

УДК 519.6

## Адаптивний гібридний метод оптимізації яружних функцій стосовно до задачі вагової мінімізації лопаті повітряної установки

К.Є. Лапітан, Д.В. Лістрова, Т.М. Руденко, Г.А. Шелудько

**Лапітан Костянтин  
Євгенович***Студент 5-го курсу навчально наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики;**Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022;**e-mail: [konstantinlapitan@gmail.com](mailto:konstantinlapitan@gmail.com)**<https://orcid.org/0000-0003-0050-405X>***Лістрова  
Дар'я Вадимівна***Студентка 6-го курсу навчально наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики;**Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022;**e-mail: [dasha14.152@gmail.com](mailto:dasha14.152@gmail.com)**<https://orcid.org/0000-0002-3202-8150>***Руденко  
Тетяна Миколаївна***аспірант;**Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАНУ, вул. Пожарського, 2/10, Харків, Україна, 61046;**e-mail: [dingata0206@gmail.com](mailto:dingata0206@gmail.com);**<https://orcid.org/0000-0003-1095-2331>***Шелудько  
Гелій Артемович***Науковий співробітник;**Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАНУ, вул. Пожарського, 2/10, Харків, Україна, 61046;**<https://orcid.org/0000-0003-4171-9591>*

Запропоновано адаптивний метод пошуку мінімуму нелінійної функції багатьох змінних. Метод був використаний для розв'язання оптимізаційної задачі функції у вигляді яру. Сформульовано задачу оптимізації, описано алгоритм адаптивного методу пошуку коренів функції Розенброка та проведено порівняння результатів роботи гібридного методу, методу Пауелла, Хука-Дживса та методу найшвидшого спуску. Встановлено, що ефективність запропонованого методу більша за звичні алгоритми пошуку, але не позбавлена недоліків. Запропонований метод було 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.

**Ключові слова:** *гібридний адаптивний метод, задача оптимізації, функція Розенброка, яружний пошук.*

## Adaptive hybrid optimization method for valley functions in weight minimization problems for wind turbine blades

K.E. Lapitan, D.V. Listrova, T.M. Rudenko, G.A. Sheludko

**Lapitan Konstantin***Student;**V.N. Karazin National University, 6 Svobody Square, Kharkiv, Ukraine, 61022***Listrova Daria***Student;**V.N. Karazin National University, 6 Svobody Square, Kharkiv, Ukraine, 61022***Rudenko Tetiana***Postgraduate;**Institute of Mechanical Engineering Problems A.N. Pidhorny NASU, st. Pozharsky, 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046*

**Sheludko Geliy***Researcher;**Institute of Mechanical Engineering Problems A.N. Pidhorny NASU, st. Pozharsky, 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046*

The article proposes an adaptive method for finding the minimum of an arbitrary smooth multivariable function. The method has been used to solve the benchmark optimization problem of a valley function. 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. The comparison of the results of calculating the minimum point of the function is performed by using both non-gradient and gradient methods, namely: Powell, Hook-Jeeves, the steepest descent method and the method developed. It has been found that the effectiveness of the proposed method is greater than the usual search algorithms, but it is not without its drawbacks. The method that represents a number of hybrid methods, which form a hybrid coalition is proposed. The 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 has been used to solve the problem of optimizing the blade of a wind turbine, which was reduced to the problem of unconditional optimization by using the method of penalty functions, but the goal function had a significantly valley structure. The optimal values of section thicknesses have been obtained, which makes it possible to build a blade with improved characteristics.

**Keywords:** *hybrid adaptive method, optimization problem, Rosenbrock function, ravine search.*

## 1 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 поліпшення 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 не обходиться без вирішення задач оптимального проектування. До таких задач належать проблеми раціонального проектування кришок гідротурбін [1], лопатей повітряних установок [2], відстроювання від небажаних резонансних частот при русі оболонок та оболонкових конструкцій з рідиною [3], проблеми запобігання підтопленню міських територій [4], визначення оптимальних параметрів елементів аерокосмічної техніки [5]-[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 нажалі 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.

## 2 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

$$X^* = \arg \operatorname{extr}_{X \in G} F(X), G = \{X \neq \emptyset, G_i(X) > 0, i = 1, \dots, m\} \quad (2.1)$$

де  $G_i(X)$  – обмежуючі функції на змінну  $X$ . Компоненти вектору  $X \in G$  визначають певний проект (наприклад, конструкцію з її геометричними характеристиками, а також незалежні змінні параметри та інше). Інші параметри, що входять до функціоналу  $F(X)$  та обмеження  $G_i(X)$ , можуть бути незмінними та заданими (навантаження, умови кріплення, фізико-механічні властивості матеріалу).

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.

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (2.2)$$

Функція (2.2) 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.

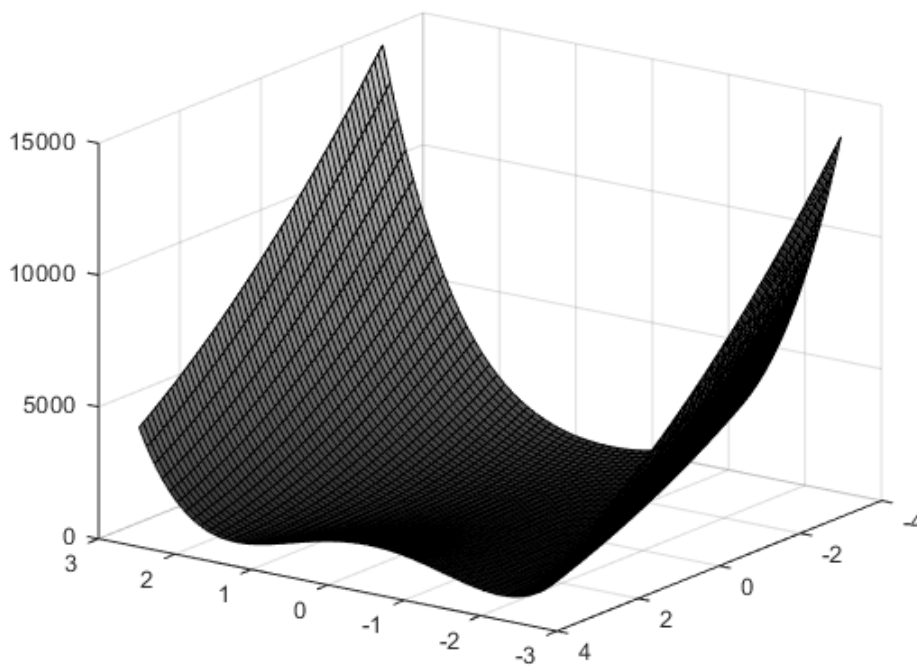


Рисунок 2.1. Графік функції  $f(x_1, x_2)$

Більшість стандартних алгоритмів оптимізації розходяться на подібних функціях. Для прикладу розглянемо декілька найпопулярніших методів, що починають пошук з однакових точок та порівняємо їх.

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 метапрограма може ідентифікувати задачу та визначити необхідний метод.

### 3 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)

Взаємна робота гібридентів забезпечує більш ефективне 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  $\sigma$ . В загальному вигляді адаптивне рівняння  $u$  можливо представити так

$$\begin{pmatrix} X_k^r \\ Dir X_k^r \\ h_k^r \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) \begin{pmatrix} X_k^{M_i} \\ Dir X_k^{M_i} \\ h_{ki} \end{pmatrix} \quad \sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) = 1 \quad (3.1)$$

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, сгенеровані 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, ярова модифікація, метод паралельних дотичних, перетинаючий рух вздовж межі області  $G$ .

В цій роботі застосовано модифікацію ярового 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 мультистартау[16]

### 4 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. 4.1). Тут  $Z_G$  - вісь повороту перерізів,  $X_G$  збігається з віссю вітроколеса. Напрямок  $Y_G$  такий, що глобальна система координат є правою.

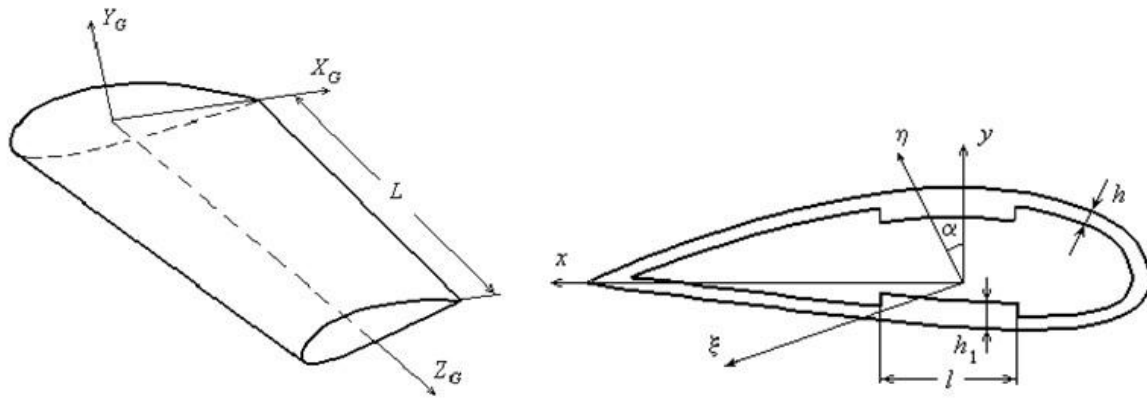


Рисунок 4.1. Схема лопаті повітряної енергетичної установки та її переріз

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.4.1). 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  $m_z$ .

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  $[\sigma]$ .

$$|\max w^i| \leq [w], \quad |\max \sigma^i| \leq [\sigma], \quad i = \overline{1, N}. \quad (4.1)$$

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

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

$$V = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} S(z) dz, \quad (4.2)$$

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.4.1.

Сформульована задача (4.1),(4.2) є задачею умовної оптимізації. З використанням методу штрафних функцій [9] приводимо її до розв'язання задачі умовної оптимізації. Знайти мінімум штрафної функції

$$V_p = V + A_{p1}G_1 + A_{p2}G_2 \quad (4.3)$$

де  $A_{p1}, A_{p2}$  – штрафні коефіцієнти,  $G_1 = ([w] - |\max w^i|)^2, G_2 = ([\sigma] - |\max \sigma^i|)^2$ . Зазвичай обирають  $A_{pi}$  приблизно  $10^3-10^4$ . Тоді функція (4.3) 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/м<sup>3</sup>. 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 28.5см; максимальне згинальне напруження в кореновому перерізі лопаті становило 12.8МПа.

У табл. 4.1 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 лопату 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.

Таблиця 4.1 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

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

## 5 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.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Місюра С. Ю., Сметанкіна Н. В., Місюра Є. Ю. Рациональное моделирование кришки гидротурбины для анализа прочности. *Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер. Динаміка і міцність машин.* 2019. № 1. С. 34–39. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44370>
2. Дегтярев К.Г., Стрельникова Е. А., Шелудько Г. А. Компьютерное моделирование лопастей ветроустановок с оптимальными параметрами / *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>
3. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumemko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles *J. Modern Technology & Engineering* Vol.3, No.1, 2018, pp.15-52.

- <http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/JTME/V3No1/StrelnikovaE.pdf>
4. 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.  
<https://www.researchgate.net/publication/281784323>
  5. Сметанкина Н.В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек. Мiськдрук, Харьков, 2011, 376 с.
  6. Хозяинов Б.П. Испытание лопастей ветро - и гидротурбин с вертикальной осью вращения / Хозяинов Б.П., Костин И.Г. // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*, 2010. Т.4. – №24, – С. 120-124.  
<https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-lopastey-vetro-i-gidroturbin-s-vertikalnoy-osyu-vascheniya>
  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. 49, No. 5, pp.588-596.  
[DOI:10.1007/s10778-013-0592-8](https://doi.org/10.1007/s10778-013-0592-8)
  8. Shupikov A.N., Smetankina N.V., Sheludko H.A. Selection of optimal parameters of multilayer plates at nonstationary loading. *Meccanica*. Vol. 33. No 6, 1998, P. 553–564.  
<https://doi.org/10.1023/A:1004311229316>
  9. Шелудько Г.А., Шупіков О.М., Сметанкіна Н.В., Угрімов С.В. Прикладний адаптивний пошук.- Харків: Око, 2001.-191 с. [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis).
  10. Шелудько Г.А., Стрельникова Е. А., Кантор Б.Я. Гибридные методы в задачах оптимального проектирования. 1. Поисквые методы. Харьков: Новое слово, 2008.- 188 с.  
<http://irbis-nbuv.gov.ua>
  11. Wang Z., Tang K., and Yao X. Multi-objective approaches to optimal testing resource allocation in modular software systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 59(3):pp. 563–575, 2010. [DOI: 10.1109/TR.2010.2057310](https://doi.org/10.1109/TR.2010.2057310)
  12. Meignan D., Knust S., Frayret J.-M, Pesant G., and Gaud N. A review and taxonomy of interactive optimization methods in operations research. *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](https://doi.org/10.1109/TAC.2014.2354892)
  15. Ma F., Hao J.K., Wang Y.: An effective iterated tabu search for the maximum bisection problem. *Comput. Oper. Res.* 81, pp. 78–89 (2017). [DOI: 10.1016/j.cor.2016.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.012)
  16. Gyorgy A.,Koksis L.: Efficient Multi-Start Strategies for Local Search Algorithms. *Journal of Artificial Intelligence Research* 41 (2011) 407-444. [DOI:10.1613/jair.3313](https://doi.org/10.1613/jair.3313)

## REFERENCES

1. Misyura S., Smetankina N., Misyura U. Rational modeling of a hydroturbine cover for strength analysis. *Bulletin of Kharkiv Polytechnic Institute, Dynamics and strength of machines*, no. 1, pp.34 – 39, 2019. [in Ukrainian]. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44370>
2. Degtyarev K. Strelnikova E. Sheludko G. Computer modeling of wind turbine blades with optimal parameters. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series: Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems*, no. 19, pp.81 – 86, 2012. URL: <http://mia.univer.kharkov.ua/19/30251.pdf> [in Russian]
3. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumemko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles *J. Modern Technology & Engineering* Vol.3, No.1, 2018, pp.15-52.

- <http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/JTME/V3No1/StrelnikovaE.pdf>
4. 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.  
<https://www.researchgate.net/publication/281784323>
  5. Smetankina, N.V.: Non-stationary deformation, thermal elasticity and optimisation of laminated plates and cylindrical shells. Miskdruk Publishers, Kharkiv, 2011, 376 p. [in Russian].
  6. Khozyainov B.P. Testing of blades of wind and hydro turbines with a vertical axis of rotation / Khozyainov B.P., Kostin I.G. // Bulletin of the S.P. Korolev Samara State Aerospace University. Academician, 2010. Vol. 4. - No. 24, - pp. 120-124. <https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-lopastey-vetro-i-gidroturbin-s-vertikalnoy-osyu-vrascheniya>
  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. 49, No. 5, pp.588-596. [DOI:10.1007/s10778-013-0592-8](https://doi.org/10.1007/s10778-013-0592-8)
  8. Shupikov A.N., Smetankina N.V., Sheludko H.A. Selection of optimal parameters of multilayer plates at nonstationary loading. *Meccanica*. Vol. 33. No 6, 1998, P. 553–564. <https://doi.org/10.1023/A:1004311229316>
  9. Sheludko GA, Shupikov OM, Smetankina NV, Ugrimov SV Applied adaptive search.- Kharkiv: Eye [http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu.gov.ua/cgiirbis](http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu.gov.ua/cgiirbis).
  10. Sheludko G.A., Strelnikova E.A., Kantor B. Ya. Hybrid methods in optimal design problems. Search methods. Kharkov: New Word, 2008.188 p. <http://irbis-nbu.gov.ua>
  11. Wang Z., Tang K., and Yao X. Multi-objective approaches to optimal testing resource allocation in modular software systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 59(3):pp. 563–575, 2010. [DOI: 10.1109/TR.2010.2057310](https://doi.org/10.1109/TR.2010.2057310)
  12. Meignan D., Knust S., Frayret J.-M, Pesant G., and Gaud N. A review and taxonomy of interactive optimization methods in operations research. *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](https://doi.org/10.1109/TAC.2014.2354892)
  15. Ma F., Hao J.K., Wang Y.: An effective iterated tabu search for the maximum bisection problem. *Comput. Oper. Res.* 81, pp. 78–89, 2017. [DOI: 10.1016/j.cor.2016.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.012)
  16. Gyorgy A.,Koksis L.: Efficient Multi-Start Strategies for Local Search Algorithms. *Journal of Artificial Intelligence Research* 41 (2011) 407-444. [DOI:10.1613/jair.3313](https://doi.org/10.1613/jair.3313)