

**О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО, І. Є. КЛОЧКОВ, В. І. СЕРИКОВ, Б. С. ВОРОНЦОВ,
І. О. КИРИЧЕНКО**

ПРИКЛАД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДВОСТУПІНЧАТОГО РЕДУКТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАНОГО ЕВОЛЮЦІЙНОГО АЛГОРИТМУ

Робота присвячена розв'язанню задачі вибору оптимальних геометричних параметрів зацеплень двоступеневого циліндричного редуктора у випадку багатьох критеріїв при використанні модифікованого еволюційного алгоритму (ЕА). Розглядається актуальність задачі, записано параметри проектування, цільові функції, обмеження на параметри проектування. Виходячи з окресленої постановки задачі, було запропоновано модифікований ЕА. Для створення початкових тестових точок було запропоновано використовувати *LP-τ* послідовність, це дає змогу зменшити початкову популяцію точок і наблизити ЕА до справді «випадкового» процесу. Розглянута схема запропонованого алгоритму, яка дає уявлення про послідовність операцій, які проводяться з популяціями тестових точок на кожному етапі еволюційного процесу. Пропонується підхід, який дає змогу перейти від багатьох критеріїв до одного шляхом введення конструктором шкали важливості та присвоєння важливості кожного з критеріїв, пошуку зміщення розв'язання для кожної пробної точки відносно бажаного, яке пропонується використовувати як об'єднуючий критерій. Наведено розв'язання конкретної задачі вибору оптимальних параметрів для редуктора. Для наданої задачі визначаються вхідні дані, числові та функціональні обмеження, формуються цільові функції. Результати розв'язання показані у кількох форматах презентації: табличному та графічному, що дає змогу якісно інтерпретувати та аналізувати результати. Зроблено висновки щодо тестування запропонованого алгоритму для розв'язання конкретної задачі оптимізації конструкції. Запропоновано подальші шляхи вдосконалення цієї методології.

Ключові слова: проектування; редуктор; раціональні параметри; еволюційний алгоритм; *LP-τ* послідовність

**А. В. БОНДАРЕНКО, А. В. УСТИНЕНКО, И. Е. КЛОЧКОВ, В. И. СЕРИКОВ, Б. С. ВОРОНЦОВ,
И. А. КИРИЧЕНКО**

ПРИМЕР МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО РЕДУКТОРА ПРИ ПОМОЩИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭВОЛЮЦИОННОГО АЛГОРИТМА

Работа посвящена решению задачи выбора оптимальных геометрических параметров зацеплений двухступенчатого цилиндрического редуктора в случае многих критериев при использовании модифицированного эволюционного алгоритма (ЕА). Рассматривается актуальность задачи, записаны параметры проектирования, целевые функции, ограничения на параметры проектирования. Исходя из обозначенной постановки задачи, был предложен модифицированный ЕА. Для создания начальных тестовых точек было предложено использовать *LP-τ* последовательность, это позволяет уменьшить начальную популяцию точек и приблизить ЕА к действительно «случайному» процессу. Рассмотрена схема предложенного алгоритма, которая дает представление о последовательности операций, проводимых с популяциями тестовых точек на каждом этапе эволюционного процесса. Предлагается подход, который позволяет перейти от многих критериев к одному путем введения конструктором шкалы важности и присвоения важности каждого из критериев, поиска смещения решения для каждой пробной точки относительно желаемого, которое предлагается использовать как объединяющий критерий. Приведены решения конкретной задачи выбора оптимальных параметров для редуктора. Для предоставленной задачи определяются входные данные, числовые и функциональные ограничения, формируются целевые функции. Результаты решения показаны в нескольких форматах презентации: табличном и графическом, что позволяет качественно интерпретировать и анализировать результаты. Сделаны выводы по тестированию предложенного алгоритма для решения конкретной задачи оптимизации конструкции. Предложены дальнейшие пути совершенствования этой методологии.

Ключевые слова: проектирование; редуктор; рациональные параметры; эволюционный алгоритм; *LP-τ* последовательность.

**О. ВОНДАРЕНКО, О. УСТЫНЕНКО, І. КЛОЧКОВ, В. СЕРИКОВ, В. ВОРОНЦОВ,
І. КИРИЧЕНКО**

EXAMPLE OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION FOR A TWO-STAGE REDUCER USING A MODIFIED EVOLUTIONARY ALGORITHM

The work is devoted to solving the problem of selecting optimal geometric parameters of gears of a two-stage cylindrical reducer using a modified evolutionary algorithm (EA). The statement of the problem is considered, design parameters, objective functions, limitations on design parameters are determined. This allowed us to propose a modification of EA. To generate the initial test points, it was proposed to use the *LP-τ* sequence, this allowed us to reduce the initial population of test points and bring EA closer to a truly «random» process. The scheme of the proposed algorithm is considered, which gives an idea of the sequence of operations that are carried out with populations of test points at each stage of the evolutionary process. The solution of the specific problem of selecting optimal parameters for a serial reducer is given. The input data, numerical and functional limitations are determined, the objective functions are formed. The results of the solution are shown in several presentation formats: tabular and graphical, which allows to qualitatively interpret and analyze the results. The approach of transition from many criteria to one is proposed by introducing the scale of importance by the designer and assigning the importance of each of the criteria, finding the desired solution for each trial point of relative bias, which is proposed to be used as a unifying criterion. Conclusions are made about testing the proposed algorithm for solving a specific problem of optimal design. Further ways of improving this methodology are proposed.

Keywords: design; reducer; rational parameters; evolutionary algorithm; *LP-τ* sequence.

Вступ. Актуальність задачі. Загальне машинобудування досить широко використовує універсальні та спеціальні двоступінчасті співвісні та розгорнуті редуктори [1], а також тривальні коробки передач, які для кожної (непрямої) передачі працюють як двоступінчасті редуктори.

Основні проблеми та труднощі при конструю-

ванні приводів цього типу обговорювалися у [2].

Було запропоновано декілька підходів для розв'язання такої задачі. Вони базувалися на використанні псевдовипадкового пошуку за *LP-τ* послі-

© О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, І. Є. Клочков, В. І. Сериков, Б. С. Воронцов, І. О. Кириченко, 2020

довністю як окремо, так і у поєднанні з іншими методами [3–5].

Також були розглянуті [6] можливості та адаптація генетичних алгоритмів для знаходження оптимальної конструкції редукторів та коробок передач.

Автори бачать можливий розвиток цього напрямку та вдосконалення аналогічних підходів до розв'язання задачі оптимального проектування такого типу приводів [7–13].

Таким чином, вирішення проблеми оптимального проектування двоступінчастого редуктора за допомогою модифікованого еволюційного алгоритму є актуальною задачею.

Параметри проектування та конструктивні критерії якості. Для розв'язання задачі оптимального проектування двоступінчастого редуктора як змінні проектування були прийняті наступні конструктивні параметри зубчастих зачеплень: m_μ – відповідні модулі пар шестерень ($\mu = 1, 2$); $z_{\mu,k}$ – відповідна кількість зубців; β_μ – кути нахилу зубців.

Розглянемо запропоновані критерії якості.

Цільова функція критерію мінімальної міжосової відстані для співвісного редуктора подана у вигляді [3, 5]:

$$F_a = a_{w1} = a_{w2} = 0,5 \cdot m_1 \cdot (z_{1,1} + z_{1,2}) \cdot \frac{1}{\cos \beta_1} = 0,5 \cdot m_2 \cdot (z_{2,1} + z_{2,2}) \cdot \frac{1}{\cos \beta_2}, \quad F_a \rightarrow \min. \quad (1)$$

Цільова функція, коли критерієм є мінімальна довжина приводу, подається у вигляді суми ширин зубчастих вінців:

$$F_L = \sum_{\mu=1}^s b_{w\mu}, \quad F_L \rightarrow \min. \quad (2)$$

Цільова функція у випадку, коли критерієм є мінімальна маса зубчастого приводу:

$$F_M = \sum_{j=1}^r M_j, \quad F_M \rightarrow \min. \quad (3)$$

Цільова функція у випадку, коли критерієм оптимальності є вірогідність безвідмовної роботи (P):

$$F_P = p(K_{nH1}) \cdot p(K_{nF11}) \cdot p(K_{nF12}) \times p(K_{nH2}) \cdot p(K_{nF21}) \cdot p(K_{nF22}), \quad F_P \rightarrow \max. \quad (4)$$

Для об'єднання усіх критеріїв у один пропонується наступний підхід.

На початковому етапі пропонується розрахувати **крок критерію**:

$$R_u = \frac{F_{u \max} - F_{u \min}}{(\alpha_{\max} + 1)}, \quad u = a, L, M, P. \quad (5)$$

Наступним етапом є визначення для кожної (s)

точки множини Q зміщення бажаного розв'язку відносно дійсного за кожним із критеріїв [14]:

$$\left\{ \begin{aligned} E_{as} &= \frac{|(F_{a \min} + \alpha_a \cdot R_a) - F_{as}|}{F_{as}}; \\ E_{Ls} &= \frac{|(F_{L \min} + \alpha_L \cdot R_L) - F_{Ls}|}{F_{Ls}}; \\ E_{Ms} &= \frac{|(F_{M \min} + \alpha_M \cdot R_M) - F_{Ms}|}{F_{Ms}}; \\ E_{Ps} &= \frac{|(F_{P \max} - \alpha_P \cdot R_P) - F_{Ps}|}{F_{Ps}}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Потім об'єднаємо критерії за зміщеннями бажаного розв'язку відносно дійсного як середнє арифметичне квадратичне зважене:

$$E_s = \sqrt{\frac{\sum_u (E_{us}^2 \cdot \alpha_u)}{\sum_u \alpha_u}}, \quad E_s \rightarrow \min. \quad (7)$$

Обмеження та функціональні зв'язки між конструктивними параметрами. Деякі обмеження можна побачити у попередніх роботах [1, 2, 5, 6, 14]. У цій роботі акцентуємо функціональні та числові обмеження, які використовуються у запропонованому алгоритмі для перевірки життєздатності тестових точок.

А) Для редукторів, зазвичай, висувається вимога відносної рівності між більшими зубчастими колесами у зачепленнях. Це дає змогу розробити більш пропорційний редуктор та забезпечити виконання умови однакового занурення коліс зачеплення у масляну ванну:

$$\max(d_{11}, d_{12}) \approx \max(d_{21}, d_{22}). \quad (8)$$

В) Для співвісного редуктора повинна виконуватися умова рівності міжосових відстаней окремих зачеплень:

$$a_{w1} = a_{w2}. \quad (9)$$

С) Числа зубців коліс повинні приймати цілі значення (мають бути натуральними – N), а також обмежені верхнім та нижнім значенням:

$$z_{22} \in N; \quad z_{\min} \leq z_{22} \leq z_{\max}. \quad (10)$$

Передавальне відношення повинно бути обмежене максимальним значенням (u_{\max}):

$$u_\mu = \frac{\max(z_{\mu,1}, z_{\mu,2})}{\min(z_{\mu,1}, z_{\mu,2})} \leq u_{\max}. \quad (11)$$

Д) Зубці коліс повинні задовольняти необхідній контактній і згинній витривалості та міцності:

$$\sigma_{H\mu} \leq \sigma_{HP\mu}; \sigma_{F\mu,k} \leq \sigma_{FP\mu,k} \quad (12)$$

Е) Повинна виконуватися умова відсутності загострення зубців по їх товщині на колі вершин:

$$s_{a\mu} \geq 0,4 \cdot m_{\mu} \quad (13)$$

Ф) Коефіцієнт ширини вінця обмежується максимальним та мінімальним значеннями:

$$\Psi_{bd\mu\min} \leq \Psi_{bd\mu} \leq \Psi_{bd\mu\max} \quad (14)$$

Модифікований еволюційний алгоритм.

Еволюційні алгоритми (ЕА) [6, 9] – це спеціальні підходи до пошуку. Вони використовуються для розв’язання задач оптимізації та моделювання станів і процесів за допомогою випадкових чи спрямованих дій та процесів з параметрами.

Розглянемо запропонований авторами ЕА для розв’язання задачі раціонального проектування двоступінчастих редукторів (рис. 1).

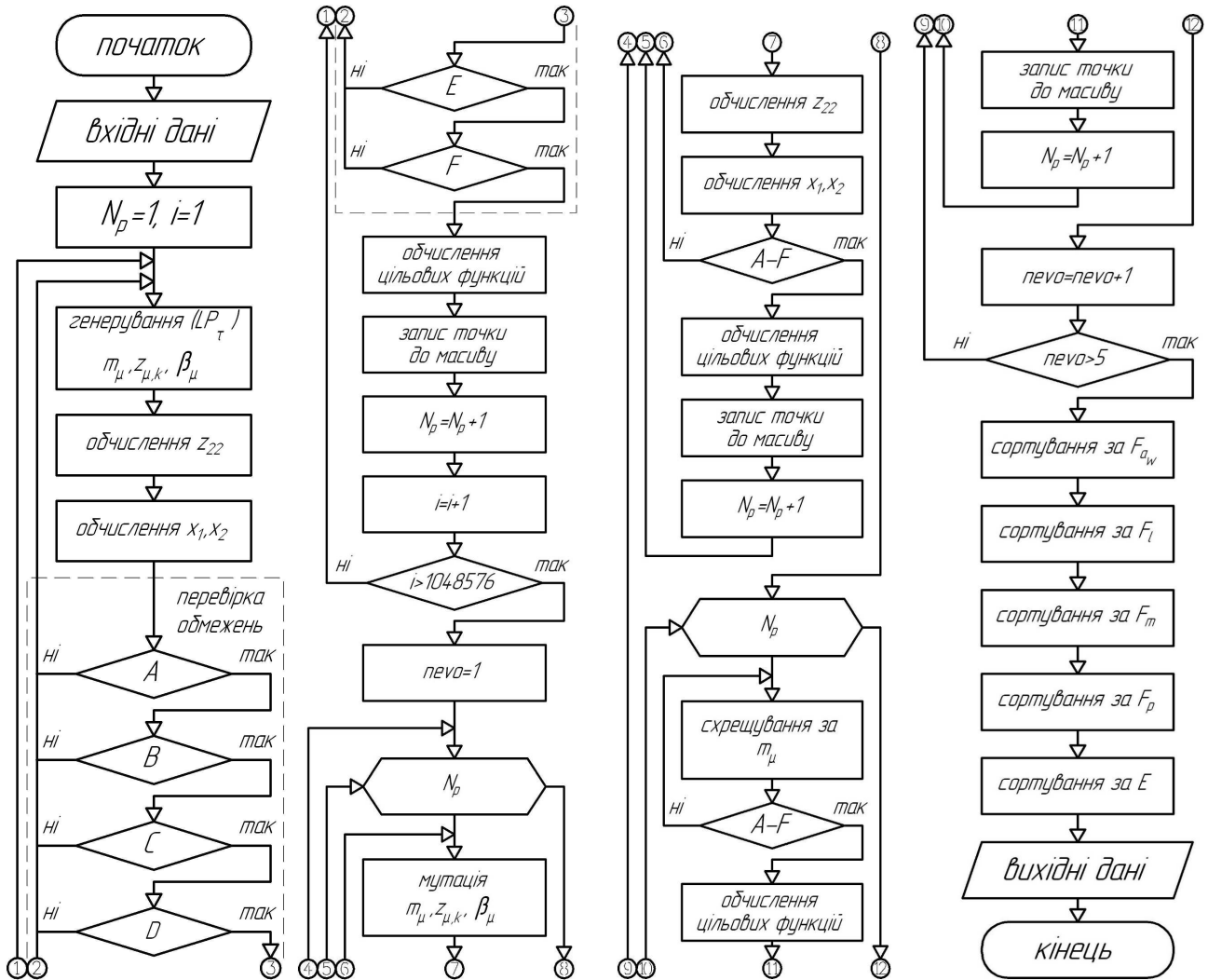


Рисунок 1 – Еволюційний алгоритм

Для наближення до природного еволюційного процесу необхідно «наситити» ЕА певною «кількістю» випадковості. В ЕА пропонується віддати на розсуд псевдовипадковому процесу наступні етапи: генерація початкової сукупності пробних точок (початкової популяції), вибір батьківських пар, схрещування та мутацію.

Після генерації початкової популяції, вона піддається аналізу життєздатності, у межах якого визначаються особини, які беруть участь у подальшому життєвому циклі. При розв’язанні технічних задач, цей аналіз відповідає операції перевірки відпо-

відності об’єкта техніко-технологічним обмеженням, що гарантує його працездатність.

Відбір батьківських пар [6] рекомендується здійснювати відповідно до стратегії панміксії.

Наступний крок – визначення способів обміну генами, тобто схрещування та мутації. Зі списку операторів мутацій автори рекомендують використовувати крокову мутацію. Із множини можливих варіантів схрещування автори обрали більш зручний у плані реалізації програмного забезпечення – багаточислове схрещування. Сформована популяція зно-

ву повинна бути проаналізована на відповідність вимогам, тобто цикл алгоритму замикається.

Таким чином, проходячи певну кількість циклів, **популяція життєздатних особин** поступово **повнюється**. У кінці циклу отримуємо популяцію точок, яка аналізується за значенням об'єднаної цільової функції та сортується. На виході алгоритму ми маємо одну або кілька провідних точок, що визначають розв'язок задачі.

Програмна реалізація алгоритму. У межах поставленої задачі було розроблено комплексний програмний комплекс у середовищі Delphi 7.

Отриманий програмний продукт легко адаптується та модифікується проектувальником за потребою, що дає змогу розвинути його для розв'язання подібних чи інших задач. Також Delphi 7 дає можливість створити візуальну оболонку програми (рис. 2). Це дає змогу досить оперативно та зручно вводити вхідні дані та динамічно переглядати вихідні дані.

	min	max	aw	dlin	massa	ver	z1.1	z1.2	z2.1	z2.2	m1	m2	bt1	bt2	x1	x2	bw1	bw2
aw	725,12108	1253,04604	-	352,61099	39724,821	0,7321518	21	136	31	131	4	5	8	7	0,5142956	0,4130921	122,98786	229,62312
dlin	118,07337	376,18087	1166,3228	-	33181,815	0,7918378	23	145	40	173	6	6	7	14	0,5142956	0,4193953	43,175874	74,897498
massa	29754,609	57003,389	853,34921	253,30706	-	0,7593913	26	125	34	193	5	4	13	13	0,5142956	0,4973784	46,082398	207,22466
ver	0,7321518	0,7948713	877,34709	262,54414	42779,470	-	18	127	30	116	6	6	4	7	0,5142956	0,3894183	78,007963	184,53618
F	0,1283344	-	1039,6822	142,38885	32557,300	0,7910137	30	187	43	188	4	5	15	12	0,5142956	0,4223549	47,578584	94,810268
77877																		
	1974	3500	8332	24397	77877													

Рисунок 2 – Загальний вигляд інтерфейсу

Приклад розв'язання оптимального проектування двоступінчастого редуктора. Як приклад розв'язання задачі здійснено оптимізацію двоступінчастого редуктора ЦД2-85, який має наступні характеристики: $m_1 = 3,5$ мм, $m_2 = 5$ мм, $\beta_1 = 8^\circ 06'$, $\beta_2 = 8^\circ 06'$, $z_{11} = 36$, $z_{12} = 162$, $z_{21} = 28$, $z_{22} = 170$, $a_w = 850$ мм.

Додаткові вхідні дані, які необхідні для розрахунку: ресурс – 10000 год.; $T_{вх} = 552$ Н·м – крутний момент на вхідному валу; $n_{вх} = 1500$ об/хв – частота обертання вхідного валу; $i_{ред} = 27,31$ – передавальне відношення.

Максимальне значення шкали важливості – 10, значення важливостей кожного з критеріїв рівні між собою та дорівнюють 1.

Результати числового експерименту з обмеженнями рівності для більших зубчастих коліс у зачепленнях (A) та без цього обмеження зведено у табл. 1 та табл. 2 відповідно.

Для більш наочної візуалізації пропонується результати розрахунку надати у вигляді полігонального графа [10]. На рис. 3 надано графічне розв'язання для варіантів з урахуванням обмеження A та без нього.

Таблиця 1 – Значення цільових функцій та параметрів проектування (з обмеженням A)

№		min	max	a_w	F_L	F_M	F_P	z_{11}	z_{12}	z_{21}	z_{22}	m_1	m_2	β_1	β_2	x_1	x_2	b_{w1}	b_{w2}
1	a_w	725,12	1253,04	-	352,61	39724,82	0,732	21	136	31	131	4	5	8	7	0,51	0,41	122,98	229,62
2	F_L	118,07	376,18	1166,32	-	33181,81	0,791	23	145	40	173	6	6	7	14	0,51	0,41	43,17	74,89
3	F_M	29754,9	57003,38	853,34	253,3	-	0,759	26	125	34	193	5	4	13	13	0,51	0,49	46,08	207,22
4	F_P	0,7321	0,7948	877,34	262,54	42779,47	-	18	127	30	116	6	6	4	7	0,51	0,38	78	184,53
5	E	0,12	-	1039,68	142,38	32557,3	0,791	30	187	43	188	4	5	15	12	0,51	0,42	47,57	94,81

Таблиця 2 – Значення цільових функцій та параметрів проектування (без обмеження A)

№		min	max	a_w	F_L	F_M	F_P	z_{11}	z_{12}	z_{21}	z_{22}	m_1	m_2	β_1	β_2	x_1	x_2	b_{w1}	b_{w2}
1	a_w	704,85	1231,92	–	336,04	32418,84	0,724	27	143	35	180	3	4	13	14	0,51	0,46	122,48	213,55
2	F_L	113,99	376,18	1159,58	–	29848,57	0,791	28	158	38	184	5	6	5	16	0,51	0,45	43,19	71,8
3	F_M	21373,1	51369,26	979,89	159,21	–	0,792	42	144	25	199	3	6	11	15	0,51	0,51	45,86	113,35
4	F_P	0,7238	0,7937	857,21	252,17	37472,12	–	21	129	29	129	5	6	4	10	0,51	0,42	87,14	165,02
5	E	0,125	–	980,97	151,68	24239,9	0,791	47	198	29	188	2,5	6	9	14	0,51	0,51	51,12	100,55

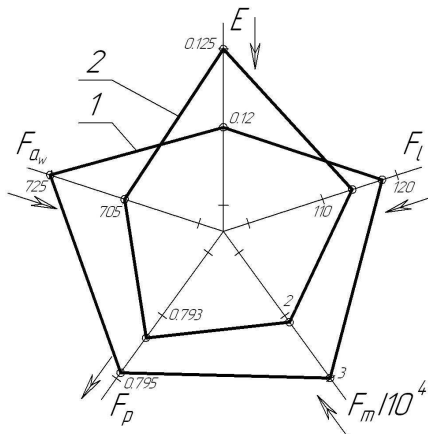


Рисунок 3 – Полігональний граф розв'язання задачі з урахуванням (1) та без (2) обмеження A

Висновки:

1. Розглянуто актуальність задачі та необхідність розробки нових підходів до проектування приводів з оптимальними конструктивними параметрами при багатьох критеріях.

2. Перевірка обмежень виконується у запропонованій послідовності, яка дає змогу скоротити загальний час оптимізації за рахунок своєчасного відсіву пробних точок, які не відповідають вимогам.

3. Запропоновано модифікований еволюційний алгоритм, який дає змогу значно збільшити кількість життєздатних осіб, тобто тестових точок, що задовольняють числовим та функціональним обмеженням.

4. Було здійснено числовий експеримент, метою якого було тестування запропонованого алгоритму та отримання адекватних вихідних даних. Універсальність та зручність запропонованого програмного продукту дає змогу швидко змінювати вхідні дані та, при необхідності, модифікувати його.

5. Наведено графічний варіант інтерпретації вихідних даних для кращої візуалізації та сприйняття.

Список літератури

1. Бондаренко О. В., Устиненко О. В. Оптимізації співвісних ступінчастих приводів машин по масогабаритним характеристикам на прикладі тривальних коробок передач. *Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск "Машинознавство та САПР"*. Харків, НТУ "ХПІ", 2012. № 22. С. 16–27.
2. Бондаренко О. В., Устиненко О. В., Сериков В. І. Рациональное проектирование зубчатых цилиндрических двоступенчатых редукторов с учетом уровня напряженности зацеплений. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу*. Харків, НТУ "ХПІ", 2015. № 35. С. 23–27.
3. Соболев И. М., Статников Р. Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва, Дрофа, 2006.

175 с.

4. Анохин А. М., Глотов В. А., Павельев В. В., Черкашин А. М. Методы определения коэффициентов важности критериев. *Автоматика и телемеханика*. Москва, Институт проблем управления, 1997. № 8. С. 3–35.
5. Бондаренко О. В. Суміщення методів ЛПТ-пошуку та зведення околів при оптимізації тривальних коробок передач. *Механіка та машинобудування*. Харків, НТУ "ХПІ", 2010. № 1. С. 78–84.
6. Бондаренко О. В., Устиненко О. В., Сериков В. І. Можливості використання та адаптація генетичних алгоритмів для раціонального проектування зубчатих циліндричних редукторів та коробок передач. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ "ХПІ", 2019. № 7. С. 23–29.
7. John H. Hollan. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975. 183 p.
8. Панченко Т. В. *Генетические алгоритмы*. Астрахань, Астраханский университет, 2007. 87 с.
9. Чигур І. І., Чигур Л. Я. *Генетичні та еволюційні алгоритми: Навчальний посібник*. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2016. 85 с.
10. Лисенко С. М., Стопчак Д. І., Самотес В. В. Метод виявлення кіберзагроз на основі еволюційних алгоритмів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 6. С. 81–88.
11. Меньяйлов Е. С. Обзор и анализ существующих модификаций генетических алгоритмов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 70. С. 244–254.
12. Будорацька Т. Л., Свирипа Г. Л. Генетичні алгоритми у вирішенні економічних задач. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Економіка: реалії часу і перспективи" (29–30 жовтня 2015 р.)*. Одеса, ОНПУ, 2015. С. 32–34.
13. Козин І. В., Батовський С. Е., Сардак В. І. Фрагментарная модель и эволюционный алгоритм 2d упаковки объектов. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки*. 2017, вип. 15. С. 74–79.
14. Бондаренко О. В., Устиненко О. В., Сериков В. І. Приклад рационального проектирования зубчатого цилиндрического двоступенчатого редуктору методом псевдовипадкового пошуку при багатьох критеріях. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ "ХПІ", 2018. № 25 (1301). С. 31–35.

References (transliterated)

1. Bondarenko O. V., Ustylenko O. V. Optimizatsiyi spivvisnykh stupinchastykh pryvodiv mashyn po masohabarytnym kharakterystykam na prykladi tryval'nykh korobok peredach [Optimization of coaxial step machine drives the weight and size characteristics on the example of three-shaft gearboxes]. *Visnyk NTU "KhPI". Tematychnyj vyputsk "Mashynoznavstvo ta SAPR"* [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 22, pp. 16–27.
2. Bondarenko O. V., Ustylenko O. V., Serykov V. I. Racional'ne proektuvannja zubchastyh cylindrychnykh dvostupinchastyh reduktoriv z urahuvannjam rivnja napruzhenosti zachepljen' [The rational design of two-stage cylindrical gear reducers taking into account level of gears tension]. *Visnyk NTU "KhPI". Serija: "Problemy mehanichnogo pryvodu"* [Bulletin of the NTU KhPI. Series: Problems of mechanical drive]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 35, pp. 23–27.
3. Sobol' I. M., Statnikov R. B. *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami* [The choice of optimal parameters in

- problems with many criteria]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 175 p.
4. Anohin A. M., Glotov V. A., Pavel'ev V. V., Cherkashin A. M. Metody opredeleniya koefitsientov vazhnosti kriteriev [Methods for determining the importance of criteria]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics]. Moscow, Institut problem upravleniya Publ., 1997, no. 8, pp. 3–35.
 5. Bondarenko O. V. Sumishchennya metodiv LPt-poshuku ta zvuzhennya okoliv pry optymizatsiyi tryval'nykh korobok peredach [Combination of methods of LPt-search and narrowing of ranges during optimization of three-shaft gearboxes]. *Mekhanika ta mashynobuduvannya* [Mechanics and machine building]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2010, no. 1, pp. 78–84.
 6. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V., Serykov V. I. Mozhlyvosti vykorystannja ta adaptacija genetychnykh alhorytmiv dlja racional'nogo proektuvannja zubchastyh cylindrychnykh reduktoriv ta korobok peredach [Possibility of use and adaptation of genetic algorithms for rational design of toothed helical reducers and gearboxes]. *Visnyk NTU "KhPI". Serija: "Mashynoznavstvo ta SAPR"* [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 7, pp. 23–29.
 7. John H. Hollan. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975. 183 p.
 8. Panchenko T.V. *Genetycheskie algoritmy* [Genetic Algorithms]. Astrakhan', Astrakhanskij universitet Publ., 2007. 87p.
 9. Chygur I. I., Chygur L. Ja. *Genetychni ta evoljucijni alhorytmy: Navchal'nyj posibnyk* [Genetic and evolutionary algorithms: A Training Manual]. Ivano-Frankivsk, IFNTUNG Publ., 2016. 85 p.
 10. Lysenko S. M., Stopchak D. I., Samotes V. V. Metod vyjavlennja kiber-zagroza na osnovi evoljucijnykh alhorytmiv [Cyber-threat detection method based on evolutionary algorithms]. *Visnyk Hmel'nyts'kogo nacional'nogo universytetu. Tehnichni nauky* [Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences]. 2017, no. 6, pp. 81–88.
 11. Menjajlov E.S. Obzor i analiz sushhestvujushchih modifikacij genetycheskich algoritmov [Review and analysis of existing modifications of genetic algorithms]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija* [Aerospace Engineering and Technology]. 2015, no. 70, pp. 244–254.
 12. Budorac'ka T.L., Svyrypa G.L. Genetychni alhorytmy u vyrishenni ekonomichnykh zadach [Genetic algorithms in solving economic problems]. *Materialy mizhnarodnoi' nauko-vedychnoi' konferencii "Ekonomika: realii' chasu i perspektivy" (29–30 zhovtnja 2015 r.)* [Proceedings of the international scientific-practical conference "Economics: the realities of time and prospects" (October 29–30, 2015)]. Odesa, ONPU Publ., 2015, pp. 32–34.
 13. Kozin I. V., Batovskij S. E., Sardak V. I. Fragmentarnaja model' i jevoljucionnyj algoritm 2d upakovki ob'ektov [Fragmented model and evolutionary 2d object packing algorithm]. *Matematyčne ta komp'juterne modeljuvannja. Serija: Fyzyko-matematychni nauky* [Mathematical and computer modelling. Series: Physical and mathematical sciences]. 2017, vol. 15, pp. 74–79.
 14. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V., Serykov V. I. Pryklad racional'nogo proektuvannja zubchastogo cylindrychnogo dvostupinchastogo reduktora metodom psevdovupadkovogo poshuku pry bagat'oh kryterijah [Example of rational design of toothed cylindrical gears using pseudo-random method search with multiple criteria]. *Visnyk NTU "KhPI". Serija: "Mashynoznavstvo ta SAPR"* [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 25 (1301), pp. 31–35.

Надійшла (received) 30.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олексій Вікторович (Бондаренко Алексей Викторович, Bondarenko Oleksiy) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (067) 189-97-00; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; e-mail: avbondko@gmail.com

Устиненко Олександр Віталійович (Устиненко Александр Витальевич, Ustynenko Oleksandr) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6714-6122>; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org

Клочков Ілля Євгенович (Клочков Илья Евгеньевич, Klochkov Illia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-01; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4923-2833>; e-mail: s008@tmm-sapr.org

Сериков Володимир Іванович (Сериков Владимир Иванович, Serykov Volodymyr) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: SerikovVI@tmm-sapr.org

Воронцов Борис Сергійович (Воронцов Борис Сергеевич, Vorontsov Borys) – доктор технічних наук (Dr. habil. of Eng. S.), доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри технології машинобудування; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1174-0971>; e-mail: vorontsov@gmail.com

Кириченко Ірина Олексіївна (Кириченко Ирина Алексеевна, Kyrychenko Iryna) – доктор технічних наук (Dr. habil. of Eng. S.), професор, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, професор кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті; м. Сєверодонецьк, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3971-4871>; e-mail: i_kir@ukr.net