REFERENCES

1. Kostrov, M. M. & Ahundov, V. M. (2017). Deformation of an elastic cylinder with annular fibers under the influence of rotation during a free landing. Visnyk Zaporizhzhya National University. Physics and mathematics, No. 1, pp. 205-212.
2. Lur'e, A. I. (1980). Nonlinear theory of elasticity. Moscow: Nauka.
3. Korn, G. A. & Korn, T. M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems and Formulas for Reference and Review. New-York: General Publ. Company.
4. Ortega, Dzh. & Rejnboldt, V. (1975). Iterative methods for solving nonlinear systems of equations with many unknowns. Moscow: Mir.
5. Chernyh, K. F. (1986). Nonlinear theory of elasticity in machine-building calculations. Leningrad: Mashinostroenie.

УДК 624.03

ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ В ДЕЯКИХ ЗАДАЧАХ БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ

Коструб Р. В., аспірант

Український державний хіміко-технологічний університет,
просп. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна

kostrub.r.v@gmail.com

У статті порівняно швидкодію алгоритмів оптимізації в задачі оптимального проектування шарнірно-стрижневих систем, які функціонують в агресивному середовищі. Задача оптимізації має обмеження у вигляді алгоритму, а простір розв’язків – неметричний, тому використовуватимуться алгоритми оптимізації, що не потребують градієнта. Наведено результати порівняння, які показують вищу швидкодію генетичного алгоритму.

Ключові слова: генетичний алгоритм, випадковий пошук, агресивне середовище, корозія, шарнірно-стрижнева система.

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Коструб Р. В., аспирант

Украинский государственный химико-технологический университет,
просп. Гагарина, 8, Днепр, Украина

kostrub.r.v@gmail.com

В статье представлено сравнение быстродействия алгоритмов оптимизации в задаче оптимального проектирования шарнирно-стержневых систем, функционирующих в агрессивной среде. Задача оптимизации имеет ограничения в виде алгоритма, а пространство решений – неметрическое, поэтому будут использоваться алгоритмы оптимизации, не требующие градиента. Приведены результаты сравнения, которые показывают более высокое быстродействие генетического алгоритма.

Ключевые слова: генетический алгоритм, случайный поиск, агрессивная среда, коррозия, шарнирно-стержневая система.

COMPARISON OF OPTIMIZATION ALGORITHMS IN SOME TASKS OF STRUCTURAL MECHANICS

Kostrub R. V., Ph. D student

Ukrainian State University of Chemical Technology, Gagarina Ave., 8, Dnipro, Ukraine

kostrub.r.v@gmail.com

In this paper author compared speed of optimization algorithms in task of truss structure sizing optimization. Sizing optimization of truss structures working in corrosive environments is computational heavy task, especially when dealing with large number of elements, thus speeding up algorithm witch used for optimization is important scientific task. Optimization process consists of following parts: use corrosion model to get damage depth, use finite element method to get structure parameters, check constraints, if structure doesn't fit constraints repeat optimization procedure for different structure parameters. Algorithm stops when either feasible parameter set is found or when too many iterations of optimization algorithm passed without result. Structure optimization method used in this paper have couple parts that can be optimized: 1.Process of computing of constraints functions; 2. Algorithm used to solve system of differential equations that models process of damage accumulation in structure; 3. Optimization algorithm used to solve overall task. This paper focused on latter problem. There are many optimization algorithms known, but approach used in this work have constrains, such as: search space consist of indexes in 3 dimensional table filled with parameters of standardized bars, and constraints function represented by algorithm. Therefore, we cannot use gradient methods because search space is non metric. Possible solutions to this problem is use of zero order methods such as random search, or heuristic methods for example genetic algorithm. Described truss structure optimization method were implemented and tested with use of random search algorithm and genetic algorithm. Five truss structures with different number of bars optimized using suggested algorithm. Results show that genetic algorithm have speed advantage over random search algorithm.

Key words: genetic algorithm, random search, corrosive environment, corrosion, truss structure.

Сучасну промисловість неможливо уявити без використання металевих конструкцій. Часто такі конструкції функціонують в агресивному середовищі (АС), що призводить до корозії – руйнування поверхневого шару металу. Корозія у свою чергу може призвести до значних економічних втрат. Ці втрати можуть бути як прямими: заміна обладнання, яке вийшло з ладу внаслідок корозії, так і непрямими: втрата сировини, яка перероблялась під час виходу обладнання з ладу, можливе забруднення навколишнього середовища, у деяких випадках – навіть втрата людських життів. За даними NACE [1], у країнах, де проводились дослідження вартості корозії, втрати від неї оцінюються від 2% до 5% валового національного продукту. Одним із можливих способів зменшити втрати від корозії є ремонт або заміна конструкції перед тим, як вона втратить свою несучу здатність, що потребує надійного способу прогнозування часу, коли така конструкція вийде з ладу.

Отже, прогнозування довговічності конструкцій, що функціонують в агресивному середовищі — це цікава практична та наукова задача. Крім того, отримання розв'язку такої задачі оптимальним шляхом є окремою науковою проблемою.

Однією з передумов отримання оптимальної конструкції є наявність адекватної моделі накопичення пошкоджень. Існує багато способів моделювання: для цієї роботи математичне моделювання видається найбільш придатним, оскільки може використовуватись для різних типів корозії, на відміну від фізичного моделювання (крім випадку водневої корозії). Відомо багато математичних моделей корозійного процесу, зокрема моделі, наведені у працях Цикермана, Петрова, Овчинникова [2-4]. Але вони не враховують вплив напруженого стану на швидкість корозії. Однією з моделей, що враховує цей вплив, є модель, запропонована у працях Долинського [5].

Параметри елементів конструкції можна отримати, розв'язавши задачу напружено-деформованого стану (НДС). Для отримання параметру пошкодження у випадку статично визначеної конструкції можливо використати аналітичні формули, отримані для моделі Долинського. У статично невизначеній конструкції зусилля у стрижні залежить від зусиль у всіх інших елементах конструкції, тому для визначення пошкодження конструкції потрібно розв'язати систему диференціальних рівнянь (СДР).

Для розв'язання задачі НДС доцільно використати метод скінченних елементів (МСЕ), оскільки він може працювати з довільними параметрами конструкції.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У загальному вигляді задача оптимізації має такий вигляд: функція цілі $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$ та функції обмежень $g_j(x) = 0,\ j = 1, \dots, m;\ g_j(x) \le 0,\ j = m+1, \dots, p,$ які визначають множину допустимих розв'язків X. Потрібно знайти мінімум цільової функції на множині X, тобто таку точку $x^* \in X$, що:

$$f(x^*) = \min_{x \in X} f(x), \tag{1}$$

де

$$X = \left\{ x \,\middle|\, \begin{matrix} g_j(x) = 0, & j = 1, \dots, m, & m < n, \\ g_j(x) \le 0, & j = m+1, \dots, p. & \end{matrix} \right\}$$

Як цільова функція використовується об'єм отриманої конструкції (2)

$$V(\bar{x}) = \sum_{i=1}^{N} A_i\,(\bar{x}) \cdot L_i \to min, \tag{2}$$

де $\bar{x}$ – вектор варійованих параметрів, N – кількість елементів в ШСК, A_i, L_i – площа та довжина i-го стержня.

Як обмеження виступають співвідношення:

$$\begin{cases} g_1\colon [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \ge 0; & i = \overline{1, N}; \\ g_2\colon \sigma_j^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_j(\bar{x}, t^*) \ge 0; & j \in J; \\ x_K \in [x_k^1; x_k^2; \dots; x_k^n]; & k = \overline{1, K}, \end{cases} \tag{3}$$

де K – кількість варійованих параметрів, J – множина стержнів що працюють на стиснення, σ_i, σ_j^*, $[\sigma]$ – напруження, критичне напруження втрати стійкості, граничне значення напруження, t^* – заданий термін служби.

Для обчислення значень функцій обмежень використаємо модель поведінки кородуючої конструкції, яка складається з:

Система рівнянь метода скінченних елементів (МСЕ) (1.4):

$$\begin{cases} \bar{u} = K^{-1} \cdot \bar{R}, \\ \bar{\varepsilon} = D \cdot \bar{u}, \\ \bar{\sigma} = E \cdot \bar{\varepsilon}, \end{cases} \tag{4}$$

де $\bar{R}$, $\bar{u}$, $\bar{\varepsilon}$, $\bar{\sigma}$ – вектори навантажень, переміщень, деформацій та напружень.

Система диференційних рівнянь (ДР), що описує корозійний процес:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = V_0 \psi\left(\sigma_i(\bar{\delta})\right) \colon \delta_i|_{t=0} = 0, \tag{5}$$

$$\psi|_{\sigma=0} = 1,$$

$$\delta_i^s = \delta_i^{s-1} + hV_0\psi\left(\sigma_i^{s-1}(\bar{\delta}^{s-1})\right), \tag{6}$$

де δ – глибина корозійного пошкодження, t – час, V_0 – швидкість корозії за відсутності напруження, σ – абсолютна величина напруги, ψ – деяка відома функція.

Вираз (5) – це модель корозійного процесу, отримана В. М. Долинським у праці [6], де параметр пошкодження лінійно залежить від величини напруження. Розв’язати це рівняння можна тільки чисельно, наприклад, методом Ейлера (6). Оцінити похибку чисельного методу можна за допомогою аналітичної формули (7), яка використовується у випадку статично визначеної конструкції:

$$t^* = t_0 - \frac{2kQ}{v_0 \cdot |d|}\left\{arctg\,\frac{2a\delta - P_0}{|d|} + arctg\,\frac{P_0}{|d|}\right\}, \tag{7}$$

де P_0 – периметр перерізу в початковий момент часу, Q – величина осьового зусилля, $t_0 = \frac{\delta^*}{v_0}$, a – коефіцієнт форми перерізу.

ОПИС АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ

Оскільки простір розв’язків неметричний, ми не можемо використовувати градієнтні методи для оптимізації конструкції. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є використання генетичного алгоритму (ГА) – еволюційного алгоритму пошуку, що базується на механіці природного відбору, яка зустрічається в генетиці. Такі алгоритми комбінують у собі принцип виживання найпристосованішого та структурованого, але водночас випадкового обміну інформацією. Кожна особина – це можливий розв’язок задачі оптимізації, закодований певним чином. У кожному поколінні для створення нового набору особин використовуються частини найкращих особин зі старого покоління. Для оцінки особини використовується так звана фітнес-функція, яка є нашою функцією мети. Генетичні алгоритми використовують дані про минулі покоління, щоб отримати нові точки для пошуку, в яких очікуються покращення результату [7].

Генетичні алгоритми відрізняються від класичних методів оптимізації такими особливостями [7]:

ГА працює з закодованими значеннями параметрів, а не з самими параметрами.

ГА веде пошук у популяції точок, а не в одній точці.

ГА використовує інформацію про цільову функцію, а не про її похідну або якусь іншу додаткову інформацію.

ГА використовує імовірнісні правила переходу від однієї особини до іншої, а не детерміновані.

Для отримання нових особин використовуються генетичні оператори кроссоверу та мутації.

Кросовер – аналог біологічного кросоверу, з двох батьківських особин створюються дві нові дочірні особини, які ймовірно матимуть краще значення фітнес-функції. Існує багато методів вибору батьківських особин, але майже завжди в якомусь розумінні це «найкращі» особини. У цій праці використовувався турнірний відбір: довільно береться група особин і вибирається та, що має найкраще значення фітнес-функції. Існують також різні типи кросоверу: найпростіший або одноточковий, двоточковий, багатоточковий кросовери. При одноточковому кроссовері в батьківських особинах буде одна точка розриву і відповідно дві ділянки, де відбудеться обмін генетичною інформацією, при двоточковому будуть дві такі точки тощо. У нашому дослідженні використовувався одноточковий кросовер.

Мутація – це генетичний оператор, призначений для збереження генетичної різноманітності в популяції. Використання оператора мутації може допомогти оминути локальний мінімум. Його дія полягає у випадковій зміні гену випадкової особини з деякою вірогідністю.

Оскільки генетичний алгоритм не може безпосередньо враховувати обмеження, автор використав метод штрафних функцій для переходу від задачі з обмеженнями до здачі без обмежень. Навіть при невеликому порушенні обмежень на значення фітнес-функції накладається штраф, і особина, де відбувається таке порушення, не потрапить до наступної популяції.

Для кодування особин популяції використовувався тривимірний масив, зображений на рис. 1.

До нього занесені відомості про розміри перерізів деяких фасонних профілів та їх типорозміри. Особина складається з генів, кожному елементу конструкції відповідає два гени, ними кодується тип та типорозмір профілю. Варто наголосити, що в генах використовуються не власне значення параметрів, а індекси в масиві, тобто простір розв'язків неевклідовий. Тому для розпізнання збіжності популяції – одного з критеріїв зупинки алгоритму – було використано умову порівняння до нуля відстані Хеммінга між «найкращою» та «найгіршою» особинами популяції. Іншим можливим критерієм зупинки алгоритму є такий стан популяції, коли впродовж декількох епох не відбувається значних змін значення фітнес-функції «найкращої» особини або була досягнута гранична кількість популяцій.

Іншим варіантом вирішення проблеми є використання методу випадкового пошуку. У деяких випадках методи нульового порядку є єдиними які можна використати для оптимізації. Такими, наприклад, є випадки, коли функція задана неявно або має розриви та ін.

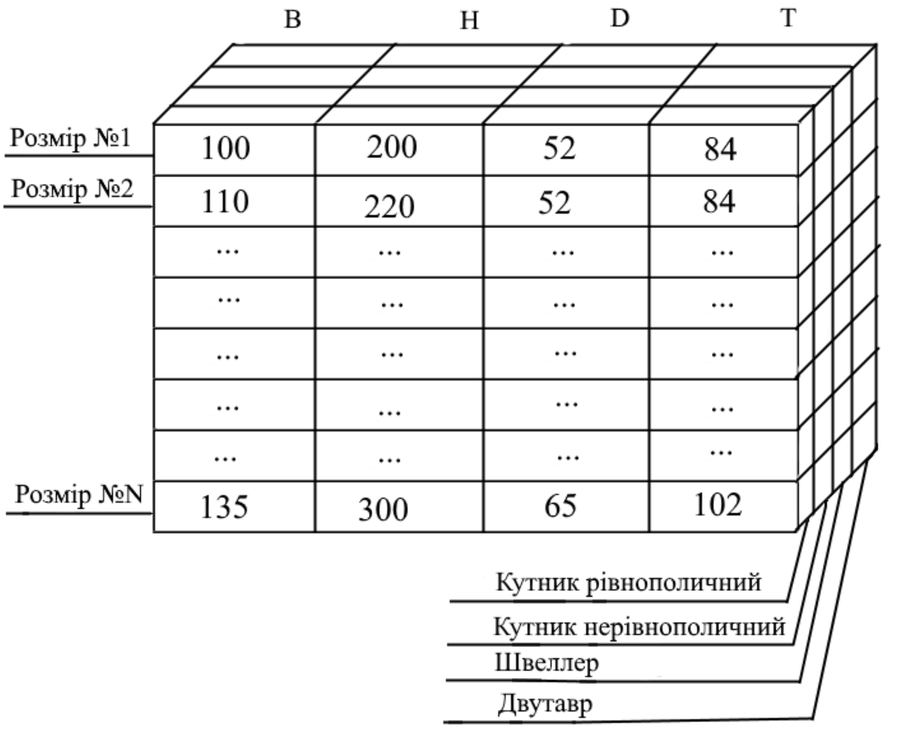

Рис. 1 – Масив розмірів фасонних профілів

Звичайно методи нульового порядку застосовуються, коли неможливе визначення градієнта цільової функції, наприклад, функція задана алгоритмом. Методи випадкового пошуку відрізняються від детермінованих методів оптимізації навмисним введенням елемента випадковості. Це означає, що в одній і тій же ситуації рішення про направлення робочого кроку, прийняте за методом випадкового пошуку, буде різним.

ЧИСЕЛЬНИЙ ПРИКЛАД

Для кожного алгоритму розв'яжемо задачу оптимізації деяких шарнірно-стержневих систем, зокрема 5-елементної, 10, 15, 25, 50, елементних конструкцій з параметрами: $P = 200$ кН, $L = 500$ см, $t = 2.5$ роки, $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $k = 0.003$ МПа$^{-1}$, $[\sigma] = 240$ МПа, $V_0 = 0.1 \frac{\text{см}}{\text{рік}}$.

Для проведення чисельного експерименту використовувався комп'ютер з процесором Intel Core i5 2.4 GHz та 8 гігабайтами ОЗУ.

Результати порівняння наведені в табл. 1

Таблиця 1 – Результати чисельних експериментів

Конструкція	Кількість елементів	t, обчислення ГА с.	t, обчислення ВП с.	t^*, років
1	5	2.43	7.38	2.52
2	10	3.97	12.14	2.67
3	15	7.79	14.79	2.73
4	20	9.68	19.17	2.77
5	25	15.78	25.45	2.84

З таблиці 1 можна зробити висновок, що генетичний алгоритм є більш ефективним за швидкістю.

ВИСНОВКИ

Порівняно два алгоритми оптимізації в задачі оптимального проектування шарнірно-стрижневих конструкцій, які функціонують в агресивному середовищі. Задачу розв'язано за допомогою генетичного алгоритму та методу випадкового пошуку. Одержані розв'язки ілюстративної задачі оптимального проектування деяких ШСК. Результати чисельного експерименту показують, що генетичний алгоритм дає розв'язок швидше, ніж метод випадкового пошуку. Для покращення методу пропонується збільшити швидкість обчислення фітнес-функції генетичного алгоритму, оскільки вона обчислювально складна та застосовується велику кількість разів, це дасть великий поштовх швидкодії методу. Запропонований метод може бути використаний для зниження вартості елементів обладнання хімічних підприємств при збереженні несучої здатності конструкції, що може дати значну економію коштів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Biezma M. V., Cristóbal J. R. S. Letter to the editor: Is the cost of corrosion really quantifiable? *Corrosion*. 2006. Т. 62, №. 12. С. 1051–1055.
2. Цикерман Л. Я, Штурман Я. Г. Прогноз опасности грунтовой коррозии для стальных сооружений. *Защита металлов*. 1967. № 2. С. 243–244.
3. Петров В. В., Овчинников И. Г., Шихов Ю. М Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. Саратов: Сарат. ун-т, 1987. 288 с.
4. Овчинников И. Г, Петров В. В. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами. *Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах.* 1983. С. 3–11
5. Долинский В. М. Изгиб тонких пластин, подверженных коррозионному износу. *Динамика и прочность машин*. 1975. №. 21. С. 16–19.
6. Долинский В. М. Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии. *Исследования по теории оболочек*. 1976. №. 7. С. 37–42.
7. Golberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1989. 432 c.

REFERENCES

1. Biezma, M. V. & Cristóbal J. R. S. (2006). Letter to the editor: Is the cost of corrosion really quantifiable? Corrosion, Vol. 62, No. 12, pp. 1051-1055.
2. Tsikerman, L. Ya. & Shturman, Ya. G. (1967). Forecast of the danger of soil corrosion for steel structures. Zaschita metallov, No 2, pp. 243-244.
3. Petrov, V. V, Ovchinnikov, I. G. & Shikhov, Yu. M. (1987). Calculation of structural elements interacting with an aggressive environment. Saratov: Sarat. University.

4. Ovchinnikov, I. G. & Petrov, V. V. (1983). Mathematical modeling of the interaction of structural elements with aggressive environments. Deformirovaniye materialov i elementov konstruktsiy v agressivnykh sredakh, Saratov, pp. 3-11.
5. Dolinsky, V. M. (1975). Bending of thin plates subject to corrosive wear. Dinamika i prochnost' mashin, No. 21, pp. 16-19.
6. Dolinsky, V. M. (1976). Calculation of elements of structures subject to uniform corrosion. Issledovaniya po teorii obolochek, No. 7, pp. 37-42.
7. Golberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA.

УДК: 539.3:539.37:535.55

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПРОДОВЖЕННЯ РОЗВ'ЯЗКУ ЗА ПАРАМЕТРОМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КРУГЛИХ ТРИШАРОВИХ ПЛАСТИН З НЕЛІНІЙНО-ПРУЖНИМ ЗАПОВНЮВАЧЕМ

Кудін О. В., к. ф.-м. н., Борисовська Ю. О., аспірант

Запорізький національний університет,
вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, Україна

avk256@gmail.com

Запропоновано рівняння рівноваги тришарових круглих пластин симетричної будови з ізотропними зовнішніми шарами і нелінійно-пружним ізотропним заповнювачем. Описано методику розв'язання задачі визначення деформованого стану, яка включає послідовне застосування методу Рітца та методу продовження розв'язку за параметром. Як чисельний приклад, розглянуто задачу визначення деформованого стану тришарової круглої пластини в нелінійно-пружній за Каудерером постановці, виконано порівняння отриманого розв'язку з іншими відомими дослідженнями.

Ключові слова: тришарова симетрична пластина, кругла пластина, нелінійно-пружний заповнювач, метод продовження розв'язку за параметром.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОДОЛЖЕНИЯ РЕШЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРУ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГЛЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Кудин А. В., к. ф.-м. н., Борисовская Ю. А., аспирант

Запорожский национальный университет,
ул. Жуковского, 66, г. Запорожье, 69600, Украина

avk256@gmail.com

Предложены уравнения равновесия трехслойных круглых пластин симметричного строения с изотропными наружными слоями и нелинейно-упругим изотропным заполнителем. Описана методика решения задачи определения деформированного состояния, которая включает последовательное применение метода Ритца и метода продолжения решения по параметру. В качестве численного примера, рассмотрена задача определения деформированного состояния трехслойной круглой пластины в нелинейно-упругой по Каудереру постановке, выполнено сравнение полученного решения с другими известными работами.

Ключевые слова: трёхслойная симметричная пластина, круглая пластина, нелинейно-упругий заполнитель, осесимметричный изгиб, метод продолжения решения по параметру.