УДК 539.3
DOI: 10.32347/0131–579x.2022.102. 67–83

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

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИМУШЕНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ НА КВАДРАТНОМУ КОНТУРІ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕНІ

Оптимальне проектування в прикладній механіки використовується для поліпшення ефективності оболонок мінімальних поверхонь, цей процес виконується до тих пір, коли проект більше не може бути кращим з урахуванням вихідних даних, із застосуванням певного методу оптимізації.

Оптимальне проектування має декілька переваг при проектуванні будівельних конструкцій. Однією із перевал, є процес оптимізації, який забезпечує систематизацію, логічну процедуру проектування оболонок. При вірному використанні алгоритму оптимізації є можливість зменшити вірогідність похибки проектувальника при проектуванні будівельної конструкції. Сучасні методи оптимізації можуть застосовуватися до задач, які мають більше мільйона змінних проектування і обмежень.

Алгоритми оптимізації працюють ефективно, коли в цільовій функції є деяка регулярність, наприклад випуклість чи впадина, тому при виборі алгоритму оптимізації необхідно враховувати їх переваги і недоліки.

При мінімізації цільової функції f_{min} головна задача знайти точку глобального мінімуму, значення $f_{min}(X)$ буде мінімальним, з урахуванням обмежень.

Визначення глобального мінімуму є досить складною задачею. Набагато частіше точка має локальний мінімум, і задача проектувальника дослідити, де точка локального і глобального мінімуму.

Оптимізаційній алгоритм для однокритеріальної параметричної оптимізації виконується наступним чином: цільова функція – вага оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі, змінні проектування – товщина оболонки від 1 до 100 мм, обмеження представлені – перша вимушена частота коливання 0.10 Гц.

Результати зміни цільової функції – зменшення ваги оболонки, що є у відсотковому еквіваленті 9.6% без втрати міцності і стійкості оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі. Перша вимушена частота *коливання після оптимізаційного розрахунку від термосилового навантаження становить 0.10187155 Hz, що фактично представлено обмеженням.*

За допомогою методики автора та власного програмного забезпечення є можливість виконувати ефективний оптимізаційний розрахунок для оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі.

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

Вступ. Оптимальне проектування в прикладній механіки використовується для ефективного проектування оболонок мінімальних поверхонь. Цей процес виконується до тих пір, коли проект більше не може бути кращим, з урахуванням вихідних даних, застосуванням певного методу оптимізації. Інженер, який проектує будівельну конструкцію несе відповідальність за аналіз результатів проведення оптимізації, щоб забезпечити її актуальність при будівництві та експлуатації. Невірні вихідні дані в постановці задачі, некоректний початковий проект, може призвести до неоптимального та не життєздатного будівельного проекту [1, 2].

Оптимальне проектування має декілька переваг при проектуванні будівельних конструкцій. Однією із переваг є те, що процес оптимізації забезпечує систематизацію логічної процедури проектування оболонок. При вірному використанні алгоритму оптимізації є можливість зменшити вірогідність похибки проектувальника в проектуванні будівельної конструкції. Інтуїція в інженерному проектуванні може вести в оману, набагато краще систематизувати і оптимізувати вихідні дані [4]. Оптимізація може пришвидшити процес проектування, особливо коли процедура написана один раз, а потім повторно застосована до інших задач. Традиційні інженерні методи часто візуалізуються і проходять обґрунтування в двох або трьох вимірах. В той же час, сучасні методи оптимізації можуть застосовуватися до задач, які мають більше мільйона змінних проектування і обмежень.

Існує проблема, яка пов’язана з використанням оптимізації для проектування. Обмеження в обчислюваних ресурсах і часу, і тому алгоритми оптимізації повинні бути вибірковими в тому, як вони досліджують простір проектних параметрів. Алгоритми оптимізації обмежені можливістю інженера формулювати задачу. В деяких випадках алгоритми оптимізації можуть використовувати помилки моделювання, щоб знайти рішення, яке не дозволяє адекватно вирішити поставлену задачу. Коли алгоритми оптимізації приводять до оптимального проекту, якій протирічить інтуїції, його можливо буде важко інтерпретувати. Інші обмеження полягають в тому, що в багатьох алгоритмах оптимізації не завжди гарантують отримання оптимального проекту [6].

Загальна задача параметричної оптимізації. Загальна задача параметричної оптимізації описується наступним чином:

$$f_{min}(X). \tag{1}$$

Значення X – представлено як розрахункова точка. Розрахункова точка може бути як векторне значення, яке відповідає різним розрахунковим змінним проектування. Розрахункова точка в n–вимірному просторі записується наступним чином.

$$[X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]. \tag{2}$$

Де X_n – розрахункова точка для оптимального проекту. Елементи в цьому векторі можна регулювати, щоб ***мінімізувати цільову функцію*** f_{min}. Будь-яке значення X із всіх допустимих значень, яке мінімізує цільову функцію, називається вирішенням, або точкою мінімуму. Конкретне вирішення X_n.

Моделювання інженерних задач за допомогою оптимального проектування може бути складною задачею, в залежності від того, як формується задача оптимізації. Це може зробити його легким або складним, в залежності від індивідуальної постановки задачі оптимального проектування будівельної конструкції [7].

Існує багато алгоритмів оптимізації, кожен з них має свої недоліки і переваги. Якщо один алгоритм працює ефективно для одного класу задач, то він може працювати гірше для іншого класу задач. Алгоритми оптимізації працюють ефективно, коли в цільовій функції є деяка регулярність, наприклад випуклість чи впадина, тому при виборі алгоритму оптимізації необхідно враховувати їх переваги і недоліки.

Обмеження. Багато задач мають обмеження. Кожне обмеження виділяє безліч можливих рішень, а в сукупності обмеження визначають допустиму множину X. Допустимі розрахункові точки не порушують будь-яких обмежень.

Обмеження зазвичай описуються знаками $\leq, \geq$ або $=$. Якщо обмеження включають знаки $<, >$, то допустима множина не включає границю обмеження. Потенційна проблема, яка може з’явитися без границі обмеження, не якісний результат, а задача оптимізації не наблизиться до обмеження [8].

Критичні точки. При мінімізації цільової функції f_{min} головна задача знайти точку глобального мінімуму, значення $f_{min}(X)$ буде мінімальним, з урахуванням обмеження. Функція має не більш чим один глобальний мінімум, але точок глобального мінімуму може бути декілька.

Визначення глобального мінімуму є досить складною задачею. Набагато частіше точка має локальний мінімум, і задача проектувальника дослідити, де точки локального і глобального мінімуму. Точка X_n буде локальним мінімумом, якщо існує число $\delta > 0$ таке, що $f_{min}(X^*) \leq f_{min}(X)$ для всіх X, які задовольняються умові $|X - X^*| < \delta$. В багатомірному контексті це визначення зводиться до існуючого числа $\delta > 0$.

В оптимальному проектуванні існують *сильні* і *слабкі* локальні мінімуми. *Точка сильного локального мінімуму*, яка також називається *точкою суворого локального мінімуму* – точка, яка однозначно мінімізує $f_{min}(X)$ в околиці підпростору проектування. *Точка слабкого локального мінімуму* – точка, яка не є точкою сильного локального мінімуму, на графіку цільової функції не буде зміни цільової функції [9-10].

В усіх точках глобального і локального мінімумів похідна неперервної необмежної цільової функції дорівнює нулю. Рівність похідної нулю – необхідна, але не є умовою для локального мінімуму. На графіку цільової функції *точка перегину*, де друга похідна дорівнює нулю, але ця точка може не бути точкою локального мінімуму функції f_{min}. *Точка перегину* – це місце, де змінюється знак другої похідної функції f_{min}, що відповідає локальному мінімуму чи максимуму її першої похідної f_{min}. Похідна в точці перегину не обов'язково дорівняє нулю.

Умови локального мінімуму. Багато методів чисельної оптимізації шукають локальні мінімуми. Локальні мінімуми, локально оптимальні, але потрібно досліджувати, чи це локальний, чи глобальний мінімум. Умови для локального мінімуму припускають, що цільова функція може далі диференціюватися. Похідні та градієнти також далі можуть диференціюватися.

Теоретичне формулювання однокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі. Задачі оптимального проектування в будівельній механіці по своєму задуму схожі до задач математичного програмування з обмеженням у вигляді нерівностей. Їх рішення зводиться до пошуку невідомого вектора змінних $\bar{X}$, що визначає геометричні і фізичні характеристики системи, при умові мінімуму цільової функції $F(\bar{X}) \rightarrow min$. 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 в будівельній механіці.

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

$$h_k(S) = 0 \text{ при } k = 1; 2; \dots \dots \dots k_n$$
$$g_j(S) \leq 0 \text{ при } j = 1; 2; \dots \dots \dots j_n \qquad (3)$$

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

$$\delta h_k(S) = 0 \qquad \text{при } k = 1; 2; \dots \dots \dots k_n$$
$$\delta g_j(S) \leq 0 \qquad \text{для всіх } j, \text{ при яких}$$
$$\delta g_j(S) \leq 0 \qquad g_j(S) = 0 \qquad (4)$$

Це класичне варіаційне формулювання є необхідною умовою оптимального рішення.

Умову (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 $\lambda_k \geq 0$ і $\gamma_j \geq 0$ проекції δS на вектор

$$\sum_{k=1}^{K} \lambda_k \nabla\, h_k(S) + \sum_j' \gamma_j \nabla g_j(S) \qquad (5)$$

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 (5), то ніякий рух всередину допустимого простору не зменшить цільової функції. Отже, в будь-якій із оптимальних точок $-\nabla\varphi$ є одним із напрямків (5). Використовуючи цю обставину можна зробити висновок, якщо S є оптимальним рішенням, то існує безліч таких дійних чисел $\gamma_j \geq 0$ і додатних чисел λ_k, що

$$-\varphi(S) = \sum_{k=1}^{K} \lambda_k \nabla\, h_k(S) + \sum_j' \gamma_j \nabla g_j(S) \quad (6)$$

Формула (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 (3), (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.

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 вігнутості функції.

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

$$\varphi(\theta\vec{X}_{k1} + (1-\theta)\vec{X}_{k2}) \leq \theta\varphi(\vec{X}_{k1}) + (1-\theta)\varphi(\vec{X}_{k2}), \quad (7)$$

якщо має місце нерівність, що зворотна (7) то функція називаються ввігнутою.

Диференціальна випукла функція володіє наступними властивостями

1. $\varphi(\vec{X}_{k2}) - \varphi(\vec{X}_{k1}) \geq \nabla^T\varphi(\vec{X}_{k1})(\vec{X}_{k2} - \vec{X}_{k1})$; 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 $\varphi(\vec{X}_k)$ 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 оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі. Оптимізаційний алгоритм для однокритеріальної параметричної оптимізації виконується наступним чином: цільова функція – вага оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі, змінні проектування – товщина оболонки від 1 до 100 мм, обмеження представлені – перша вимушена частота коливання 0.10 Гц. В ході розв’язання задачі параметричної оптимізації, де обмеженням є перша вимушена частота коливання, щоб запобігти резонансу, знаходимо оптимум конструкції в ході мінімізації або максимізації цільової функції. На рис. 1.1. зображена блок схема, що показує як в деталях іде процес оптимізаційного розрахунку. Під час процесу однокритеріальної параметричної оптимізації використовується власне програмне забезпечення, в якому виконується побудова геометрії оболонки мінімальної поверхні на власному програмному забезпеченні, а потім переноситься на Femap with Nastran в автоматизованому режимі, де в подальшому виконується побудова скінчено-елементної моделі [3] і задання термосилового навантаження. Між програмним забезпеченням та програмним комплексом Femap with Nastran створені перехідні модулі для того, щоб цей процес виконувався **в автоматизованому режимі**.

Рис 1.1 Блок-схема оптимізації при обмеження вимушених частот коливань.

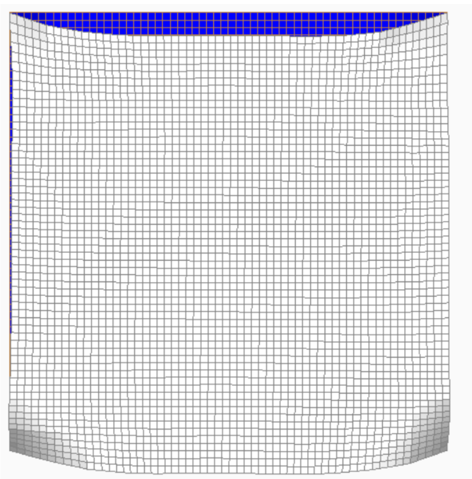

Рис. 1.2 Перша форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.267193 Hz

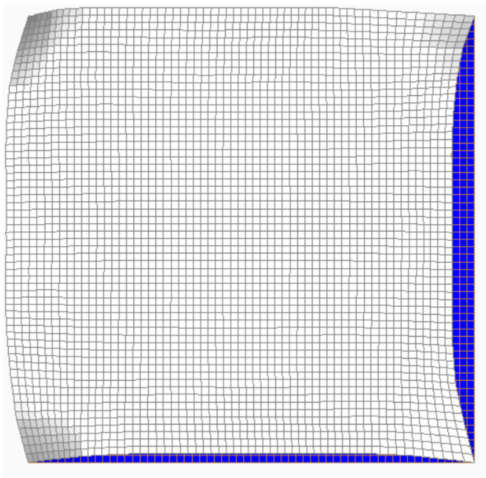

Рис. 1.12 Перша форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.10187155 Hz

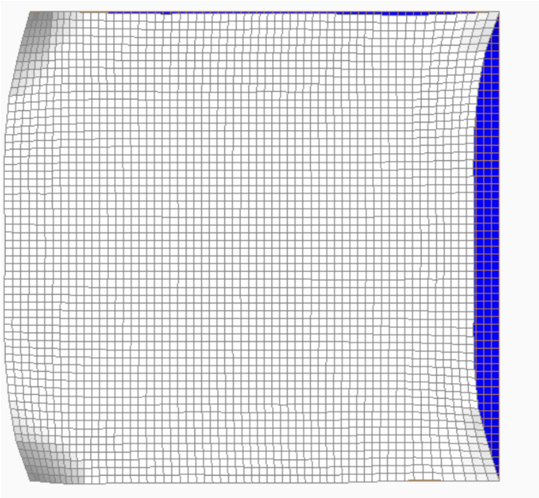

Рис. 1.3 Друга форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.271914 Hz

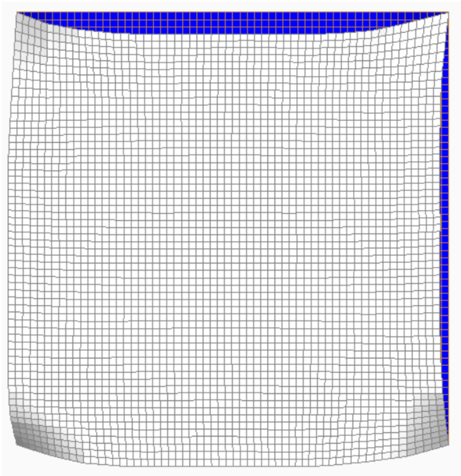

Рис. 1.13 Друга форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.1218716 Hz

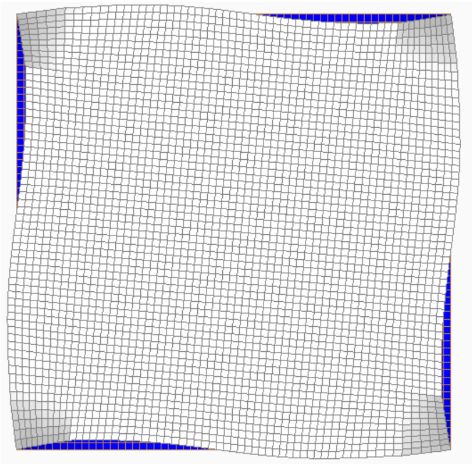

Рис. 1.4 Третя форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.273027 Hz

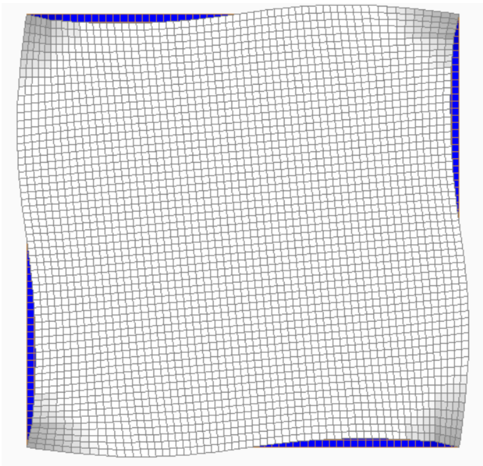

Рис. 1.14 Третя форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.125049 Hz

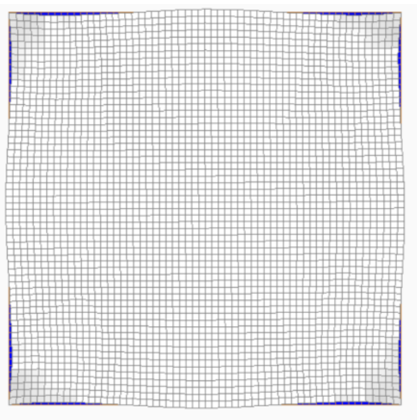

Рис. 1.5 Четверта форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.274109 Hz

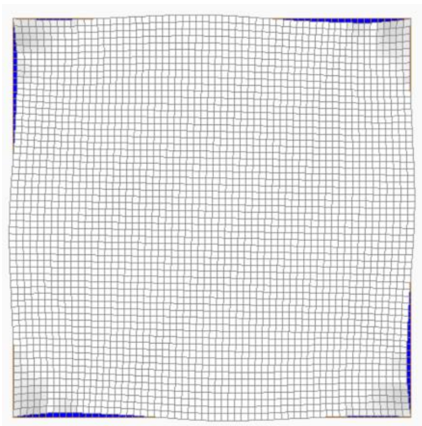

Рис. 1.15 Четверта форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.1285752 Hz

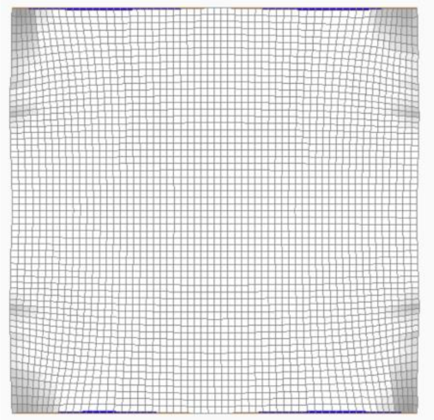

Рис. 1.6 П’ята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.30913 Hz

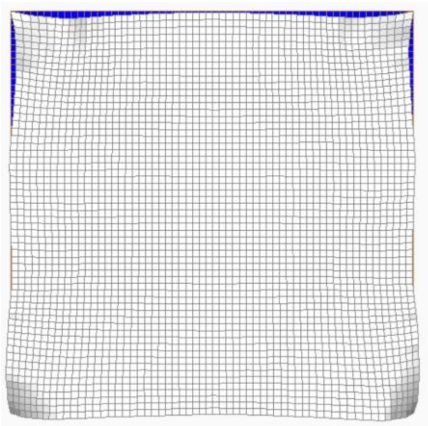

Рис. 1.7 Шоста форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.315825 Hz

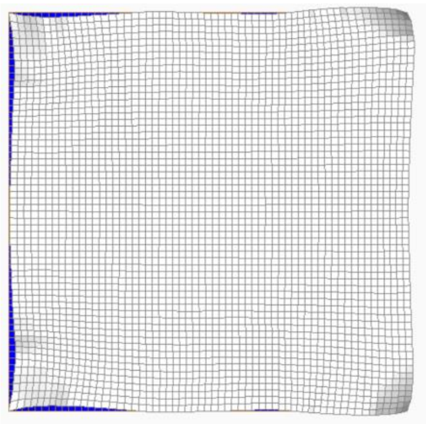

Рис. 1.8 Сьома форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.326997 Hz

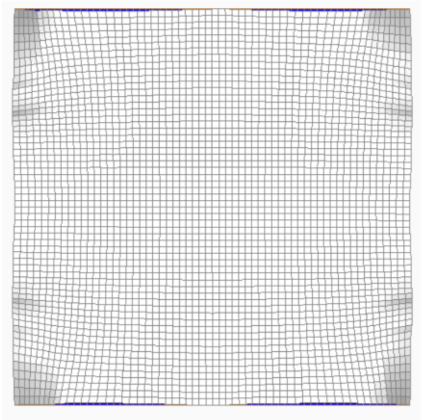

Рис. 1.16 П’ята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.1594682 Hz

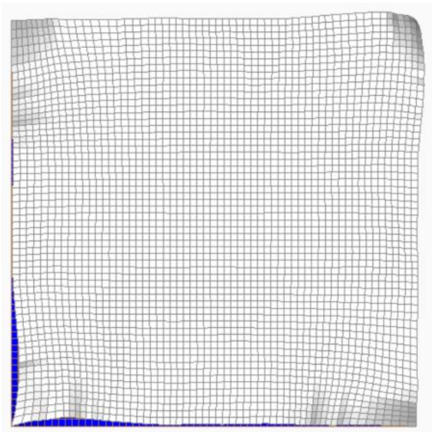

Рис. 1.17 Шоста форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.1649846 Hz

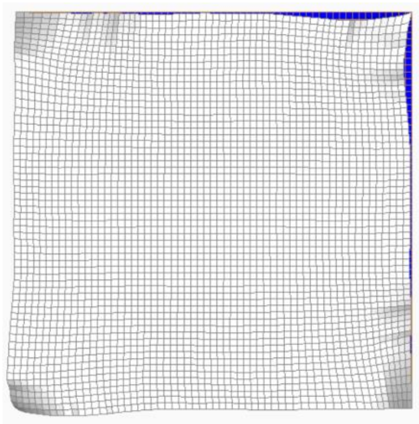

Рис. 1.18 Сьома форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.1649983 Hz

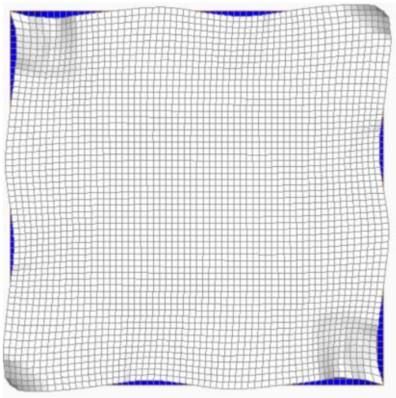

Рис. 1.9 Восьма форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.342969 H

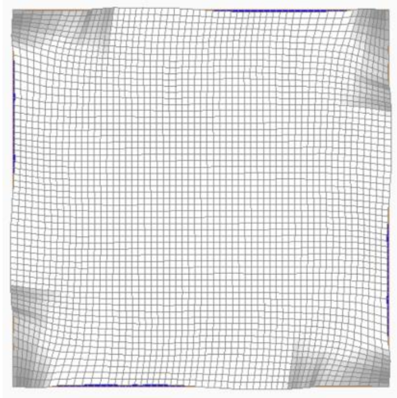

Рис. 1.19 Восьма форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.207737 Hz

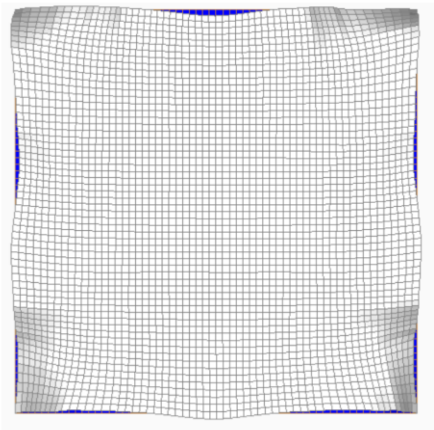

Рис. 1.10 Дев’ята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.383181 Hz

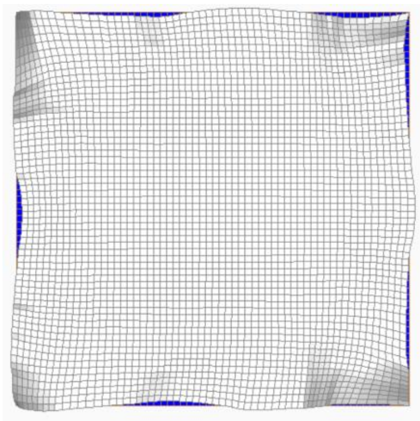

Рис. 1.20 Дев’ята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.2113396 Hz

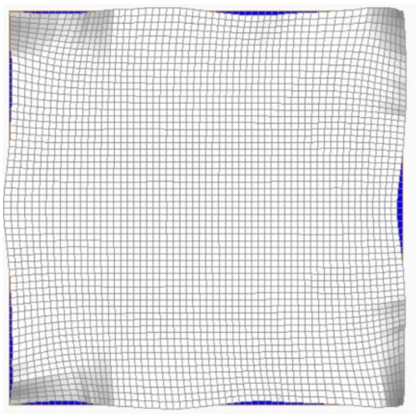

Рис. 1.11 Десята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.52364 Hz

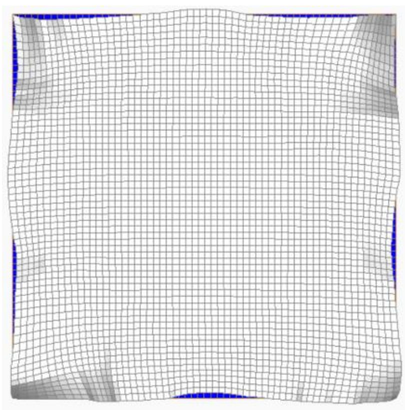

Рис. 1.21 Десята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.2213452 Hz

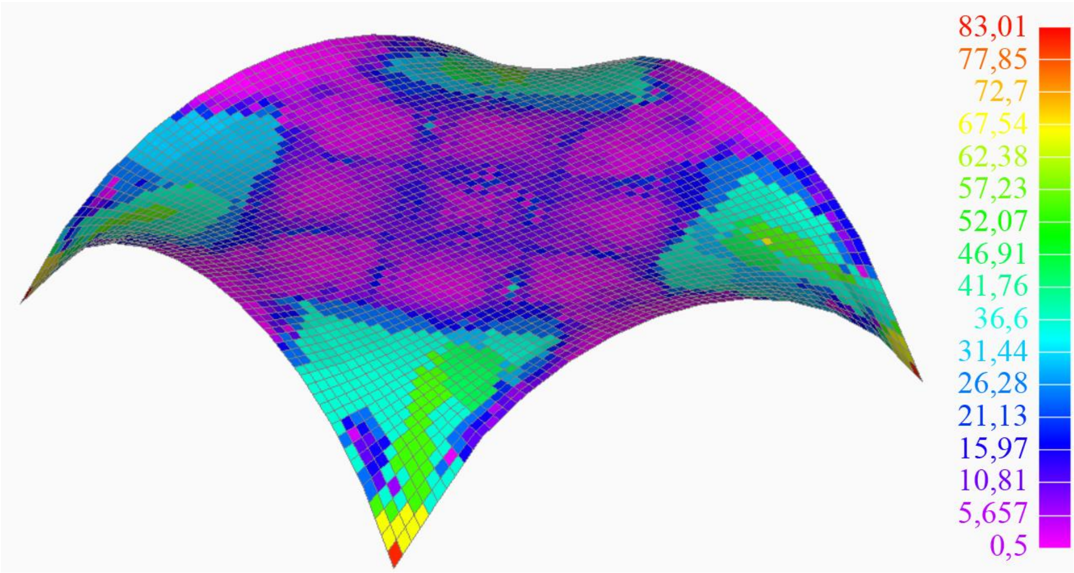

Рис 1.22 Товщина оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі після оптимізації в мм.

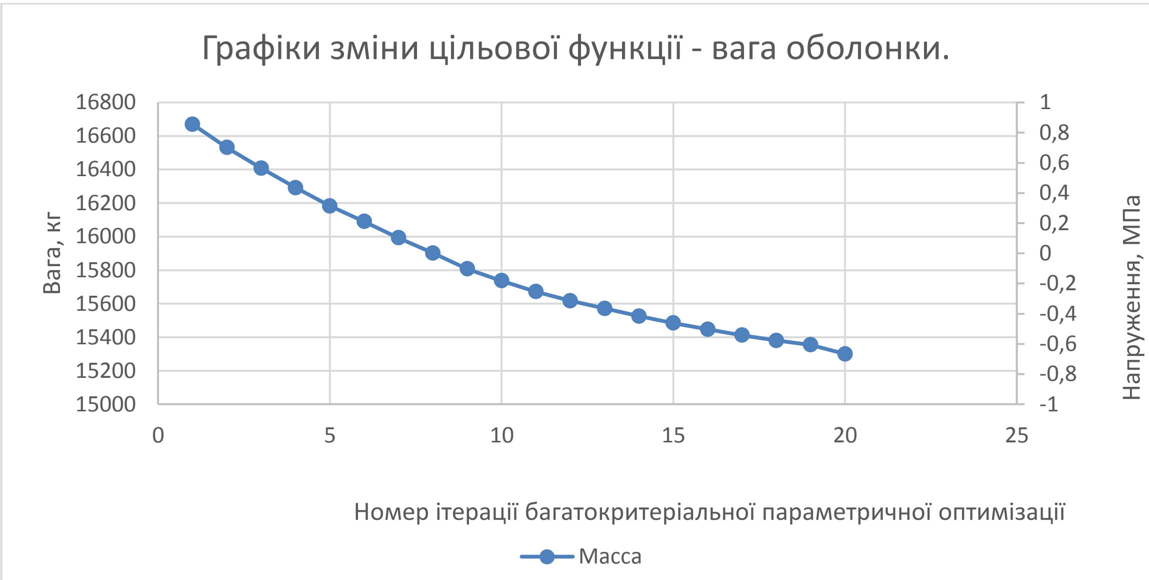

Рис. 1.23 Графік зміни цільових функції: вага по ітераціям однокритеріальної параметричної оптимізації.

Результати чисельних досліджень оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі. За допомогою програмного комплексу Femap with Nastran і власного програмного забезпечення побудовано і виконано дослідження однокритеріальної параметричної оптимізації. Результати зміни цільової функції – зменшення ваги оболонки на 1370 кг сталі С240, що є у відсотковому еквіваленті 9.6% без втрати міцності і стійкості оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі. Графік зміни цільової функції зображений на рис 1.23. Представлені 10 форм і частот коливання оболонки, до, і після оптимізаційного розрахунку рис. 1.2-1.21 . Перша вимушена частота коливання після оптимізаційного розрахунку від термосилового навантаження становить 0.10187155 Hz, що фактично представлено обмеженням. Розподілення товщини оболонки зображено на рис 1.22, що коливається від 83 мм до 1 мм.

Загальний висновок. За допомогою методики автора та власного програмного забезпечення є можливість виконувати ефективний оптимізаційний розрахунок для оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі. 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.

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). M.: Myr, 1985. 509 s.
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.
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.
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.
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.
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. Kyyiv, KNUBA, 2015. S. 215-227.
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. Kyyiv, KNUBA, 2016. S. 234-244
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). M.: Nauka, 2006. 544 s.

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-andtechnicalcollectedarticles. Kyiv: KNUBA, 2021. Issue108. P. 309–324.

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)

NUMERICAL STUDY OF THE PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE FORCED FREQUENCY OF OSCILLATIONS OF THE MINIMUM SURFACE SHELL ON THE SQUARE CONTOUR UNDER THERMAL LOAD

The optimal design in applied mechanics is used to improve the efficiency of minimal surface shells, this process is carried out until the design can no longer be better given the input data, using a certain optimization method.

It has several advantages while building structures are designing. One of the passes is the optimization process, which provides a systematization, a logical procedure for the design of shells. With the correct use of the optimization algorithm, it is possible to reduce the probability of a designer's mistake. Modern optimization methods can be applied to problems that have more than a million design variables and constraints.

Optimization algorithms work effectively when there is some regularity in the objective function, such as a convexity or a depression, so when choosing an optimization algorithm, it is necessary to consider their advantages and disadvantages.

While minimizing the objective function f_{min}*, the main task is to find the point of the global minimum, the value of* f_{min} *(X) will be minimal, taking into account the restrictions.*

Determining the global minimum is quite a difficult task. Much more often, a point has a local minimum, and the task of the designer is to investigate where the point of the local and global minimum is.

The optimization algorithm for single-criteria parametric optimization is performed as follows: the objective function is the weight of the shell of the minimum surface on the square contour, the design variables are the shell thickness from 1 to 100 mm, the constraints are presented - the first forced oscillation frequency is 0.10 Hz.

The results of changing the objective function are reduction in the weight of the shell, which is in the percentage equivalent of 9.6% without losing the strength and stability of the minimum surface shell on the square contour. The first forced oscillation frequency after the optimization calculation from the

thermoforce load is 0.10187155 Hz, which is actually represented by the limitation.

Using the author's methodology and software, it is possible to perform an effective optimization calculation of the minimum surface shell on the square contour.

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.

д. т. н., профессор **Иванченко Г.М.,**
ivgm61@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1172-2845
д. ф. (Ph.D.), доцент **Кошевой А.А.,**
a380982070137@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1903-2905
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ЧИСЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫНУЖДЕНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧКИ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КВАДРАТНОМ КОНТУРЕ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Оптимальное проектирование в прикладной механики используется для улучшения эффективности оболочек минимальных поверхностей, этот процесс используется до тех пор, когда проект оптимизации больше не может быть лучшим с учетом входной информации и при использовании определенного метода оптимизации.

Оптимальное проектирование имеет несколько преимуществ при проектирование строительных конструкций. Одним из преимуществ, имеет процесс оптимизации, который обеспечивает систематизацию, логичную процедуру проектирование оболочек. При правильно использование алгоритма оптимизации есть возможность уменьшить вероятность ошибки проектировщика при проектирование строительной конструкции.

Современные методы оптимизации могут использоваться к задачам, какие имеют больше миллиона переменных проектирование и ограничений.

Алгоритмы оптимизации работают эффективно, когда в целевой функции существует определенная регулярность, например, выпуклость или впадина, потому при выборе алгоритма оптимизации необходимо учитывать их преимущества и недостатки.

При минимизации целевой функции f_{min} главная задача найти точку глобального минимума, значения $f_{min}(X)$ будет минимальным, с учетом ограничения.

Определение глобального минимума является довольно сложной задачей. Намного чаще точки имеет локальный минимум, и задача проектировщика исследовать, где точка локального и глобального минимума.

Оптимизационный алгоритм для однокритериальной параметрической оптимизации используется следующим образом: целевая функция – вес оболочки минимальной поверхности на квадратном контуре, переменные проектирование – толщина оболочки от 1 до 100 мм, ограничение представлены – первая вынужденная частота колебаний 0.1 Гц.

Результаты изменения целевой функции – уменьшения веса оболочки, что в процентном соотношении 9.6% без потери прочности и устойчивости оболочки минимальной поверхности на квадратном контуре. Первая вынужденная частота колебания после оптимизационного расчета от термосиловой нагрузке является 0.10187155 Hz, что фактически представлено ограничением.

С помощью методики автора и собственного программного обеспечения есть возможность использовать эффективный оптимизационный расчет для оболочки минимальной поверхности на квадратном контуре.

Ключевые слова: оптимизация; параметрическая оптимизация; однокритериальная параметрическая оптимизация; оптимизация формы; вынужденные частоты колебания; оболочка минимальной поверхности; целевая функция; вес конструкции; переменные проектирование; ограничение; толщина оболочки.