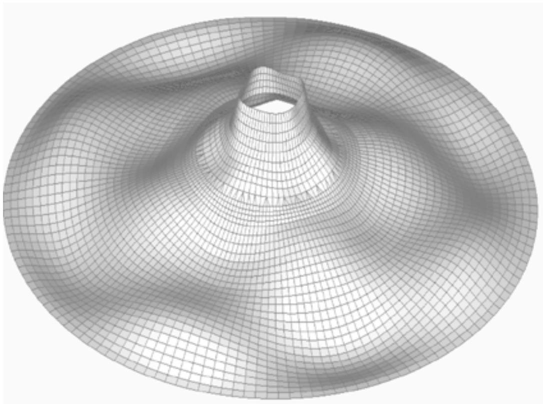

Рис. 1.6 П’ята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.222 Hz

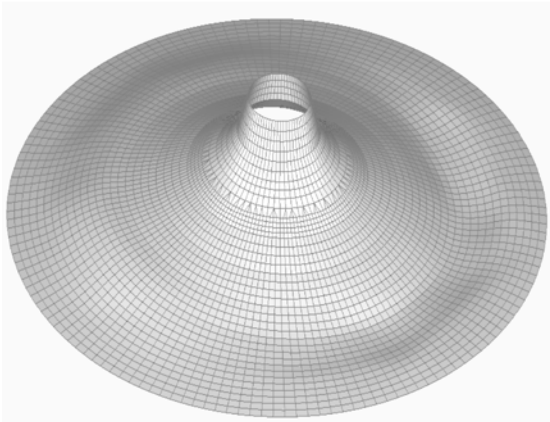

Рис. 1.16 П’ята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.418 Hz

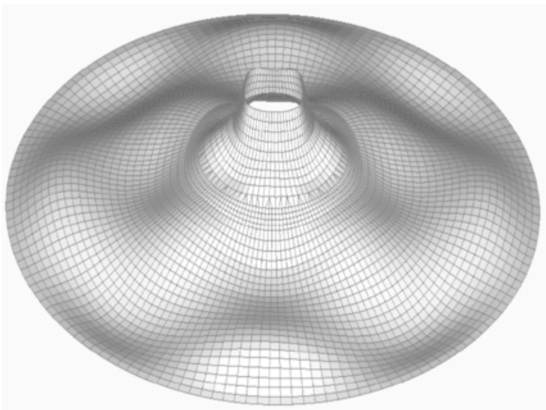

Рис. 1.7 Шоста форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.222 Hz

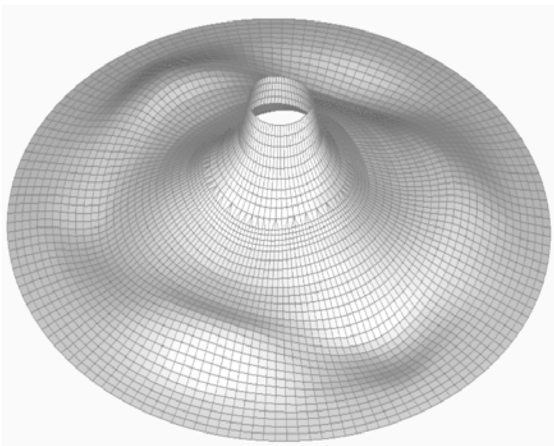

Рис. 1.17 Шоста форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.418 Hz

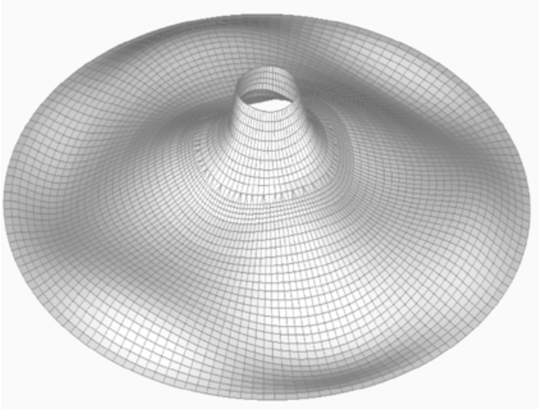

Рис. 1.8 Сьома форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.230 Hz

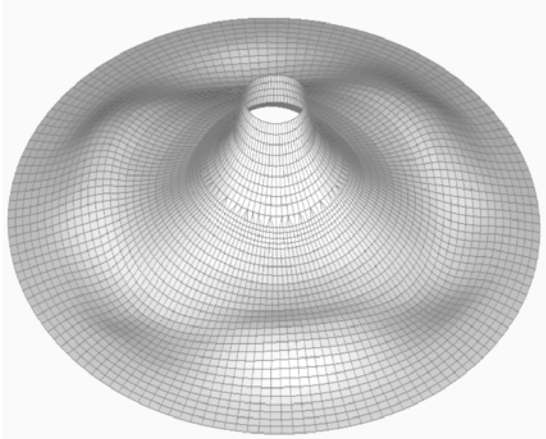

Рис. 1.18 Сьома форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.423 Hz

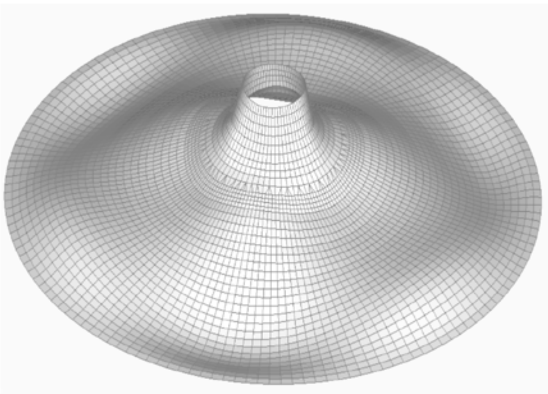

Рис. 1.9 Восьма форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.230 H

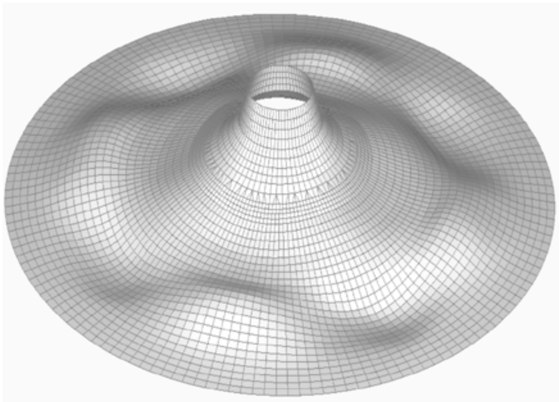

Рис. 1.19 Восьма форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.426 Hz

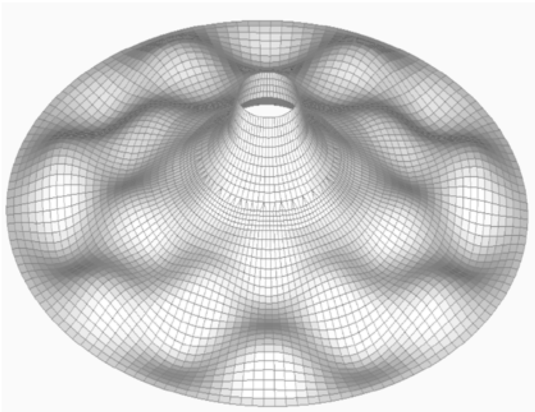

Рис. 1.10 Дев’ята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.236 Hz

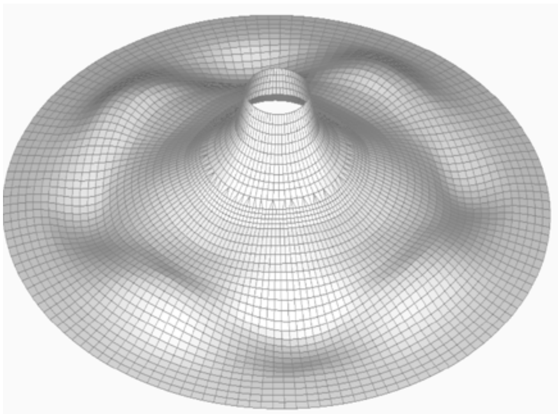

Рис. 1.20 Дев’ята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.432 Hz

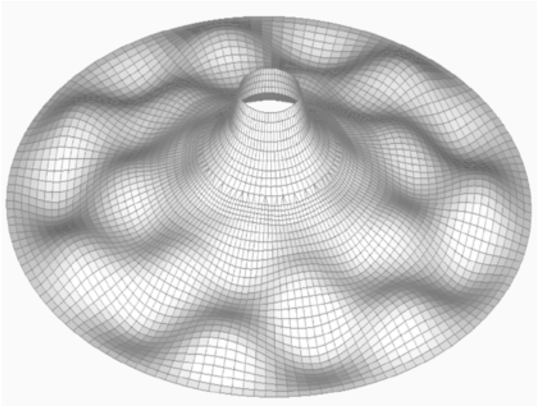

Рис. 1.11 Десята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.236 Hz

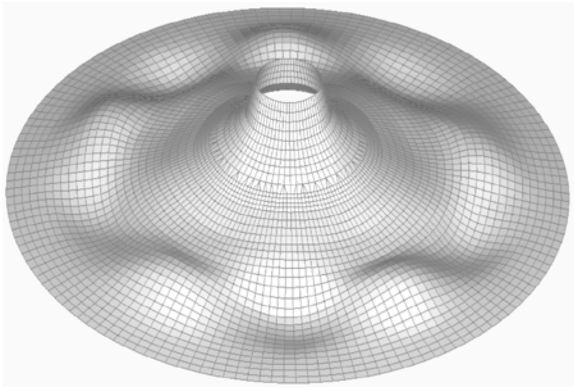

Рис. 1.21 Десята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.448 Hz

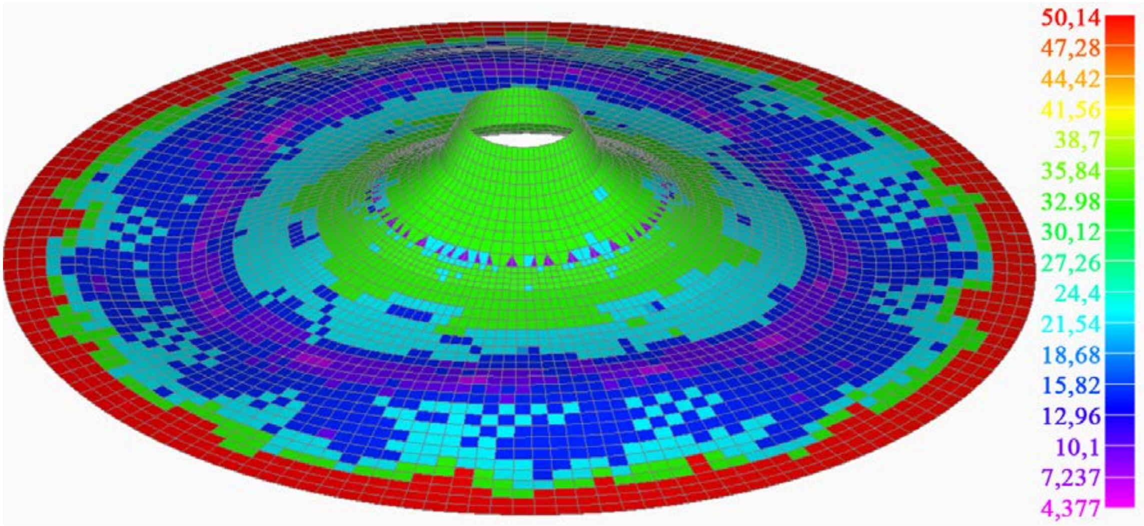

Рис 1.22 Товщина оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі після оптимізації в мм

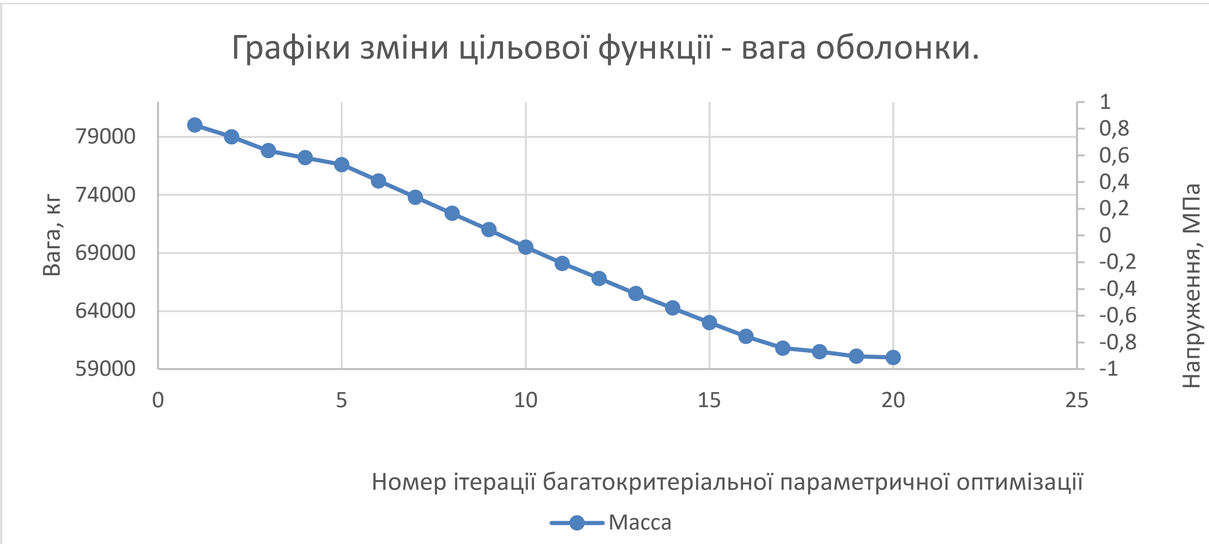

Рис. 1.23 Графік зміни цільових функції: вага по ітераціям однокритеріальної параметричної оптимізації

Результати чисельного експерименту параметричної оптимізації двозв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні. Після проведення чисельного експерименту параметричної оптимізація двозв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні при термосиловому навантаженні маємо наступні результати:

–зменшення ваги оболонки 25.3%, графік зміни цільової функції зображений на рис 1.23;

–перша вимушена частота коливання маємо 0.4 Гц на рис. 1.12, на рис 1.13-1.21 зображено форми і значення частот коливань після оптимізації, а на рис. 1.2-1.10 зображено форми і значення частот коливань до оптимізації;

–розподіл товщини оболонки від 4.3 мм до 50.2 мм зображено на рис. 1.22. після 10 циклів оптимізаційного розрахунку.

Виходячи із результатів чисельного дослідження можемо зробити **загальний висновок**, що методика автора та застосування власного програмного забезпечення дає можливість виконувати ефективний оптимізаційний розрахунок для оболонок мінімальних поверхонь, а застосування двох типів видів оптимізації на одному об'єкті дослідження є важливою прикладною задачею для будівельної і прикладної механіки.

Література

1. *Герасимов, Е.Н., Почтман Ю.М., Скалозуб В.В.* Многокритериальная оптимизация конструкций. Донецк : Вища шк. Главное Изд-во Киев, 1985. 134 с.
2. *Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. Москва : Мир, 1985. 509 с.
3. *Ігнатишин М. І.* Механіко-математичне моделювання елементів мостових конструкцій (опора, балка, плита): монографія. Мукачево : РВВ МДУ, 2017. 172 с.
4. *Кошевий О.О.* Оптимальне проектування циліндричних резервуарів з жорсткими оболонками покриття / *Опір матеріалів і теорія споруд*: наук.-тех. збірник. Київ : КНУБА, 2019. Вип. 103. С. 253-265.
5. *Кошевий О.О.* Оптимізація стального звареного резервуару при обмеженні: напружень, переміщень, власних частот коливання / *Будівельні конструкції.* Теорія і практика: наук.-техн. збірник. Київ : КНУБА. 2018. Вип.3. С.34 – 50.
6. *Кошевий О.О., Кошева І.С.* Багатокритеріальна параметрична оптимізації в парі цільових функцій: вага і переміщення оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі при термосиловому навантажені. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2022. № 49 (1). С. 66-78.
7. *Кошевий О.П. Кошевий О.О.* Чисельне дослідження власних коливань розтягнутих оболонок утворених мінімальними поверхнями /

Містобудування та територіальне планування, Вип. 55. Київ, КНУБА, 2015. С. 215-227.
8. *Кошевий О.П. Кошевий О.О.* Власні коливання оболонок мінімальних поверхонь на круглому та квадратному контурі / *Містобудування та територіальне планування*. Вип. 59. Київ, КНУБА, 2016. С. 234-244.
9. *Кривошапко С.В., Иванов В.Н., Халаби С.М.* Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек. Москва : Наука, 2006. 544 с.
10. *Кошевий О.О., Кошевий О.П., Григор'єва Л.О.* Чисельна реалізація багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі при термосиловому навантаженні / *Опір матеріалів і теорія споруд*: наук.-тех. збірник. Київ.: КНУБА, 2022. Вип. 108. С. 309–324.
11. *Іванченко Г.М., Кошевий О.О.* Чисельне дослідження параметричної оптимізації вимушених частот коливань оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі при термосиловому навантаженні / Міжвідомчий науково-технічний збірник «*Прикладна геометрія та інженерна графіка*». Київ : КНУБА, 2022. Випуск 10. С. 67 – 83.

References

1. *Herasymov, E.N., Pochtman YU.M., Skalozub V.V.* Mnohokryteryal′naya optymyzatsyya konstruktsyy. (Multicriteria optimization of structures) – Donetsk: Vyshcha shk. Hlavnoe Yzd-vo Kyev, 1985. 134 s.
2. *Hyll F., Myurrey U., Rayt M.* Praktycheskaya optymyzatsyya (Practical optimization). Moscow : Myr, 1985. 509 s. {in Russian}
12. 3. Ihnatyshyn M. I. Mekhaniko-matematychne modelyuvannya elementiv mostovykh konstruktsiy (opora, balka, plyta). (Mechanical and mathematical modeling of elements of bridge structures (support, beam, slab)): monohrafiya. Mukachevo: RVV MDU, 2017. 172 s. {in Ukrainian}
13. 4. *Koshevyi O.O.* Optymal′ne proektuvannya tsylindrychnykh rezervuariv z zhorstkymy obolonkamy pokryttya. (Optimal design of cylindrical tanks with rigid coating shells) / Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tekh. Zbirnyk. Kyiv : KNUBA, 2019. Vyp. 103. S. 253-265. {in Ukrainian}
14. 5. *Koshevyi O.O.* Optymizatsiya stal′noho zvarenoho rezervuaru pry obmezhenni: napruzhen′, peremishchen′, vlasnykh chastot kolyvannya. (Optimization of steel welded tank with limitation: stresses, displacements, natural frequencies of oscillations) / Budivel′ni konstruktsiyi. Teoriya i praktyka: nauk.-tekhn. zbirnyk. Kyiv : KNUBA. 2018. Vyp.3. S. 34 – 50. {in Ukrainian}
15. 6. *Koshevyi, O.O., & Kosheva I.S. (2022).* Multicriterial parametric optimization in a pair of target functions: weight and movement of the shell minimum surface on the straight. Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti

budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn, 49 (1), 66-78. {in Ukrainian}
16. 7. *Koshevyi O.P. Koshevyi O.O.* Chysel′ne doslidzhennya vlasnykh kolyvan′ roztyahnutykh obolonok utvorenykh minimal′nymy poverkhnyamy. (Numerical study of natural oscillations of stretched shells formed by minimal surfaces) / Mistobuduvannya ta terytorial′ne planuvannya, Vyp. 55. Kyiv : KNUBA, 2015. s. 215-227. {in Ukrainian}
17. 8. *Koshevyi O.P. Koshevyi O.O.* Vlasni kolyvannya obolonok minimal′nykh poverkhon′ na kruhlomu ta kvadratnomu konturi. (Own oscillations of shells of minimal surfaces on a round and square contour) / Mistobuduvannya ta terytorial′ne planuvannya, Vyp. 59. Kyiv, KNUBA, 2016. s. 234-244. {in Ukrainian}
18. 9. *Kryvoshapko S.V., Yvanov V.N., Khalaby S.M.* Analytycheskye poverkhnosty: materyaly po heometryy 500 poverkhnostey y ynformatsyya k raschetu na prochnost′ tonkykh obolochek. (Analytical surfaces: materials on the geometry of 500 surfaces and information for the calculation of the strength of thin shells). Moscow: Nauka, 2006. 544 s. {in Russian}
19. 10. *Koshevyi O.O., Koshevyi O.P., Grigoryeva L.O.* Numerical implementation of multicriteria parametric optimization of minimum surface shell on a rectangular contour under the rmalloading / *Strength of Materials and Theory of Structures*: Scientific and technical collected articles. Kyiv : KNUBA, 2021. Issue108. P. 309–324. {in Ukrainian}
11. *Ivanchenko H.M., Kosheviy O.O.* Numerical study of the parametric optimization of the forced frequency of oscillations of the minimum surface shell on the square contour under thermal load / Interdepartmental scientific and technical collection "*Applied geometry and engineering graphics*". Kyiv : KNUBA, 2022. Issue 102. P. 67 – 83.

Ph.C., Professor **Ivanchenko H.M.,**
ivgm61@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1172-2845
Ph.D., associate Professor **Kosheviy O.O.,**
a380982070137@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1903-2905
Kyiv National University of Construction and Architecture» (KNUCA)

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF FORCED FREQUENCIES OF OSCILLATION OF A DOUBLE-CONNECTED CONED SHELL OF MINIMUM SURFACE UNDER THERMAL LOADING.

The modern development of technology leads to an intensive growth of static and dynamic loads that act on the structure, machine parts, devices, individual structures and shells.

Conventional methods of construction and applied mechanics are designed to determine the characteristics of the stress-strain state (efforts, displacements, etc.) of various structural elements with known geometric parameters of the *structures and physical and mechanical properties of the materials from which they are made. The main goal in designing is precisely to choose such geometric and physical and mechanical characteristics of the structure, which, under a given load, satisfied the needs of strength, rigidity, and stability, and were optimal.*

In the theory of optimal design, the problem of determining the shape, calculation scheme, and internal properties of the structure is considered, in which extremes (minimum or maximum) of the selected characteristics of the structure occur under additional restrictions. The main stage in solving the problem of optimal design of deformed systems is the choice of a mathematical model of the system itself and a model of its material. The solution of the mathematical model is reduced to the search for the unknown vector of variables $\bar{X}$*, which determines the geometric and physical characteristics of the system, under the condition of the minimum of the target function* $F(\bar{X}) \rightarrow \min$.

The optimization calculation of the parametric optimization of the two-link conical shell of the minimum surface has the following parameters: the objective function is the weight of the shell material, the design variables are from 1 to 200 mm, the limit is presented in the form of the first forced oscillation frequency of 0.40 Hz. After the optimization calculation, the following results were obtained: a reduction in the weight of the minimum surface shell by 25.3%, a redistribution of the shell thickness from 4.3 mm to 50.2 mm, the first forced oscillation frequency is 0.4 Hz, which is represented by the limit.

The author's methodology and the use of his own software make it possible to perform an effective optimization calculation for shells of minimal surfaces, and the use of two types of optimization on one research object is an important applied problem for construction and applied mechanics.

Keywords: optimization; parametric optimization; one-criterion parametric optimization; shape optimization; forced oscillation frequencies; minimal surface shell; objective function; structural weight; design variables; constraints; limit; shell thickness.