DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51.218-233

УДК 539.3

Г.М. Іванченко,
докт. техн. наук, професор
ORCID: 0000-0003-1172-2845
О.О. Кошевий,
доктор філософії (PhD), доцент
ORCID: 0000-0002-1903-2905
І.В. Жупаненко,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6167-6552
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ВИМУШЕНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАННЯ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ НА КРУГЛОМУ КОНТУРІ, ЯКА СКЛАДАЄТЬСЯ ІЗ ДВОХ ПОХИЛИХ ЕЛІПСІВ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Проблема вибору оптимального проектного рішення є багатоцільовою комплексною задачею, рішення якої потребує врахування широкого набору вимог до різних етапів реалізації. Можна виділити декілька рівнів вирішення задач оптимального проектування. На першому рівні мова піде про загальні проектні моделі, включаючи основні конструктивні елементи з врахуванням фізичних і геометричних особливостей їх поведінки. Цей рівень можна назвати “глобальним” рівнем оптимізації. В силу того, що автоматизований розрахунок споруд неможливий без використання скінчено-елементних моделей, а на наступному “детальному” рівні об’єктами оптимізації можуть бути параметри, які входять в склад цієї моделі (координати вузлів, фізичні і геометричні властивості окремих елементів та ін.).

Вибір скінчено-елементної моделі при оптимальному проектуванні напряму пов’язано з трудомісткістю (можливостю реалізації на ЕОМ) задачі оптимального проектування. Для зменшення обчислюваних процедур, які пов’язані з вирішенням задачі чисельного аналізу, може бути використаний підхід на основі апроксимації параметрів системи (переміщення, зусиль, частот, форм коливань і т.д.).

Вирішення задачі вимушених коливань для оболонок мінімальних поверхонь виконується за допомогою методу скінчених елементів з використанням варіаційного принципу Лагранжа. Потенціальна і кінетична енергії деформації оболонки мінімальної поверхні в матричному вигляді визначається як сума потенційних і кінетичних енергій кожного скінченого елемента.

Оптимізаційній алгоритм для однокритеріальної параметричної оптимізації виконується наступним чином: цільова функція – вага оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка складається із двох похилих еліпсів, змінні проектування – товщина оболонки, обмеження представлені – перша вимушена частота коливання. Результати зміни цільової функції – зменшення ваги оболонки на 3050 кг сталі С240, що є у відсотковому еквіваленті 13.4% без втрати міцності і стійкості оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка *складається із двох похилих еліпсів, що доводить ефективність методики авторів.*

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. Проблема вибору оптимального проектного рішення є багатоцільовою комплексною задачею, рішення якої потребує врахування широкого набору вимог до різних етапів реалізації. Початком чисельної оптимізації приходить на 60-70 ті роки ХХ століття. В цей період відмічена велика кількість досліджень, в яких розглядається самі різні підходи до вирішення задач оптимізації окремих конструктивних елементів, а також складних конструкцій в статичній і динамічній постановці. При цьому розробка теоретичної бази супроводжувалась відповідним програмно-аналітичною реалізацією високоефективних алгоритмів і програм оптимізації інженерних об’єктів, яка до теперішнього часу є одним із актуальних напрямків сучасного проектування.

Великий вклад в становлення і розвитку теорії оптимізації внесли вітчизняні і закордонні вчені [1-2]: Н.П. Абовський, І.О. Адамович, Н.В. Банічук, В.А. Пермяков, С.І. Білик, В.І. Гуляєв, А.І. Богатирьов, В.А. Бунаков, В.А. Баженов, А.І. Віноградов, М.І. Волинський, Е.Н. Герасимов, В.Н. Гордеев, В.В. Васильов, В.П. Валуйський, Г.І. Гребенюк, Ю.В. Немировський, А.В. Перельмутер, В.М. Почтман, В.В. Трофимович, І.М. Рабінович, О.О. Чирас, Я. Арора, Л. Берки, Г. Вандерплавац, Е. Васютиський, В. Венекайя, Г.М. Доббс, О. Зенкевич, В. Комков, З. Мруз, Н Ольхофф, В Прагер, Р. Разани, Г. Розвані, К. Флері, Р. Фокс, Р. Хафтка, Е Хот, Л. Шміт, К. Чой і багато інших.

Можна виділити декілька рівнів вирішення задач оптимізації. На першому рівні мова піде про загальні проектні моделі, включаючи основні конструктивні елементи з врахуванням фізичних і геометричних особливостей їх поведінки. Цей рівень можна назвати “глобальним” рівнем оптимізації. В силу того, що автоматизований розрахунок споруд неможливий без використання скінчено-елементних моделей, а на наступному “детальному” рівні об’єктами оптимізації можуть бути параметри, які входять в склад цієї моделі (координати вузлів, фізичні і геометричні властивості окремих елементів та ін.). Таким чином, алгоритми чисельної оптимізації конструкції в рівній степені базуються як на методах оптимізації (або синтезу), так і на методах розрахунку (аналізу).

Інтенсивний розвиток чисельних методів статичного і динамічного скінчено-елементного аналізу приходиться на другу поливну ХХ століття. Кожний новий ступінь дослідження супроводжувалася розробкою відповідного програмного забезпечення. Ефективність того або іншого методу оцінювалася саме з точки зору його програмного реалізації. Поєднання чисельних методів аналізу і синтезу дозволило отримати якісні нові алгоритми, які дозволяють підбирати оптимальні параметри самої конструкції в автоматизованому режимі.

Вибір скінчено-елементної моделі напряму пов’язано з трудомісткістю (можливостю реалізації на ЕОМ) задачі оптимального проектування. Алгоритми оптимізації потребують многократного рішення задачі скінчено-елементного аналізу, яка для складних “великогабаритних” споруд сама по собі потребує великих обчислюваних ресурсів. Складні споруди, які включають тисячі скінченних елементів, можуть мати велику кількість змінних проектування (які варіюються в процесі оптимізації), так і потреб у вигляді умов міцності, стійкості, жорсткості і т.д. Можливість сучасних ПК підвищилися в сотні разів, але питання про створення алгоритмів оптимізації є актуальними, які з одного боку дозволяють використовувати моделі близькі до реального життя, а з іншою – давали можливість отримання якісних результатів за відносно невеликий час роботи. Найбільш ефективно подібна задача вирішується для стержньових конструкцій в лінійному статичному навантажені, але для оболонок, ще не досить детально вивчено, особливо коли на одному досліджуваному об'єктів використовуються декілька видів оптимізації.

Для стержньових конструкцій можливе рішення без великих спрощень навіть для великої розмірності. Це пов'язано, що алгоритми скінченого-елементного аналізу в цьому випадку працюють достатньо швидко без втрат точності і якості розрахунку. Оптимізація пластин і оболонок пов'язана з великими труднощами, які напряму залежать від вибору скінчено-елементної моделі цих конструкцій. Якісний ефект може дати використання скінчених елементів певних типів, які дозволяють отримати якісне рішення без густої сітки з достатньою точністю і якістю чисельного аналізу. Число невідомих може бути зменшено за рахунок використання змішаних постановок. Всі ці підходи потребують необхідних знань та досвіду для побудови скінчено-елементної моделі і алгоритмів на її основі.

Для зменшення обчислюваних процедур, які пов'язані з вирішенням задачі чисельного аналізу, може бути використаний підхід на основі апроксимації параметрів системи (переміщення, зусиль, частот, форм коливань і т.д.) коли задача скінчено-елементного аналізу вирішується на зовнішніх ітераціях алгоритму оптимізації, а пошук оптимальних рішень виконується для задачі приблизної точністю. Певний ефект може мати така процедура для відбору обмежень, яка попередньо призначена, послідуючим врахування тільки тих обмежень, які попали в цей діапазон. Однак такий прийом приймається тільки на останніх ітераціях пошукового алгоритму оптимізації, коли зміна параметрів проектування не приводить до якісної зміни обмежень, близьким до критичних. Рекомендації до оптимального проектування складних конструкцій досить велика кількість [3-4]. Найбільш відомими є підходи, як декомпозиція (розбиття вихідної задачі на ряд незалежних задач меншої розмірності) і агрегування (заміна певної групи змінних проекту одної змінної, називається агрегатом). Отримана таким чином ієрархічна схема припускає, що рішення загальної задачі залежить від декількох підпорядкованих задач другого рівня, кожна із них, в свою чергу залежить від задач третього рівня. Для прикладу, на глобальному рівні оптимізуються топологія розрахункової схеми, яка враховує обмеження по жорсткості, загальної стійкості, частоти вимушених коливань. Детальний рівень прискає врахування обмежень для окремих конструктивних елементів: обмеження по міцності, місцевої стійкості, тріщиностійкості т.д. Але параметри різних рівнів часто взаємопов'язаними, що потребує багатократного перерахунку. Таким чином, розділення на незалежні задачі різного рівня можливо лиш умовно, за рахунок вибіркового перерозподілу обмежень, які пов'язані один з одним на різних рівнях.

Серед чисельних алгоритмів оптимізації, найбільш часто використовуються в оптимальному проектуванні конструкції можна виділити три основні групи: алгоритми на основі нелінійного математичного програмування; алгоритми, які використовують критерії оптимальності; генетичні алгоритми.

В задачах оптимізації конструкції все більше поширення знаходять генетичні алгоритми. В генетичних алгоритмах вирішення задачі виконується за допомогою випадкового підбору, комбінованого і варіаційних шуканих параметрів з реалізацією механізмів, які нагадують біологічну еволюцію, в яких відбуваються “схрещування”, але для складних задач використання даного методу при великих умов оптимальності практично неможлива.

Більшість оптимізованих алгоритмів потребують обчислення не тільки значень цільової функції, яка описує поведінку системи, але і її похідні. Така задача може бути впроваджена при використання градієнтних пошукових методів, але дослідження властивостей оптимізованої системи при малій варіації параметрів в околицях заданої точки (задача аналізу чутливості конструкції) має важливе практичне значення, так як дозволяє виявити ті параметри, які мають вплив на поведінку конструкції. На теперішній час теорія аналізу чутливості сформувалася в самостійний наукових напрямок, яке тісно пов’язане з теорією оптимального проектування і може бути впроваджено для розгляду багатокритеріальної параметричної оптимізації.

В даному науковому дослідженні розглядається метод оптимізації градієнтного спуску з врахуванням аналізу чутливості оболонки мінімальної поверхні, що дає велику точність і якість дослідження процесу параметричної оптимізації. Теоретичне формулювання розглядалося в роботах градієнтного спуску і аналізу чутливості конструкції в роботах [5-6]

Теоретичні відомості вирішення задачі вимушених коливань оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка складається із двох похилих еліпсів. Вирішення задачі вимушених коливань для оболонок мінімальних поверхонь виконується за допомогою методу скінчених елементів з використанням варіаційного принципу Лагранжа.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial Э}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial Э}{\partial q} = 0. \qquad (1)$$

де $Э = П - Т$ – функція Лагранжа;

q – вектор узагальнених вузлових переміщень скінчено-елементної моделі.

Потенціальна енергія деформації оболонки мінімальної поверхні в матричному вигляді визначається як сума потенційних енергій кожного скінченого елемента об’ємом V.

$$П = \frac{1}{2}\iiint_V \{q\}^T\,[B]^T[D_\sigma][B]\{q\}dV = \frac{1}{2}(\{q\}^T[K]\{q\}). \qquad (2)$$

звідки матриця жорсткості скінчено-елементної моделі оболонки мінімальної поверхні визначається залежністю

$$[K] = \iiint_V [B]^T\,[D_\sigma][B]dV. \qquad (3)$$

Кінетична енергія вимушених коливань оболонки мінімальної поверхні визначається як сума кінетичної енергії кожного скінченого елемента:

$$T = \frac{1}{2}\rho \iiint\limits_{V} \{q\}^T [N]^T [N]\{q\} dV = \frac{1}{2}(\{q\}^T [M]\{q\}). \tag{4}$$

звідки матриця мас оболонки мінімальної поверхні визначається залежністю

$$[M] = \rho \iiint\limits_{V} [N]^T [N] dV. \tag{5}$$

Для дискретизації пружної оболонково системи, яка пов'язана з глобальною системою координат (α_1, α_2) область серединної поверхні розбивається на N скінченних елементів, в кожному із яких вводиться локальна система координат (ξ_1, ξ_2, ξ_3). Таким чином, позитивне визначення матриці жорсткості $[K]$ і мас $[M]$ оболонкової системи, використовуючи стандартну процедуру, яка формується із матриць жорсткості і мас скінчених-елементів, а скінчені-елементи включають в себе підматриці жорсткості вузлів.

Із умови стаціонарності функції Лагранжа (1) при використанні методу скінчених елементів з урахуванням (2-5) отримаємо систему рівнянь вимушених коливань оболонки мінімальної поверхні в переміщеннях. При цьому геометричні і фізико-механічні співвідношення записуються в глобальну криволінійну ортогональну систему координат $(\alpha_1, \alpha_2, \xi_1)$, а диференціювання і інтегрування виконується в локальній системі (ξ_1, ξ_2, ξ_3). Побудований таким чином скінчений елемент задовольняє умови безперервності перших похідних при переході через його кордони і точно описує поступальні переміщення скінченого елементу як жорсткого цілого тіла.

Матрична форма рівнянь вимушених коливань для досліджуваної оболонки мінімальної поверхні має наступний вид:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{0\}. \tag{6}$$

де $\{\ddot{q}\}$, $\{q\}$ – вектори загальних вузлових прискорень і переміщень оболонки мінімальної поверхні.

Матриця жорсткості і мас вузлів елемента (e) об'ємом V_e обчислюється по формулам:

$$\left[K^{(e)}\right] = \iiint\limits_{V_e} \left[B^{(e)}\right]^T [D_\sigma] \left[B^{(e)}\right] dV_e. \tag{7}$$

$$\left[M^{(e)}\right] = \rho \iiint\limits_{V_e} [N]^T [N] d\, V_e. \tag{8}$$

Формули (7-8) для компонента деформації скінченого елемента оболонки мінімальної поверхні набудуть вигляду:

$$\left\{\varepsilon^{(e)}\right\} = \left[B^{(e)}\right]\{q^e\}. \tag{9}$$

де $\left[B^{(e)}\right]$ – матриця диференціювання функцій форми скінченого елемента $\{q^e\}$ – вектор загальних вузлових переміщень елемента (e).

Розбіжність деформацій вузлів, що сполучаються на стику елементів приводить до розбіжності в зусиллях і напруженнях. Таким чином здійснюється зворотній перехід від дискретної системи до континуальної.

Вирішення системи лінійних рівнянь (6) шукаємо у вигляді:

$$\{q\} = \{q_0\}_i \cos(\omega_i t + \varphi_i). \tag{10}$$

де $\{q_0\}_i$ – і-тий власний вектор, який представляє амплітуду коливань на і-ту вимушену частоту (і-ту форму коливань). ω_i – і-тий вимушена кругова частота. t – час. φ_i – зрушення фаз для переміщень.

Рівняння (6) з урахуванням залежності (10) приводяться до вигляду:

$$\left(-\omega_i^2[M] + [K]\right)\{q_0\}_i = \{0\}. \tag{11}$$

Отриманий матричний вираз представляє собою систему однорідних лінійних алгебраїчних рівнянь, вирішення яких дає вектор вимушених частот і матрицю форм коливання оболонки мінімальної поверхні, які формуються із матриць жорсткості $\left[K^{(e)}\right]$ і мас $\left[M^{(e)}\right]$, які є складовими скінчених елементів, згідно (7-9).

Для існування нетривіального рішення (11) ($\{q_0\}_i \neq \{0\}$) визначник матриці $\left(-\omega_i^2[M] + [K]\right)$ повинен дорівнювати нулю [7]

$$det\left(-\omega_i^2[M] + [K]\right) = 0. \tag{12}$$

Якщо θ – порядок матриці (число ступенів свободи), то рівняння (12) має θ коренів – власних значень, які визначають вектор квадратів кругових вимушених частот $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_\theta^2$. Тому проблема вимушених значень (11) має θ власних рішень $(\omega_1^2, \{q_0\}_1), (\omega_2^2, \{q_0\}_2), \dots, (\omega_\theta^2, \{q_0\}_\theta)$. Із відомих властивостей власних векторів матриці $[M]$ внаслідок їх ортогональності

$$\{q_0\}_i^T[M]\{q_0\}_j = 1 \text{ то } i = j, \text{якщо} = 0, \text{то } i \neq j. \tag{13}$$

Значення вимушених кругових частот ω_i і вимушених частот f_i пов’язані співвідношенням $f_i = \omega_i/2\pi$.

Таким чином, задача (9) з врахуванням (13) представляє узагальнену проблему вимушених значень, яка в загальному вигляді зводиться до визначення вимушених значень і векторів системи виду[8]:

$$[\Lambda]\{x\} - \lambda[\Phi]\{x\} = \{0\}. \tag{14}$$

де $[\Lambda]$ і $[\Phi]$ симетрично позитивно визначені матриці; λ – власні значення; $\{x\}$ – власні вектори.

Для вирішення задачі (14) використовуються алгоритм Ланцоша в поєднані зі зворотними ітераціями, які в порівняні з методом Лагранжа дозволяє скоротити час рішення задачі. Цей алгоритм можна застосовувати тільки до стандартних задач на вимушені значення вигляду:

$$[\Lambda]\{x\} - \lambda[I]\{x\} = \{0\}. \tag{15}$$

де $[I]$ – одинична матриця.

Тому для вирішення загальної проблеми вимушених частот по алгоритму Ланцоша зворотних ітерацій (9) приводиться до стандартної форми (15). Це дозволяє виконувати за допомогою розкладення Холецького матриці $[M]$ з наступним множенням матриці $[K]$ зліва і справа на зворотну нижню і верхню трикутну матрицю. В результаті отримаємо [9]:

$$[\Lambda] = [L]^{-1}[K][L^T]^{-1}. \tag{16}$$

де $[L][L^T] = [M]$ ($[L]$ – нижня трикутна матриця з позитивною діагоналлю в розкладення Холецького).

Розкладання Холецького існую, якщо матриця $[M]$ – симетрична позитивно визначена. Для розгляду задачі ця умова виконується. Елементи матриці $[L]$ обчислюються, починаючи з лівого верхнього кута матриці $[M]$, по формулам:

$$L_{ii} = \sqrt{M_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik}^2}, (i = 1, \dots, \theta). \tag{17}$$

$$L_{ij} = \left(\sqrt{M_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik}, L_{jk}}\right), (i = 1, \dots, \theta). \tag{18}$$

Основними етапами алгоритму Ланцоша зворотних ітерацій є:

1. Приведення видної матриці $[\Lambda]$ до трьох діагональному виду за допомогою перетворення Ланцоша;
2. Обчислення всіх вимушених частот за допомогою QR – ітерацій;
3. Обчислення власних векторів трьох діагональну матрицю за допомогою зворотної ітерації і перехід від них до власним векторам вихідної матриці.

Чисельне дослідження однокритеріальної параметричної оптимізації в цільової функції: вага для оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка складається із двох похилих еліпсів. Оптимізаційній алгоритм для однокритеріальної параметричної оптимізації виконується наступним чином: цільова функція – вага оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка складається із двох похилих еліпсів, змінні проектування – товщина оболонки від 1 до 100 мм, обмеження представлені – перша вимушена частота коливання 0.005 Гц [10-12]. В ході розв'язання задачі параметричної оптимізації, де обмеженням є перша власна частота коливання, щоб запобігти резонансу, знаходимо оптимум конструкції в ході мінімізації або максимізації цільової функції. На рис. 1. зображена блок схема, 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, яка потім переноситься на Femap with Nastran в автоматизованому режимі, де в подальшому виконується побудова скінчено-елементної моделі [13-14] 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. Блок-схема оптимізації при обмеження вимушених частот коливань

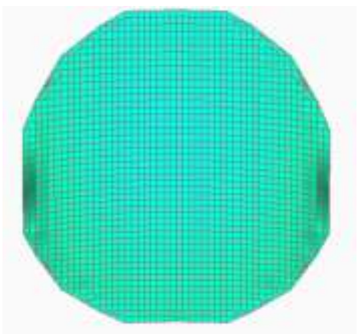

Рис. 2. Перша форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.00182673 Hz

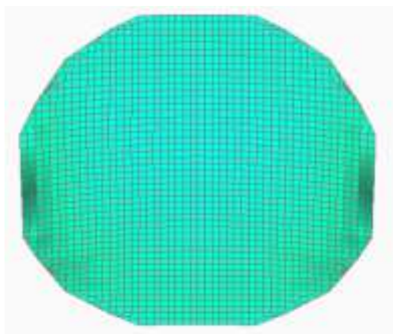

Рис. 12. Перша форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.00501601 Hz

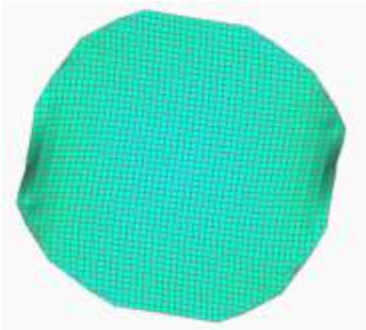

Рис. 3. Друга форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.0104783 Hz

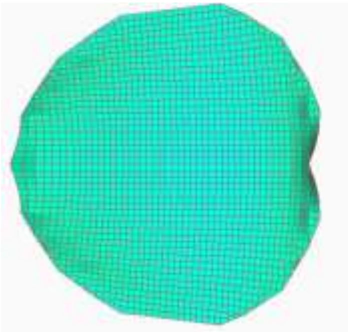

Рис. 4. Третя форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.0187366 Hz

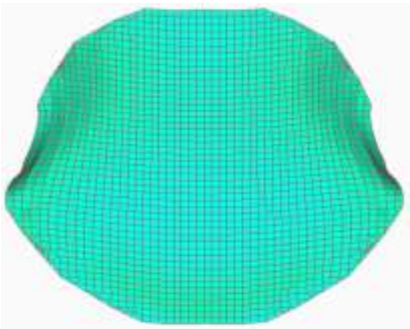

Рис. 5. Четверта форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.037718 Hz

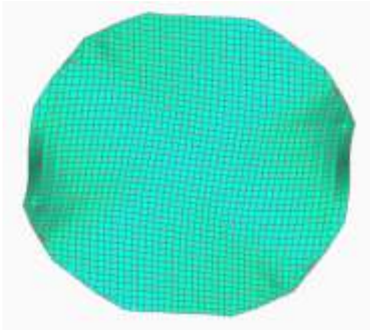

Рис. 13. Друга форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0150326 Hz

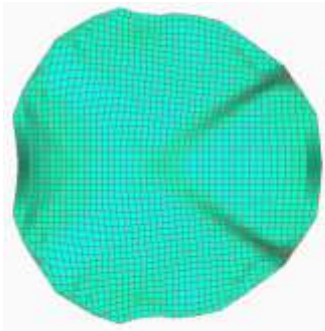

Рис. 14. Третя форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0285351 Hz

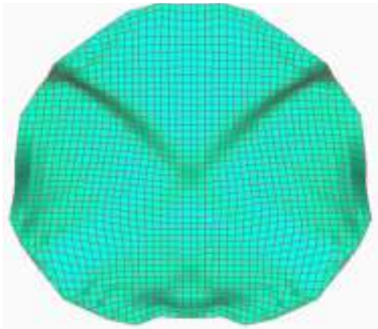

Рис. 15. Четверта форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0342252 Hz

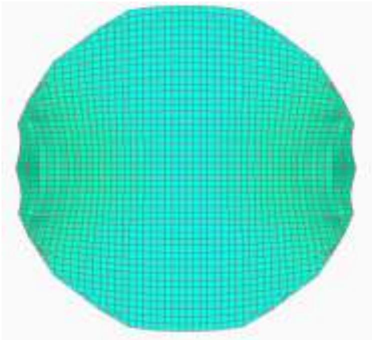

Рис. 6. П’ята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.038011 Hz

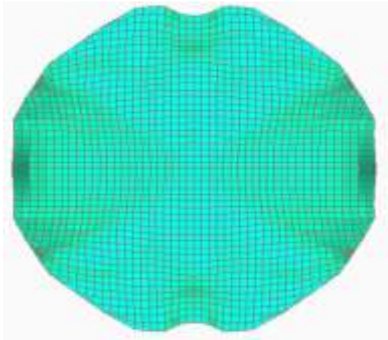

Рис. 16. П’ята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0417705 Hz

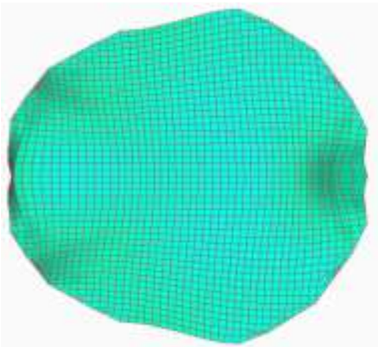

Рис. 7. Шоста форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.0629045 Hz

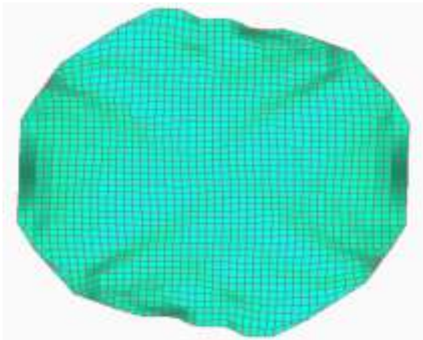

Рис. 17. Шоста форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0526608 Hz

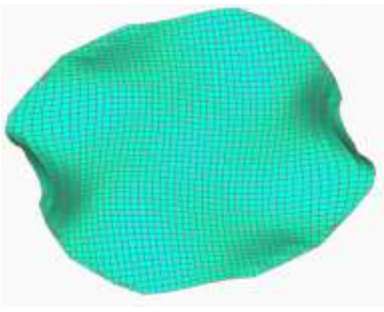

Рис. 8. Сьома форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.0738512 Hz

Рис. 18. Сьома форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0578458 Hz

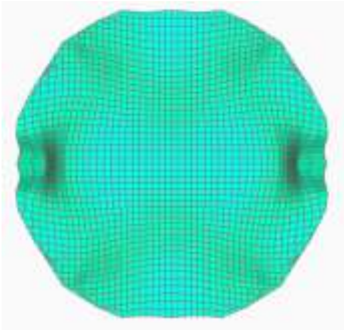

Рис. 9. Восьма форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.0969485 Hz

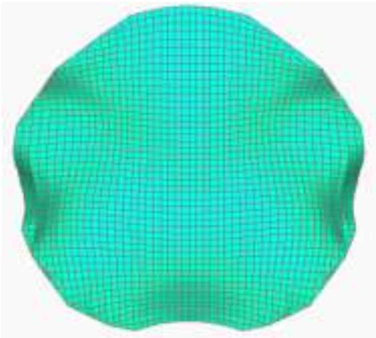

Рис. 10. Дев'ята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.109651 Hz

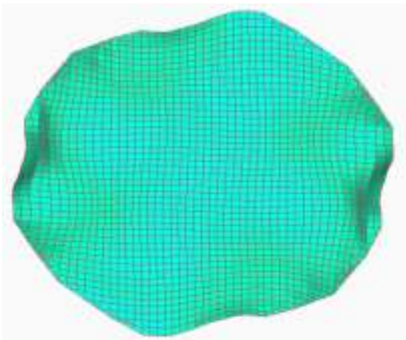

Рис. 11. Десята форма коливання до оптимізації. Частота коливання 0.132794 Hz

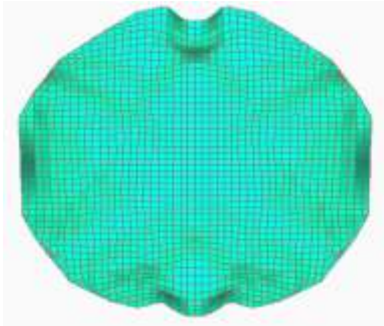

Рис. 19. Восьма форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0622565 Hz

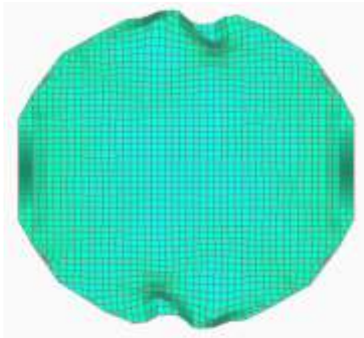

Рис. 20. Дев'ята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.065444 Hz

Рис. 21. Десята форма коливання після оптимізації. Частота коливання 0.0659125 Hz

Результати чисельних досліджень оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка складається із двох похилих еліпсів. 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 3050 кг сталі С240, що є у відсотковому еквіваленті 13.4% без втрати міцності і стійкості оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка складається із двох похилих еліпсів. Графік зміни цільової функції зображений на рис 23. Представлені 10 форм і частот коливання оболонки, до, і після оптимізаційного розрахунку рис. 2-21. Перша вимушена частота коливання після оптимізаційного розрахунку від термосилового навантаження становить 0.005016 Hz, що фактично представлено обмеженням. Розподілення товщини оболонки зображено на рис. 22, що коливається від 26.3 мм до 1 мм.

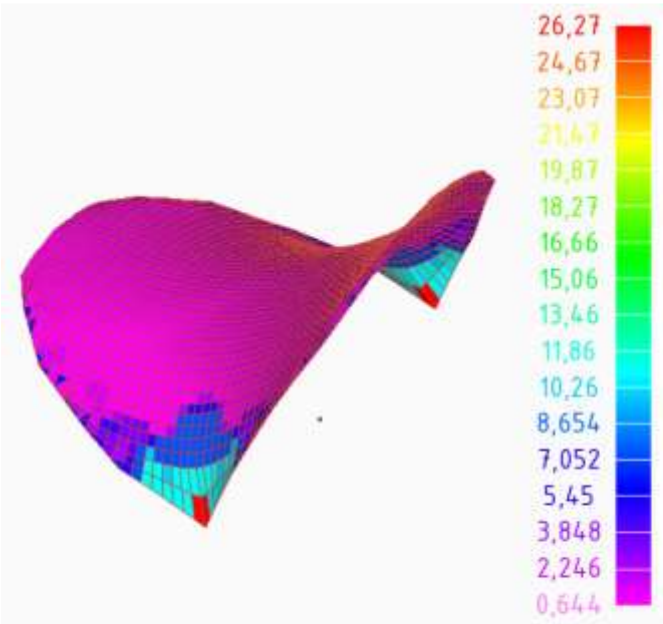

Рис. 22. Товщина оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі після оптимізації в мм

Загальний висновок. За допомогою методики автора та власного програмного забезпечення є можливість виконувати ефективний оптимізаційний розрахунок для оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі. Застосування двох типів видів оптимізації на одному об’єкті дослідження є важливою прикладною задачею для будівельної і прикладної механіки.

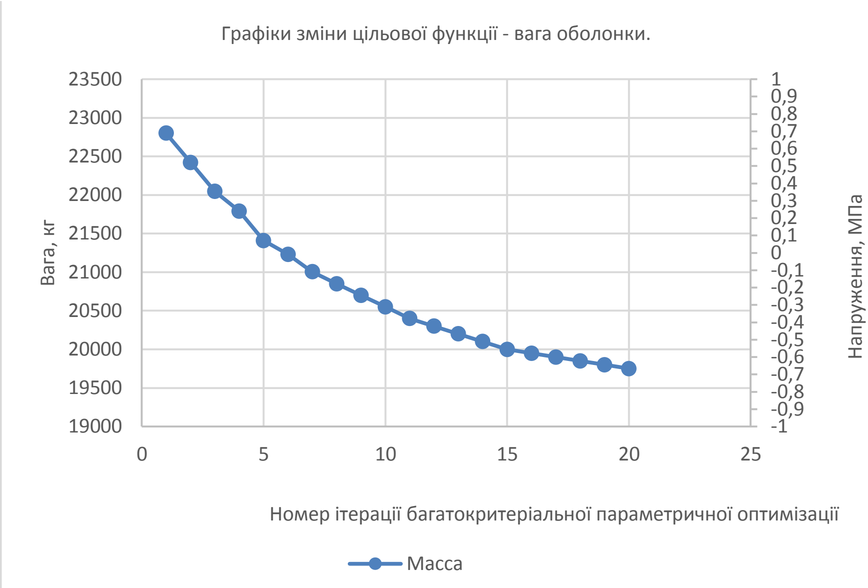

Рис. 23. Графік зміни цільових функцій: вага по ітераціям однокритеріальної параметричної оптимізації.

Список літератури:

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. М.: 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. Іванченко Г.М., Кошевий О.О., Кошевий О.П. Чисельна реалізація багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі при термосиловому навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022, Вип. 109. С. 50-65

5. Perelmuter A., Yurchenko V. Parametric optimization of steel shell towers of High-Power wind turbines. *Procedia Engineering*. 2013, Issue 57. P. 895-905.

6. Perelmuter A., Yurchenko V., Peleshko I. Cross-Section Size Optimization of Cold-Formed Steel Lipped Channel Structural Members Subjected to Axial Compression. *Civil and Environmental Engineering*. 2022, Issue 18(2). P. 472-481

7. Пелешко І.Д., Юрченко В.В. Пошук компромісного розв'язку в задачах оптимізації розмірів поперечних перерізів елементів конструкцій з холодногнутих профілів. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. Вип. 109. С. 72-92.

8. Peleshko I., Yurchemko V. Optimization of cross-section dimensions of structural members made of cold-formed profiles using. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022, Vol. 119 Issue 7, p. 84-95.

9. Пелешко І.Д., Юрченко В.В. Оптимальна кількість зайвих в'язей для введення зусиль попереднього напруження металевих стержневих систем. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2021. Вип. 106. С. 68-91

10. Юрченко В.В. Пошуковий алгоритм визначення потоків дотичних зусиль для довільного перерізу тонкостінного стержня та його програмна реалізація./ *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2019. Вип. 103. С. 82–111.

11. Юрченко В.В., Пелешко І.Д. Параметрична оптимізація сталевої решітчастої рами з несучими елементами із круглих труб. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2021. Вип. 107. С. 45-74.

12. Юрченко В.В., Перельмутер А.В., Пелешко І.Д. Оптимізація розмірів поперечних перерізів стиснутих елементів конструкцій з С-подібного холодногнутого профілю. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. Вип. 108. С. 156-170.

13. Юрченко В.В., Пелешко І.Д. Параметрична оптимізація металевих стержневих конструкцій на основі методу проекції градієнта. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2020. Вип. 105. С. 192-220.

14. Кривошапко С.В., Иванов В.Н., Халаби С.М. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек. М.: Наука, 2006. 544 с.

References:

1. Herasymov, E.N., Pochtman, YU.M., Skalozub, V.V. (1985). Mnohokryteryal′naya optymyzatsyya konstruktsyy. (Multicriteria optimization of structures). Donetsk: Vyshcha shk. Hlavnoe Yzd-vo. 134 s.

2. Hyll, F., Myurrey, U., Rayt, M. (1985). Praktycheskaya optymyzatsyya (Practical optimization). M.: Myr. 509 s.

3. Ihnatyshyn, M.I. (2017). 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. 172 s.

4. Ivanchenko, G.M., Kosheviy, O.O., Koshevyi, O.P. (2022). Chyselna realizatsiia bahatokryterialnoi parametrychnoi optymizatsii obolonky minimalnoi poverkhni na kvadratnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni. (Numerial implementation of multicriteria parametric optimization of minimum surface shell on a square contour under thermforce loading). *Strength of Materials and Theory of Structures.* Issue 109. P. C. 50-65.

5. Perelmuter, A., Yurchenko, V. (2013). Parametric optimization of steel shell towers of High-Power wind turbines. *Procedia Engineering*. Issue 57. P. 895-905.

6. Perelmuter, A., Yurchenko, V., Peleshko, I. (2022). Cross-Section Size Optimization of Cold-Formed Steel Lipped Channel Structural Members Subjected to Axial Compression. *Civil and Environmental Engineering*. Issue 18(2). P. 472-481.

7. Peleshko, I., Yurchenko, V. (2022). Poshyk kompromisnogo rozviazky v zadachah optimizatii rozmiriv poperechnuh pereriziv elementiv konstructchiy z holodnognutih profiliv (Searching for a compromise solution in cross-section size optimization problems of cold-formed steel structural members). *Strength of Materials and Theory of Structures*: Issue 109. P. C. 50-65.

8. Peleshko, I., Yurchemko, V. (2022). Optimization of cross-section dimensions of structural members made of cold-formed profiles using. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 119, Issue 7, p. 84-95.

9. Peleshko, I., Yurchemko, V.(2021). Optimalna kilkist zayvih viazey dlia vedennia zysil poperednogo napryzennia metakevih sterchnevih system. (Optimal numbers of the redundant members for introducing initial pre-stressing forces into steel bar structures). *Strength of Materials and Theory of Structures*. Issue 106. P. 68- 91.

10. Yurchenko, V.V. (2019). Poshykovyi algoritm viznachennia potokiv doticgnih zysil dlia dovilnogo pererizy tonkostinnih sterchnia ta yogo programna reakchia. (Searching for shear forces flows in arbitrary cross-sections of thin-walled bars: numerical algorithm and software implementation). Strength of Materials and Theory of Structures. Issue 103. P. 82– 111

11. Yurchenko, V.V., Peleshko, I.D. (2021). Parametrichna optimizatia stalevoi reshitchatoi ramu z nesychimi elementami iz krygluh tryb. (Parametric optimization of steel lattice portal frame with chs structural members). *Strength of Materials and Theory of Structures*. Issue 107. P. 45-74.

12. Yurchenko, V.V., Perelmuter, A.V., Peleshko, I.D. (2022). Optimizatia rozmiriv poperechnih perepiziv stisnutih elementiv konstrukchiy z S-podibnogo holodnognytogo profile. (Optimization cross-sectional dimensions for cold-formed steel lipped channel columns). *Strength of Materials and Theory of Structures*. Issue 108. P. 156-170.

13. Yurchenko, V.V., Peleshko, I.D. (2020). Parametrichna optimizatia metalevih sterchnevih konstructiy na osnovi metody proekchiy gradient. (Parametric optimization of steel structures based on gradient projection method). *Strength of Materials and Theory of Structures*. Issue 105. P. 192-220.

14. Kryvoshapko, S.V., Yvanov, V.N., Khalaby, S.M. (2006). Analytycheskye poverkhnosty: materyaly po heometryy 500 poverkhnostey y ynformatsyya k raschetu na prochnostʹ tonkykh obolochek. (Analytical surfaces: materials on the geometry of 500 surfaces and information for the calculation of the strength of thin shells). M.: Nauka. 544 s.

G.M. Ivanchenko, O.O. Kosheviy, I.P. Zhupanenko

Optimal design of the forced oscillation frequencies of the minimum surface shell on a circular contour consisting of two inclined ellipses under thermal and power loading

The problem of choosing the optimal design solution is a multi-purpose complex task, the solution of which requires taking into account a wide range of requirements for different stages of implementation. There are several levels of solving optimal design problems. The first level deals with general design models, including the main structural elements, taking into account the physical and geometric features of their behavior. This level can be called the "global" level of optimization. Due to the fact that the automated calculation of structures is impossible without the use of finite element models, and at the next "detailed" level, the parameters that make up this model (coordinates of nodes, physical and geometric properties of individual elements, etc.)

The choice of a finite element model for optimal design is directly related to the complexity (the possibility of computer implementation) of the optimal design problem. To reduce the computational procedures associated with solving the problem of numerical analysis, an approach based on the approximation of system parameters (displacements, forces, frequencies, waveforms, etc.) can be used.

The problem of forced oscillations for shells of minimal surfaces is solved by the finite element method using the Lagrange's variational principle. The potential and kinetic deformation energies of the shell of a minimal surface are defined in matrix form as the sum of the potential and kinetic energies of each finite element.

The optimization algorithm for single-criterion parametric optimization is performed as follows: the objective function is the weight of the shell of the minimum surface on a circular contour consisting of two inclined ellipses, the design variables are the thickness of the shell, and the constraints are represented by the first forced vibration frequency. The results of changing the objective function are a decrease in the weight of the shell by 3050 kg of C240 steel, which is a percentage equivalent of 13.4% without loss of strength and stability of the shell of the minimum surface on a circular contour consisting of two inclined ellipses, which proves the effectiveness of the authors' methodology.

Keywords: optimization, parametric optimization, one-criterion parametric optimization, shape optimization, forced vibration frequencies, minimum surface shell, objective function, structure weight, design variables, constraints, shell thickness.

Посилання на статтю:

APA: Ivanchenko, G.M., Kosheviy, O.O., & Zhupanenko, I.P. (2023). Optimal design of the forced oscillation frequencies of the minimum surface shell on a circular contour consisting of two inclined ellipses under thermal and power loading. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 51, 218-233.

ДСТУ: Іванченко Г.М., Кошевий О.О., Жупаненко І.В. Оптимальне проектування вимушених частот коливання оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, яка складається із двох похилих еліпсів при термосиловому навантаженні. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. № 51. С. 218-233.