

Мінімізація ваги лопаті повітряної установки адаптивним гібридним методом оптимізації

Костянтин Лапітан

Харківський національний універсальний ім. В. Н. Каразіна, Україна

Сергій Місюра

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Україна

Дар'я Лістрова

Харківський національний універсальний ім. В. Н. Каразіна, Україна

Тетяна Руденко

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Україна

Євгенія Місюра

ХНЕУ ім. С.Кузнеця, Україна

Анатолій Васильєв

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Україна

DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.1.282064>



Опубліковано
2024-01-31

Номер
[№ 1 \(2023\): Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Динаміка та міцність машин"](#)

Розділ
Статті

К.Є. ЛАПІТАН, С. Ю. МІСЮРА, Д.В. ЛІСТРОВА, Т.М. РУДЕНКО, Є.Ю. МІСЮРА, А.І. ВАСИЛЬЄВ

МІНІМІЗАЦІЯ ВАГИ ЛОПАТІ ПОВІТРЯНОЇ УСТАНОВКИ АДАПТИВНИМ ГІБРИДНИМ МЕТОДОМ ОПТИМІЗАЦІЇ

У різних галузях інженерної практики, таких як турбобудування, енергетичне машинобудування широко застосовуються елементи тонкостінних конструкцій, які функціонують в умовах підвищених навантажень при взаємодії з повітряним або водним середовищем. До них відносяться лопаті робочих коліс радіально-осьових та поворотно-лопатевих гідротурбін, лопаті вітроенергетичних установок. Проектування високоефективних машин і споруд, які мають необхідний рівень надійності, потребує визначення їх оптимальних характеристик. У статті запропоновано адаптивний метод знаходження мінімуму довільної гладкої функції багатьох змінних. Метод використовувався для розв'язання еталонної задачі оптимізації функції у формі долини. Суть запропонованого алгоритму полягає в послідовному наближенні до дна долини і подальшому русі в бік зменшення цільової функції. Порівняння результатів обчислення точки мінімуму функції виконується як безградієнтним, так і градієнтним методами, а саме: Пауелла, Хука - Дживса, методом найкрутішого спуску та розробленим методом. Встановлено, що ефективність запропонованого методу перевищує звичайні пошукові алгоритми, але він не позбавлений недоліків. Запропоновано метод, який представляє собою ряд гібридних методів, які утворюють гібридну коаліцію. Запропонований гібридний алгоритм не забезпечує задовільного результату в «єдиному» пошуку. Алгоритм пошуку досягає точки, де всі значення функції в оточуючих точках перевищують значення в отриманій точці, і алгоритм не може подолати бар'єр. Для вирішення даної задачі необхідно взяти отриману точку за нову початкову і повторити алгоритм знаходження мінімуму функції, тобто використати метод мультистарта. Запропонований метод використовувався для вирішення задачі оптимізації лопаті повітряної установки, яка зводилася до задачі безумовної оптимізації методом штрафних функцій, але функція цілі мала суттєво долину структуру. Отримано оптимальні значення товщини перетину, що дозволило побудувати лопатку з покращеними характеристиками.

Ключевые слова: ветроэлектростанция, задача оптимизации, гибридный адаптивный метод

In various fields of engineering practice, such as turbine building, power engineering, elements of thin-walled structures are widely used, which operate under increased loads when interacting with air or water. These include blades of impellers of radial-axial and rotary-blade hydraulic turbines, blades of wind power plants. Designing highly efficient machines and structures with the required level of reliability requires determining their optimal characteristics. The article proposes an adaptive method for finding the minimum of an arbitrary smooth multivariable function. The method was used to solve the benchmark optimization problem of a function in the form of a valley. The essence of the proposed algorithm lies in the sequential approach to the bottom of the valley and the subsequent movement in the direction of decreasing the objective function. Comparison of the results of calculating the minimum point of the function is performed using both non-gradient and gradient methods, namely: Powell, Hook-Jeeves, the steepest descent method and the developed method. It was found that the effectiveness of the proposed method is greater than the usual search algorithms, but it is not without its drawbacks. The method is proposed that represents a number of hybrid methods, which form a hybrid coalition. Proposed hybrid algorithm does not provide a satisfactory result in the "single" search. The search algorithm reaches a point where all the values of the function at the surrounding points are greater than the values at the obtained point, and the algorithm cannot overcome the barrier. To solve the problem, it is necessary to take the obtained point as a new starting point and repeat the algorithm for finding the minimum of the function, that is, use the multistart method. The proposed method was used to solve the problem of optimizing the blade of an air installation, which was reduced to the problem of unconditional optimization using the method of penalty functions, but the goal function had a significantly valley structure. The optimal values of section thicknesses were obtained, which made it possible to build a blade with improved characteristics.

Keywords: wind power plant, optimization problem, hybrid adaptive method

Вступ. Інтенсифікація виробничих технологічних процесів у різних галузях пред'являє підвищені вимоги до конструктивної міцності та економічності машин та апаратів при забезпеченні їх високої продуктивності. Вимоги до підвищення техніко-економічних показників об'єктів і процесів при максимальному використанні міцності та жорсткості, зниженні матеріаломісткості, вартості та поліпшенні інших важливих характеристик при дотриманні конструктивних обмежень часто виявляються суперечливими, а тому дуже проблемними у своїй реалізації. Проектування або вдосконалення об'єктів різного призначення передбачає обмежений перебір безлічі варіантів, що мають бажані властивості. Однак такий аналіз зазвичай утруднений і не завжди ефективний. У процесі проектування часто спливає задача визначення оптимальних параметрів функцій, що описують фізичні процеси. Такі задачі називають оптимізаційними задачами.

Нині жодна галузь техніки, будівництва потребує вирішення задач оптимального проектування. До таких задач належать проблеми раціонального

проектування кришок гідротурбін [1, 2], лопатей вітрових установок [3], відстроювання від небажаних резонансних частот при русі оболонок та оболонкових конструкцій з рідиною [4], проблеми запобігання підтопленню міських територій [5], визначення оптимальних параметрів елементів аерокосмічної техніки [6]-[8].

За для розв'язання практичних задач розроблено велику кількість методів та алгоритмів [9]-[15]. Найбільш привабливі серед таких методів – аналітичні, через якісний аналіз отриманого розв'язання, але на жаль аналітичне розв'язання можливо отримати лише для простих задач. Конструювання сучасних технічних об'єктів, і навіть вдосконалення вже створених, ставить перед проектувальником численні проблеми, однією з яких є отримання у заданому сенсі оптимального проекту, тобто. найбільш вигідного варіанта з безлічі можливих. При цьому проектувана конструкція повинна успішно протистояти різним пошкодженням і задовольняти експлуатаційним умовам (надійність), забезпечувати безвідмовну роботу протягом певно

встановленого терміну експлуатації (довговічність), доцільно враховувати можливості виготовлення, транспортування та монтажу, зручності експлуатації, відповідати сучасним вимогам щодо рівня витрат на матеріали та виготовлення (економічність) та ін..

Постановка задачі. У параметричному просторі X існуючих розв'язків, відповідаючих значенню певного функціоналу $F(X)$, шукається область G^* (або точка в ній), для котрої $F(X)$ приймає екстремальне значення $F^* = F(X^*)$. У загальному вигляді така екстремальна задача може бути записана формально у вигляді

$$X^* = \arg \operatorname{extr}_{X \in G} F(X),$$

$$G = \{X \neq \emptyset, G_i(X) > 0, i = 1, \dots, m\} \quad (1)$$

де $G_i(X)$ – обмежуючі функції на змінну X .

Через переваги комп'ютерного розрахунку оптимізаційні задачі розв'язують з застосуванням чисельних алгоритмів, але через це на них часто накладаються додаткові умови, в яких дані алгоритми здатні застосовуватися.

Але і з додатковими умовами не всі чисельні алгоритми здатні охопити всю сукупність практичних задач. Так розглядаючи задачу пошуку мінімуму функції Розенброка $f(x_1, x_2)$ можна зіштовхнутися з певними проблемами.

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (2)$$

Функція (2) задовольняє умові гладкості та ітераційні методи повинні бути ефективні, але точність отриманого результату сильно залежить від початкової точки наближення. Такі функції мають вигляд яру, що представлено на рис. 1, та для пошуку мінімуму потрібно рухатись вздовж його дна.

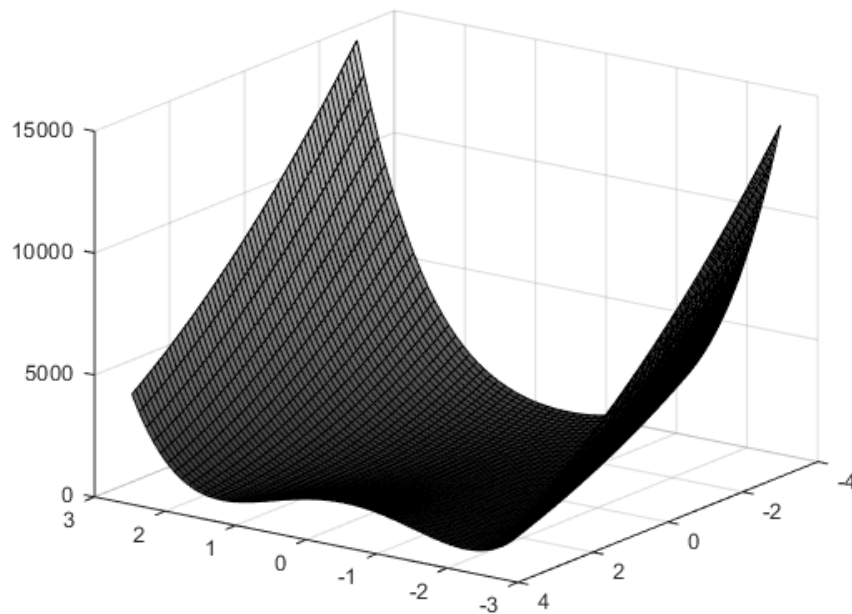
Більшість стандартних алгоритмів оптимізації розходяться на подібних функціях. Для прикладу розглянемо декілька найпопулярніших методів, що починають пошук з однієї точки та порівнюємо їх. У табл.1 наведено результати роботи найпоширених методів.

Таблиця 1 – Робота стандартних оптимізаційних методів у порівнянні із запропонованим гібридним варіантом

Метод	Хука-Дживса	Пауелла	Найшвидшого спуску	Гібридний метод
Початкова точка	(3; 3)	(3; 3)	(3; 3)	(2, 2) (3, 3)
Кінцевий результат	(3; 9)	(3; 9)	(1.7851; 3.1888)	(1.001; 1.002)

Проведений аналіз оптимізаційних процедур і особливостей розв'язку задач оптимального проектування показує, що просте накоплення ефективних методів у бібліотеці математичного забезпечення та навіть введення діалогового режиму розв'язання не може забезпечити необхідних умов оптимізації. Це пов'язано з тим, що реалізована задача не має відповідного набору ознак, за якими керуюча програма може ідентифікувати задачу та визначити необхідний метод.

Теоретична модель. Запропонований метод полягає у тому, що використовується ряд методів-гібридентів, які складають гібридну коаліцію $\{M_i\}$. Задається критерій $Q(\sigma)$, який визначає під час розв'язання, який з гібридентів найбільш ефективний у даній ситуації. Для цього вводиться функція $u = u(Q(\sigma))$, яка встановлює адаптивну стратегію введення конкретного гібридента $M_k \in \{M_i\}$, $i = 1, \dots, k, \dots, s$ (або групи гібридентів).

Рис. 1 – Графік функції $f(x_1, x_2)$

Взаємна робота гібридентів забезпечує більш ефективно досягнення цілі, ніж кожен з гібридентів окремо. Це досягається введенням спеціального адаптивного рівняння, яке отримує вектори мінімізуючих послідовностей $\{X_k^r\}$, напрямків пошуку $Dir X_k^r$ і пошукових адаптуючих кроків h_k^r , відповідно до змінної ситуації σ . В загальному вигляді адаптивне рівняння u можливо представити так

$$\begin{cases} X_k^r \\ Dir X_k^r \\ h_k^r \end{cases} = \sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) \begin{cases} X_k^{M_i} \\ Dir X_k^{M_i} \\ h_{ki} \end{cases} \\ \sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) = 1 \quad (3)$$

де $u_i(Q(\sigma_k))$ – керуючі невід’ємні функції, задані на множині $\{\sigma_k\}$, $X_k^M, Dir X_k^M, h_{ki}$ – точка, напрямок, який виходить з цієї точки та адаптуючий крок пошуку, згенеровані методом M_i відповідно, k – номер ітерації.

В якості гібридентів M_i для даного гібридного методу оптимізації обрано наступні модифікації методів [8, 9]: адаптивний покроковий спуск, схема Абрамова, яружна модифікація, метод паралельних дотичних, січний рух вздовж межі області G .

В цій роботі застосовано модифікацію яружного пошуку, в якій з двох випадкових початкових точок всередині області G проводимо одновимірний пошук

мінімуму будь-яким локальним методом, в результаті чого маємо дві точки X_1, X_2 на дні яру. Вздовж прямої, що поєднує ці точки у напрямку зменшення цільової функції робимо крок та отримуємо точку X_3 , з якої повторюємо одновимірний пошук. Знаходимо точку X_4 , після чого використовуємо напрямок, що поєднує точки X_2 і X_4 . Далі процедура повторюється. Таким чином, на кожній ітерації відбувається багатократний спуск відносно цільової функції. Використано також метод мультистарту [16].

Вагова оптимізація лопатей повітряних енергетичних установок. Лопать моделюється тонкостінним природно закрученим стрижнем змінного поперечного перерізу довжиною L , закріпленим на колесі повітряної енергетичної установки (ПЕУ). Віднесемо її до глобальної декартової системи координат (рис. 2). Тут Z_G – вісь повороту перерізів, X_G збігається з віссю вітроколеса. Напрямок Y_G такий, що глобальна система координат є правую.

Геометрія лопаті подається набором перерізів, у кожному з яких задані такі параметри профілю: координати точок (x, y) зовнішнього контуру; товщина перерізу $h(z)$; товщина лонжерону $h_1(z)$; ширина лонжерону $l(z)$ (рис. 2). Вважається, що лопать знаходиться під дією аеродинамічних навантажень та відцентрових сил. Обчислюване

аеродинамічне навантаження зводиться до розподілених поперечних навантажень q_x, q_y і

розподіленого крутного моменту m_z .

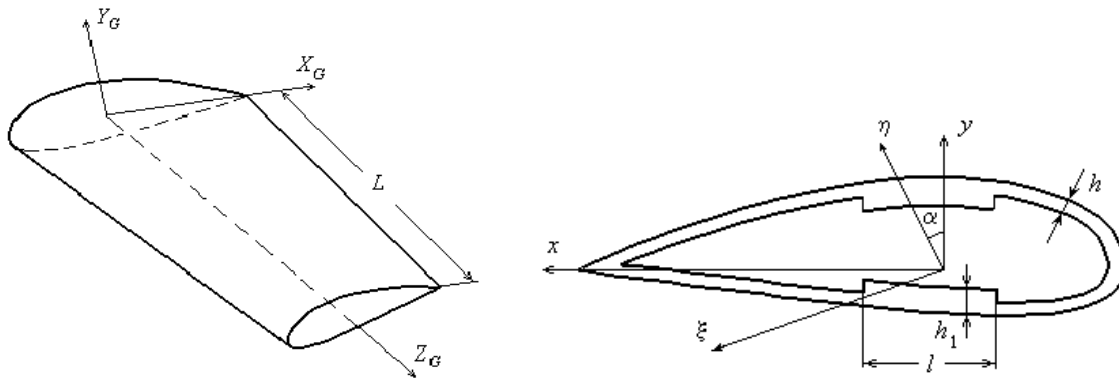


Рис. 2. – Схема лопаті повітряної енергетичної установки та її переріз

Опишемо одне з можливих формулювань задачі оптимізації лопаті вітроколеса. Потрібно знайти лопать мінімальної ваги за наступні умови. Під дією стаціонарного аеродинамічного навантаження та відцентрових сил нормальне переміщення w не повинно перевищувати заданої величини $[w]$, а напруження – величини $[\sigma]$.

$$|\max w^i| \leq [w], \quad |\max \sigma^i| \leq [\sigma], \quad i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Тут $[\sigma]$ – границя міцності, σ^i, w^i – згинальні напруження та переміщення в перерізах.

Функція мети - маса лопаті $m = \rho V$, де ρ - густина матеріалу, V – об'єм лопаті, що визначається за формулою

$$V = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} S(z) dz, \quad (5)$$

де $S(z)$ – площа перерізу, $N - 1$ – кількість перерізів.

Параметрами, що варіюються тут є товщини лопаті і параметри лонжерону в різних перерізах $h^i(z), h_1^i(z), l^i(z), i = \overline{1, N}$, рис. 2.

Сформульована задача (4) - (5) є задачею умовної оптимізації. З використанням методу штрафних функцій [9] приводимо її до розв'язання задачі умовної оптимізації. Знайти мінімум штрафної функції

$$V_p = V + A_{p1} G_1 + A_{p2} G_2 \quad (6)$$

де A_{p1}, A_{p2} – штрафні коефіцієнти,

$$G_1 = ([w] - |\max w^i|)^2, \quad G_2 = ([\sigma] - |\max \sigma^i|)^2.$$

Зазвичай обирають A_{pi} приблизно 10^3-10^4 . Тоді

функція (6) набуває яружного характеру. Для мінімізації цієї функції використано модифікацію яружного алгоритму, описану вище.

Як приклад, розглянуто лопать ПЕУ з наступними параметрами: $L = 4$ м, модуль пружності $E = 5 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, густина матеріалу $\rho = 1.6 \cdot 10^3$ кг/м³. У цьому розрахунку передбачалося, що лонжерон у перерізі відсутній, тобто $h_1 = h, l = 0$, рис.4.1. Ширина лопаті змінювалася від 1 м до 0.6 м. У процесі розв'язання задачі визначено поля переміщень та напружень у лопаті під дією аеродинамічних навантажень. Кількість перерізів приймалося рівною 7. Максимальні переміщення у площині обертання вітроколеса, нормальні до осі OZ, склали 28.5 см; максимальне згинальне напруження в кореновому перерізі лопаті становило 12.8 МПа.

У табл. 2 наведено результати розв'язання задачі оптимізації: для перерізів Z_i подані початкові значення товщини в перерізах h_0 і оптимальні параметри h^* . У початковому варіанті маса лопаті дорівнювала 19.38 кг. В результаті оптимізації отримано лопать масою 16.41 кг.

При використанні методу штрафних функцій були обрані такі значення штрафних коефіцієнтів $A_{p1} = A_{p2} = 10^4$. Подальше збільшення цих коефіцієнтів не призвело до суттєвої зміни параметрів, що варіюються.

Єдиним активним обмеженням виявилось переміщення лопаті. Власна частота коливань у процесі рахунку змінилася незначно; ці зміна не призвели до порушення заданих обмежень..

Таблиця 2 – Початкові та оптимальні параметри лопаті

Номер перерізу	Координата Z, м	Початкова товщина, мм	Оптимальна товщина, мм
1	0.800	6.0	5.04
2	1.236	5.6	4.73
3	1.818	5.0	4.21
4	2.400	4.4	3.67
5	2.836	4.0	3.25
6	3.564	3.2	2.41
7	4.000	3.0	2.19

Висновки. Проаналізовано різні методи оптимального пошуку мінімуму нелінійних функцій багатьох змінних. Запропоновано модифікацію яружного методу для пошуку мінімуму нелінійної функції багатьох змінних.

На обраному тестовому прикладі методи Пауелла та Хука-Дживса не дають точний розв'язок оптимізаційної задачі, а градієнтний метод дає розв'язок тільки лише в безпосередній близькості до мінімуму. Це відбувається через особливість вигляду функції Розенброка – ця функція має декілька мінімумів на різних координатах та суттєво виражену яружну структуру.

Через цю саме особливість запропонований нами гібридний алгоритм не надає задовільного результату при «одиночному» пошуку. Пошуковий алгоритм потрапляє до такої точки, в якій всі значення функції в оточуючих точках більші, ніж значення в отриманій точці, й алгоритм та не може подолати бар'єр. Для вирішення проблеми необхідно взяти отриману точку за нову початкову точку та повторити алгоритм пошуку мінімуму функції, тобто використати метод мультистарту.

Запропонований метод було надалі використано для розв'язання задачі оптимізації лопаті повітряної установки, яку за допомогою методу штрафних функцій зведено до проблеми безумовної оптимізації, але при цьому функція мети мала суттєво яружну структуру. Отримані оптимальні значення товщин перерізів, до дало змогу побудувати лопать з покращеними характеристиками. Результати дослідження дозволяють конструктору підібрати відповідні параметри конструкцій та оцінити їх міцність та надійність за різних умов експлуатації..

Список літератури

1. Misura S. Optimal design of the cyclically symmetrical structure under static load / S. Misura, N. Smetankina, Ie. Misiura // In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds.) ICTM 2020. LNNS, vol. 188, pp. 256–266. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_21
2. Сметанкіна Н.В. Влияние предварительно напряженного состояния на частоты несущих конструкций гидротурбин / Н.В. Сметанкіна, С.Ю. Мисюра, А.В. Линник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП». – 2018. – Т.1, № 38. – С. 42-48. DOI:10.1016/S0955-7997(01)00041-8.
3. Дегтярев К. Г. Компьютерное моделирование лопастей ветроустановок с оптимальными параметрами / К.Г. Дегтярев, Е.А. Стрельникова, Г.А. Шелудько // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління, No 19, 2012, С.81-86.

<http://mia.univer.kharkov.ua/19/30251.pdf>

4. Strelnikova E. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles / E. Strelnikova, V. Gnitko, D. Krutchenko, Y. Naumenko // J. Modern Technology & Engineering Vol.3, No.1, 2018, pp.15-52.

<http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/JTME/V3No1/StrelnikovaE.pdf>

5. Serikova E. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities / E. Serikova, E. Strelnikova, V. Yakovlev // Journal of Environment Protection and Sustainable Development. 2015. Vol. 1, pp.86-90. <https://www.researchgate.net/publication/281784323>

6. Гонтаровський П. П. Дослідження напружено-деформованого стану паливного бака вафельної конструкції ракети-носія / П. П. Гонтаровський, Н. В. Сметанкіна, Н. Г. Гармаш, А. О. Глядя, Д. В. Клименко, В. М. Сиренко // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2019. – Вип. 29. – С. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.15421/4219008>

7. Makeev V.I. On choice of design parameters for an aircraft / V.I. Makeev, E.A. Strelnikova, P.E. Trofimenko, A.V. Bondar // Int. Appl. Mech.- 2013.- Vol. 49, No. 5. - P.588-596. DOI:10.1007/s10778-013-0592-8

8. Smetankina N. Two-stage optimization of laminated composite elements with minimal mass / N. Smetankina, O. Semenets, A. Merkulova, D. Merkulov, S. Misura // Smart Technologies in Urban Engineering. STUE-2022. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Cham, 2023. – Vol. 536. – P. 456-465. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_42

9. Шелудько Г.А. Прикладний адаптивний пошук / Г.А. Шелудько, О.М. Шупіков, Н.В. Сметанкіна, С.В. Узрімов // - Харків: Око, 2001.-191 с. http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis

10. Шелудько Г.А. Гибридные методы в задачах оптимального проектирования. 1. Поиск методы / Г.А. Шелудько, Е.А. Стрельникова, Б.Я. Кантор // - Харьков: Новое слово, 2008.- 188 с. <http://irbis-nbuv.gov.ua>

11. Wang Z. Multi-objective approaches to optimal testing resource allocation in modular software systems / Z. Wang, K. Tang and X. Yao // IEEE Transactions on Reliability, Vol. 59, No 3, pp. 563–575, 2010. DOI: 10.1109/TR.2010.2057310

12. Meignan D. A review and taxonomy of interactive optimization methods in operations research / D. Meignan, S. Knust, J.-M. Frayret, G. Pesant and N. Gaud // ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS), 5(3):pp.17-29, 2015. <https://doi.org/10.1145/2808234>

13. J. M. Balera and V. A. de Santiago Ju'nior. A systematic mapping addressing hyper-heuristics within search-based software testing. Information and Software Technology, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.06.012>

14. Ghadimi, Euhanna et al. Optimal Parameter Selection for the Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM): Quadratic Problems. IEEE Transactions on Automatic Control 60, 2015: pp. 644-658. DOI: 10.1109/TAC.2014.2354892

15. Ma F. An effective iterated tabu search for the maximum bisection problem / F. Ma, J.K. Hao, Y. Wang // Comput. Oper. Res. 81, pp. 78–89 (2017). DOI: 10.1016/j.cor.2016.12.012

16. Gyorgy A. Efficient Multi-Start Strategies for Local Search Algorithms / A. Gyorgy, L. Koksis // Journal of Artificial Intelligence Research 41 (2011) 407-444. DOI:10.1613/jair.3313

References (transliterated)

1. Misura S., Smetankina N., Misiura Ie. *Optimal design of the cyclically symmetrical structure under static load*. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds.) ICTM 2020. LNNS. Vol. 188. Pp. 256–266.
2. Smetankina N.V., Misura S., Lynnyk A.V. *Vlyianye predvartelno napriazhennoho sostoiannya na chastoti nesushchykh konstruktivnykh hidroturbyn* [Influence of the prestressed state on the frequencies of the supporting structures of hydroturbines] *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Dynamika i mitsnist mashyn* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Dynamics and Strength of Machines]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018. Vol.1, no 38, pp. 42–48.
3. Dehtiarev K. H., Strelnykova E.A., Sheludko H.A. *Kompiuternoe modelirovaniye lopastei vetrostanovok s optimalnyimi parametramy* [Computer modeling of wind turbine blades with optimal parameters] *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriya: Matematychno modelivannia* [Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series: Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems]. 2012. No 19, pp. 81–86.
4. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumenko Y. *Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles*. J. Modern Technology & Engineering. 2018. Vol.3. No.1. Pp.15–52.
5. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. *Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities*. Journal of Environment Protection and Sustainable Development. 2015. Vol. 1. Pp. 86–90.
6. Hontarovskyi P. P., Smetankina N. V., Harmash N. H., Hliadia A. O., Klymenko D. V., Syrenko V. M. *Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu palyvnoho baka vafelnoi konstruktivnykh rakety-nosyia* [Study of the stress-strain state of the fuel tank of the wafer structure of the launch vehicle] *Problemy obchysluvalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruktivnykh* [Problems of computational mechanics and strength of structures] 2019. Vol. 29. Pp. 91–102.
7. Makeev V.I., Strelnikova E.A., Trofimenko P.E., Bondar A.V. *On choice of design parameters for an aircraft*. Int. Appl. Mech. 2013. Vol. 49. No. 5. Pp. 588–596.
8. Smetankina N., Semenets O., Merkulova A., Merkulov D., Misura S. *Two-stage optimization of laminated composite elements with minimal mass*. Smart Technologies in Urban Engineering. STUE-2022. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Cham, 2023. Vol. 536. Pp. 456–465.
9. Sheludko H.A., Strelnykova E. A., Kantor B. Ia. *Prykladnyi adaptivnyi poshuk* [Applied adaptive search]. Kharkiv, Oko, 2001. 191 p.
10. Sheludko H.A., Strelnykova E. A., Kantor B.Ia. *Hybridnye metody v zadachakh optimalnoho proektyrovannia* [Hybrid methods in optimal design problems]. Kharkiv, New word, 2008. 188 p.
11. Wang Z., Tang K. and Yao X. *Multi-objective approaches to optimal testing resource allocation in modular software systems*. IEEE Transactions on Reliability. 2010. Vol. 59. No 3. Pp. 563–575.
12. Meignan D., Knust S., Frayret J.-M., Pesant G. and Gaud N. *A review and taxonomy of interactive optimization methods in operations research*. Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS). 2015. Vol. 5(3). Pp. 17–29.
13. Balera J. M. and de Santiago J. A. *A systematic mapping addressing hyper-heuristics within search-based software testing*. Information and Software Technology, 2019.
14. Ghadimi, Euhanna et al. *Optimal Parameter Selection for the Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM): Quadratic Problems*. IEEE Transactions on Automatic Control. 2015. Vol. 60. Pp. 644–658.
15. Ma F., Hao J.K., Wang Y. *An effective iterated tabu search for the maximum bisection problem*. Comput. Oper. Res. 2017. Vol. 81. Pp. 78–89.
16. Gyorgy A., Koksics L. *Efficient Multi-Start Strategies for Local Search Algorithms*. Journal of Artificial Intelligence Research. 2011. Vol. 41. Pp. 407–444.

Надійшла (received) 14.06.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ланітан Костянтин Євгенович (Lapitan Konstantin Yevhenovych) – студент 5-го курсу навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики, Харківський національний універсальний ім. В. Н. Каразіна, м. Харків; тел.: (098) 392-46-35; e-mail: konstantinlapitan@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0050-405X.

Місюра Сергій Юрійович (Misura Serhii Yuriyovych) – старший науковий співробітник відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків; тел.: (050) 984-57-15; e-mail: misurasy@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5048-1610.

Лістрова Дар'я Вадимівна (Listrova Daria Vadymivna) – студентка 6-го курсу навчально наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики, м. Харків; тел.: (098) 572-49-94; e-mail: dasha14.152@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3202-8150.

Руденко Тетяна Миколаївна (Rudenko Tetiana Mykolaivna) – аспірант, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків; тел.: (068) 068-67-42; e-mail: dingata0206@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1095-2331.

Місюра Євгенія Юрійівна (Misiura Ievgeniia Iuriivna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та економіко-математичних методів, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, м. Харків; тел.: (050) 551-35-56; e-mail: misuraeu@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5697-200X.

Васильєв Анатолій Йосипович (Vasiliev Anatolii Yosypovych) – доктор економічних наук, професор, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків; тел.: (050) 325-86-97; e-mail: vasiliiiv_aj@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3985-8429.