

**О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО, В. І. СЕРИКОВ**

### **ПРИКЛАД РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЗУБЧАСТОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО ДВОСТУПІНЧАСТОГО РЕДУКТОРУ МЕТОДОМ ПСЕВДОВИПАДКОВОГО ПОШУКУ ПРИ БАГАТЬОХ КРИТЕРІЯХ**

Стаття присвячена задачі раціонального проектування широко розповсюджених зубчастих циліндричних двоступінчастих редукторів при декількох критеріях. Розглядаються питання пошуку оптимально-раціональних геометричних параметрів, які задовольняють декільком критеріям якості. Усі складності компоновки та взаємозв'язок параметрів унеможливають їх вибір без використання підходів математичної оптимізації. Використання відомого псевдо-випадкового методу ЛПт-пошуку з авторською модифікацією дало змогу уникнути проблем пов'язаних з дискретністю та кількістю параметрів. Для розв'язання вказаної задачі було сформовано постановку задачі та вказані параметри проектування з обмеженнями, записані критерії та запропоновано підхід переходу від багатокритеріальної до однокритеріальної задачі. Підхід базується на аналізі пробних точок, що отримані при використанні ЛПт-пошуку, та подальшій обробці отриманої інформації. Запропоновано підхід переходу від багатьох критеріїв до одного за допомогою введення проектувальником шкали важливості та призначення важливості кожного з критеріїв, і знаходження для кожної пробної точки відносного зміщення бажаного розв'язання, що й пропонується використовувати у якості об'єднуючого критерію. Проведено тестові числові експерименти.

**Ключові слова:** проектування, редуктор, критерії, цільова функція, раціональні параметри, алгоритм, ЛПт-пошук, напруженість.

**А. В. БОНДАРЕНКО, А. В. УСТИНЕНКО, В. И. СЕРИКОВ**

### **ПРИМЕР РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО РЕДУКТОРА МЕТОДОМ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО ПОИСКА ПРИ МНОГИХ КРИТЕРИЯХ**

Статья посвящена задаче рационального проектирования широко распространенных зубчатых цилиндрических двухступенчатых редукторов при нескольких критериях. Рассматриваются вопросы поиска оптимально-рациональных геометрических параметров, которые удовлетворяют нескольким критериям качества. Все сложности компоновки и взаимосвязь параметров делают сложным их выбор, что упрощается при использовании подходов математической оптимизации. Использование известного псевдо-случайного метода ЛПт-поиска с авторской модификацией позволило избежать проблем связанных с дискретностью и количеством параметров. Для решения указанной задачи было сформировано постановку задачи и указаны параметры проектирования с ограничениями, записанные критерии и предложен подход перехода от многокритериальной к однокритериальной задаче. Подход базируется на анализе пробных точек, полученных при использовании ЛПт-поиска, и дальнейшей обработке полученной информации. Предложен подход перехода от многих критериев к одному с помощью введения проектировщиком шкалы важности и назначения важности каждого из критериев, нахождения для каждой пробной точки относительного смещения желаемого решения, что и предлагается использовать в качестве объединяющего критерия. Проведены тестовые численные эксперименты.

**Ключевые слова:** проектирование, редуктор, критерии, целевая функция, рациональные параметры, алгоритм, ЛПт-поиск, напряженность.

**O. V. BONDARENKO, O. V. USTYNENKO, V. I. SERYKOV**

### **EXAMPLE OF RATIONAL DESIGN OF TOOTHED CYLINDRICAL GEARS USING PSEUDO-RANDOM METHOD SEARCH WITH MULTIPLE CRITERIA**

The article is devoted to the problem of rational design of widespread toothed cylindrical gears with multiple criteria. The problems of finding optimal rational geometric parameters that meet several quality criteria. All the complexity of the layout and connection options make impossible their choice without using mathematical optimization approaches. Using the known pseudo-random method *LPt*-search author of the modification made to avoid problems associated with discrete and number of parameters. To solve the said problem The problem was formed and the parameters of design limitations, written criteria and approach to the transition from a multicriterion to one-criterion problem. The approach is based on analysis of test points that obtained using *LPt*-search, and further processing of the information received. The approach of transition from one to many criteria by introducing designer of the scale and importance of the appointment of the importance of each criterion, and finding for each test point relative displacement desired solution, which is proposed to use as a unifying criterion. Test numerical experiments were carried out.

**Keywords:** design, gear, criteria, objective function, rational parameters, algorithm, *LPt*-search, tension.

**Актуальність задачі.** Широке застосування у машинобудуванні набули зубчасті редуктори, які використовуються для зміни обертального моменту та частоти обертання. Їхніми найбільш яскравими та розповсюдженими представниками є циліндричні редуктори. Частіше застосовуються двоступінчасті редуктори, які можуть бути виконані як у розгорнутій, так і у співвісній компоновках.

Складністю проектування такого типу приводів є розподілення передавальних чисел між ступенями редуктора, та, як наслідок, обрання відповідних конструктивних параметрів. Також у ході проектування необхідно забезпечити рівномірність зубчастих зачеплень.

Зазвичай, при проектуванні технічних систем інженер стикається з дилемою, бо широкий спектр ви-

мог до виробу приводить до появи декількох критеріїв якості. Більшість задач оптимального проектування співвісних ступінчастих приводів також є багатокритеріальними. З точки зору проектування редуктора, зазвичай, виділяють наступні найбільш значущі масогабаритні характеристики: міжосьова відстань (співвісні редуктори) чи сумарна міжосьова відстань, довжина, маса редуктору та "інтегральна" величина, яка містить в собі всі розрахункові коефіцієнти запасу згинних та контактних напружень.

Одночасне досягнення кращих характеристик завжди є суперечливим, складним та суб'єктивним процесом, тому доцільно використати при проектуванні підходи багатокритеріальної математичної оптимізації.

Для розв'язання даної задачі запропоновано псевдовипадковий пошук. Він базується на зондуванні простору параметрів, де у якості пробних точок в одиничному багатомірному кубі використовуються точки ЛПТ-послідовності [1]. А усі критерії об'єднуються в один.

При такому підході до розв'язання задачі постають наступні питання:

- формулювання цільових функцій, що відповідають критеріям;
- розробка підходу та алгоритму об'єднання критеріїв, які дають змогу звести задачу до однокритеріальної;
- комп'ютерна реалізація запропонованого алгоритму;
- представлення і інтерпретація отриманих результатів.

Таким чином, реалізація такого підходу до раціонального проектування двоступінчастого редуктора при декількох критеріях, з об'єднанням їх у один, та проведення тестових розв'язань задачі раціонального проектування двоступінчастих редукторів є актуальною.

**Конструктивні параметри та критерії проектування.** Для розв'язання задачі оптимально-раціонального проектування у якості змінних проектування прийняті наступні конструктивні параметри редуктора [2, 3]:  $m_\mu$  – відповідні модулі пар зубчастих коліс ( $\mu = 1, 2$ );  $z_{\mu,k}$  – відповідні числа зубців коліс,  $k$  – номер колеса у зачепленні ( $k = 1$  – ведуче колесо,  $k = 2$  – ведене колесо);  $\beta_\mu$  – кути нахилу зубців у зачепленнях.

Розглянемо послідовно запропоновані критерії якості двоступінчастого редуктора.

*Цільову функцію критерію мінімальної міжосьової відстані* для співвісної компоновки представимо у вигляді [2, 3]:

$$F_a = a_{w1} = a_{w2} = 0.5 \cdot m_1 \cdot (z_{1,1} + z_{1,2}) \cdot \frac{1}{\cos \beta_1} = \\ = 0.5 \cdot m_2 \cdot (z_{2,1} + z_{2,2}) \cdot \frac{1}{\cos \beta_2}, \quad F_a \rightarrow \min. \quad (1)$$

*Цільову функцію у випадку, коли критерієм оптимальності є мінімальна довжина редуктора* представимо як суму ширин зубчастих коліс, не враховуючи інші геометричні показники (розміри зазорів, підшипників, синхронізаторів, тощо). Ця сума ширин якісно характеризує вказаний критерій, тобто:

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

*Цільова функція у випадку, коли критерієм оптимальності є мінімальна маса редуктора.* Основна маса редуктора складається з мас наступних елементів: зубчастих коліс, валів, підшипників та картеру. Але для розв'язання представленої задачі запропоновано оцінювати лише маси зубчастих коліс. Запишемо цільову функцію у вигляді:

$$F_M = \sum_{j=1}^r M_{\text{кол}}, \quad F_M \rightarrow \min, \quad (3)$$

*Цільову функцію у випадку, коли критерієм оптимальності є вірогідність безвідмовної роботи (P),* запропоновано [4] представити у вигляді добутку вірогідностей безвідмовної роботи передач за контактом та згином:

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

**Обмеження та функціональні залежності між конструктивними параметрами.**

1) Міжосьові відстані зачеплень при співвісній компоновці повинні бути рівні між собою, тобто:

$$a_{w1} = a_{w2}. \quad (5)$$

2) Зубці коліс повинні мати необхідну контактну витривалість:

$$\sigma_{H\mu} \leq \sigma_{HP\mu}. \quad (6)$$

3) Зубці коліс повинні мати необхідну згинну міцність:

$$\sigma_{F\mu,k} \leq \sigma_{FP\mu,k}. \quad (7)$$

4) Модуль зубців є основним параметром зубчастого зачеплення. Вони стандартизовані (ГОСТ 9563–80). Приймаємо для розрахунків наступний ряд:

$$m_\mu = 1; \dots; 2,75 \text{ мм}. \quad (8)$$

5) Числа зубців коліс повинні приймати цілі значення (мають бути натуральними –  $N$ ), а також обмежені верхнім та нижнім значенням з міркувань технології виготовлення:

$$z_{\mu,k} \in N; \quad z_{\min} \leq z_{\mu,k} \leq z_{\max}. \quad (9)$$

6) З вимоги габаритного співвідношення зубчастих коліс передавальні числа не повинні перевищувати певне значення ( $u_{\max}$ ):

$$u_\mu = \frac{\max(z_{\mu,1}, z_{\mu,2})}{\min(z_{\mu,1}, z_{\mu,2})} \leq u_{\max}. \quad (10)$$

7) Кути нахилу зубців зубчастих коліс повинні бути у межах від  $\beta_{\min}$  до  $\beta_{\max}$ :

$$\beta_{\min} \leq \beta_\mu \leq \beta_{\max}. \quad (11)$$

8) Коефіцієнт ширини вінця також обмежується крайніми значеннями:

$$\Psi_{bd\mu\min} \leq \Psi_{bd\mu} \leq \Psi_{bd\mu\max}. \quad (12)$$

9) Повинна виконуватися умова відсутності заострення вершин зубців:

$$S_{a\mu} \leq 0.4 \cdot m_\mu. \quad (13)$$

**Підхід та послідовність розв'язання задачі.** Як відомо з [1], метод ЛПт-пошуку базується на ЛПт-рівномірно-розподілених послідовностях та дає змогу оперувати значною кількістю параметрів (до 51) та кількістю рівномірно-розподілених пробних точок (до  $2^{20}$ ).

Підхід побудовано на позиції дослідження точками ЛПт-рівномірно-розподіленої ( $A_i$ ) послідовності усього можливого простору параметрів ( $W$ ), що визначається технічними та технологічними вимогами до типу привода, що розглядається.

Потім точки проходять перевірку у певній послідовності, яка дає змогу вчасно відсіяти "непридатні" точки, і тим самим скоротити час машинних розрахунків. З точок, що пройшли перевірку, складається множина, яка задовольняє умовам проектування ( $Q$ ,  $Q \in W$ ).

Досить часто використовується лінійне згортання критеріїв при розв'язанні багатокритеріальних задач оптимізації. Але лінійне згортання має суттєвий недолік – величина одержаної функції не має ніякого фізичного змісту.

Авторами було запропоновано відійти від лінійного згортання [5] та проводити об'єднання критеріїв у послідовності, що розглянута нижче.

Проектувальнику пропонується ввести **шкалу важливості**, яка буде застосовуватися для всіх критеріїв. У цій шкалі важливість ( $\alpha$ ) може змінюватися від 0 до  $\alpha_{\max}$  з кроком 1, значення  $\alpha_{\max}$  також обирається проектувальником самостійно:  $\alpha = 0, 1, 2, \dots, \alpha_{\max}$ ; таким чином, проектувальник може самостійно обирати рівень дискретизації шкали важливості. Значення  $\alpha = 0$  відповідає абсолютній пріоритетності критерію, значення  $\alpha = \alpha_{\max}$  відповідає відносній неважливості критерію. Для кожного з критеріїв ( $F_a, F_L, F_M, F_P$ ) проектувальник самостійно призначає відповідні значення **важливості** ( $\alpha_a, \alpha_L, \alpha_M, \alpha_P$ ). Важливостям можуть призначатися значення у межах прийнятої шкали, не є винятком ситуація рівності значень важливості будь-яких критеріїв, що дає змогу реалізувати ієрархічні, бінарні чи будь-які інші зв'язки та співвідношення між критеріями.

Після цього проводиться генерування пробних точок ЛПт-рівномірно-розподіленої послідовності усього можливого простору параметрів. Пробні точки перевіряються за обмеженнями та функціональними залежностями (5–13), відібрані точки складають множину розв'язання  $Q$ .

Для всіх точок множини  $Q$  окремо розраховуються значення всіх критеріїв за відповідними цільовими функціями (1–4). Після цього визначаються максимальне ( $F_{a \max}, F_{L \max}, F_{M \max}, F_{P \max}$ ) та мінімальне ( $F_{a \min}, F_{L \min}, F_{M \min}, F_{P \min}$ ) значення для кожного критерію.

Далі пропонується обчислити **крок критерію** [1]:

$$R_u = \frac{F_{u \max} - F_{u \min}}{(\alpha_{\max} + 1)}, u = a, L, M, P. \quad (14)$$

Наступним етапом є визначення для кожної(s) точки множини  $Q$  **зміщення бажаного розв'язання** відносно дійсного за кожним з критеріїв [1]:

$$\begin{cases} E_{a s} = \frac{|(F_{a \min} + \alpha_a \cdot R_a) - F_{a s}|}{F_{a s}}; \\ E_{L s} = \frac{|(F_{L \min} + \alpha_L \cdot R_L) - F_{L s}|}{F_{L s}}; \\ E_{M s} = \frac{|(F_{M \min} + \alpha_M \cdot R_M) - F_{M s}|}{F_{M s}}; \\ E_{P s} = \frac{|(F_{P \max} - \alpha_P \cdot R_P) - F_{P s}|}{F_{P s}}. \end{cases} \quad (15)$$

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

$$E_s = \sqrt{\frac{\sum_u (E_{u s}^2 \cdot \alpha_u)}{\sum_u \alpha_u}}, E_s \rightarrow \min. \quad (16)$$

Таким чином у проектувальника з'являється можливість розв'язувати багатокритеріальні задачі, перетворюючи їх на однокритеріальні, а введений критерій має фізичний зміст – відносне наближення проної точки до бажаного розв'язання.

**Програмна реалізація алгоритму оптимізації.** Зважаючи на представлений алгоритм [4] оптимально-раціонального проектування редуктора, який об'єднує наданий підхід, математичну модель задачі (цільові функції та обмеження на змінні проектування) та раціональні логічні послідовності операцій, було розроблено інтегрально-об'єднаний програмний комплекс. Його реалізація здійснювалася у середовищі Delphi 7, бо програмна мова цього пакету дає змогу якісно та раціонально описати увесь алгоритм, є досить зручною у використанні.

Отримана програма має блочно-процедурну структуру, тому може бути з легкістю модифікована за бажаннями проектувальника, це дає можливість проводити оптимально-раціональне проектування інших типів зубчастих редукторів з нерухомими паралельними вісями валів.

Також, однією з переваг Delphi 7 є можливість створення візуальної оболонки програми у вигляді стандартного вікна. Це дає можливість користувачу легко вводити потрібні вхідні дані та зручно здійснювати перегляд отриманих даних.

Загальний вигляд вікна програми для вводу вхідних даних представлений на рис. 1.

**Приклад розв'язання задачі проектування редуктора з раціональними параметрами.** У якості прикладу розв'язання задачі наведено циліндричний двоступінчастий співвісний редуктор до фланцевого електро-

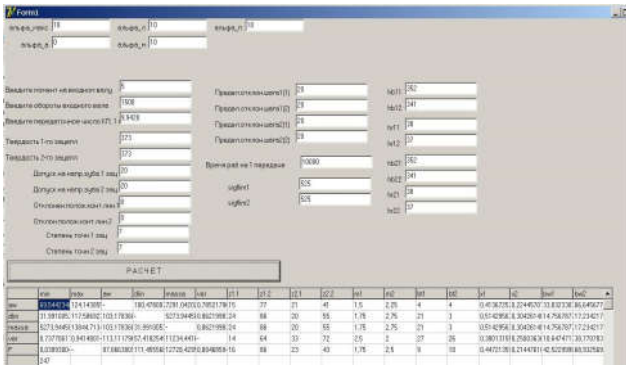


Рис. 1 – Інтерфейс вікна програми

двигуна, КРЗ. Який має наступні конструктивні параметри:  $m_1 = 1,25$  мм,  $m_2 = 1,5$  мм,  $\beta_1 = 16^\circ 16'$ ,  $\beta_2 = 8^\circ 07'$ ,  $z_{11} = 35$ ,  $z_{12} = 87$ ,  $z_{21} = 21$ ,  $z_{22} = 84$ ,  $a_w = 80$  мм. Відповідно до особливостей конструкції, технологічних та технічних обмежень, що на неї накладено, прийняті наступні основні вхідні дані для числового експерименту.

Числові обмеження на зміни проектування:  $m_i$  згідно умові (8);  $z_{i,k \min} = 13$ ,  $z_{i,k \max} = 100$ ;  $\beta_{i \min} = 0^\circ$ ,  $\beta_{i \max} = 30^\circ$ .

Вхідні дані, що відповідають конструкторським та технологічним вимогам до редуктора в цілому

та його зачеплень:  $T_{вх} = 5Н \cdot м$  – обертовий момент на вхідному валі;  $n_{вх} = 1500$  об/хв – частота обертання вхідного валу;  $i_{ред} = 9,9428$  – передавальне відношення редуктора за абсолютною величиною;  $HB_{\mu} = 350$  – твердість зубчастих коліс для всіх зачеплень за Бригнелем; ступінь точності для всіх зубчастих зачеплень – 8 за ГОСТ 1643-81; ресурс редуктора – 10000 г.

Результати *першого* числового експерименту зведено у табл. 1. Строки 1-4 відповідають бажаним крайнім значенням цільових функцій у випадку однокритеріального оптимально-раціонального проектування. Значення цих строк є постійними для кожного експерименту у межах одного простору параметрів. Результати *другого-шостого* числових експериментів зведено у табл. 2. Строки 1–5 відповідають мінімальним значенням об'єднаного критерію при  $\alpha_{\max} = 10$  та відповідних значень *важливостей*  $\alpha_a, \alpha_L, \alpha_M \cdot \alpha_P$ . Для більш наглядної інтерпретації та аналізу отриманих результатів *першого* (рис. 2, а) та *другого-шостого* (рис. 2, б) числових експериментів запропоновано отриману числову інформацію відобразити у вигляді графів.

Таблиця 1 – Значення цільових функцій та параметрів проектування числового експерименту №1

№ з/п		min	max	$a_w$	$F_L$	$F_M$	$F_P$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{21}$	$z_{22}$	$m_1$	$m_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$x_1$	$x_2$	$b_{w1}$	$b_{w2}$
1	$a_w$	69,54	124,14	-	100,47	7291,04	0,785	15	77	21	41	1,5	2,25	4	4	0,41	0,22	33,83	66,64
2	$F_L$	31,99	117,58	103,17	-	5273,94	0,862	24	86	20	55	1,75	2,75	21	3	0,51	0,3	14,75	17,23
3	$F_M$	5273,9	13844,71	103,17	31,99	-	0,862	24	86	20	55	1,75	2,75	21	3	0,51	0,3	14,75	17,23
4	$F_P$	0,73	0,941	113,11	57,41	11234,4	-	14	64	33	72	2,5	2	27	26	0,38	0,25	18,64	38,77

Таблиця 2 – Значення цільових функцій та параметрів проектування числових експериментів №2–6

№ з/п	№ експер.	$E_{\min}$	$a_w(\alpha_a)$	$F_L(\alpha_L)$	$F_M(\alpha_M)$	$F_P(\alpha_P)$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{21}$	$z_{22}$	$m_1$	$m_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$x_1$	$x_2$	$b_{w1}$	$b_{w2}$
1	2	0,038	87,06(0)	111,45(10)	12728(10)	0,8(10)	16	86	23	43	1,75	2,5	9	10	0,44	0,21	42,52	68,93
2	3	0,074	110,92(10)	71,03(0)	13195,9(10)	0,84(10)	14	78	31	55	2,25	2,25	24	27	0,38	0,202	27,53	43,5
3	4	0,147	99,03(10)	95,3(10)	13495,2(0)	0,74(10)	17	77	25	55	2	2,25	24	19	0,48	0,25	25,48	69,85
4	5	0,147	99,03(10)	95,3(10)	13495,2(10)	0,74(0)	17	77	25	55	2	2,25	24	19	0,48	0,25	25,48	69,85
5	6	0,083	109,86(0)	58,52(3)	11105,7(6)	0,83(9)	16	89	27	48	2	2,75	21	16	0,44	0,2	28,36	30,15

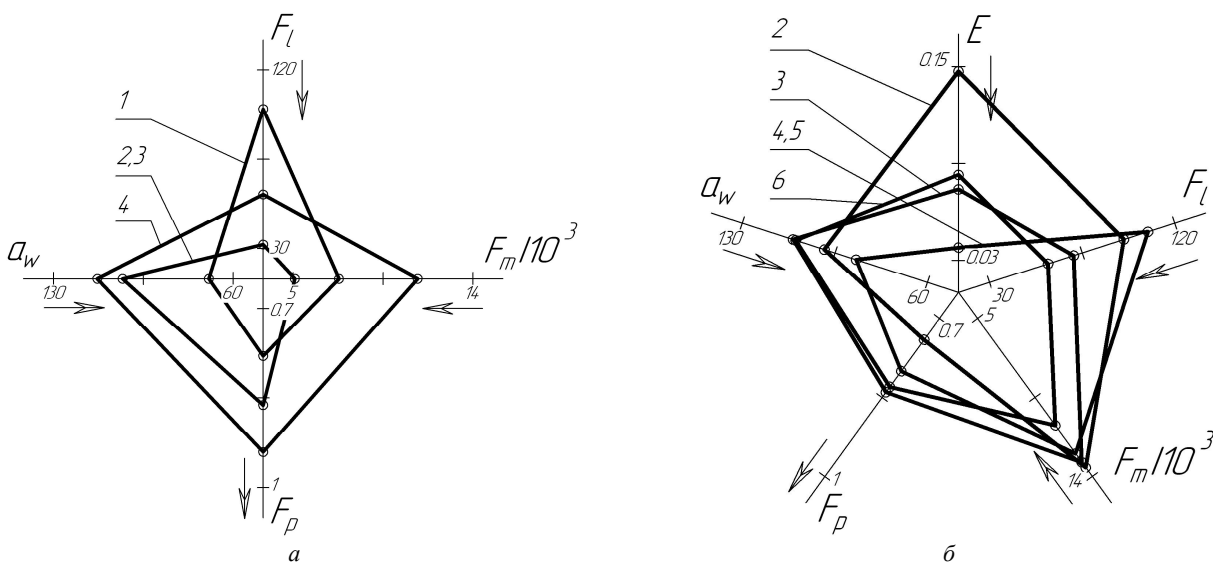


Рис. 2 – Графи числових експериментів: а – першого; б – та другого-шостого

**Висновки:**

1. Розглянуто актуальність поставленої задачі та доведена необхідність розробки підходу до проектування двоступінчастих редукторів з раціональними параметрами проектування при декількох критеріях, з об'єднанням їх у один.

2. Записані цільові функції найбільш значущих критеріїв та обмеження на мінімі проектування. Надані цільові функції дають змогу проектувальнику вибрати один чи декілька критеріїв якості; структура цільових функцій логічна та лаконічна, і вони можуть бути доповнені необхідними уточнюючими додатками.

3. Запропоновано новий підхід до розв'язання багатокритеріальних задач раціонального проектування двоступінчастого редуктора, сутність якого полягає в об'єднанні критеріїв у один. Підхід базується на аналізі пробних точок, що отримані при використанні ЛПТ-пошуку, та подальшій обробці отриманої інформації.

4. Запропоновано здійснювати перехід від багатьох критеріїв до одного за допомогою введення проектувальником шкали важливості та призначення важливості кожного з критеріїв. Для кожної пробної точки знаходиться відносне зміщення бажаного розв'язання, яке пропонується використовувати у якості об'єднуючого критерію.

5. Проведено ряд числових експериментів з метою апробації запропонованої методики об'єднання критеріїв та отримання адекватних вихідних даних. Універсальність та зручність запропонованого програмного комплексу дали змогу швидко змінювати концепцію числового експерименту (однокритеріальне чи багатокритеріальне проектування) та мобільно варіювати вхідними параметрами.

**Список літератури**

1. Соболев И. М., Статников Р. Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва, Дрофа, 2006. 175 с.
2. 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.

3. Бондаренко О. В. Суміщення методів ЛПТ-пошуку та звуження околів при оптимізації тривальних коробок передач. *Механіка та машинобудування*. Харків, НТУ "ХПІ", 2010, № 1, с. 78–84.
4. Бондаренко О. В., Устиненко О. В., Серіков В. І. Раціональне проектування зубчастих циліндричних двоступінчастих редукторів з урахуванням рівня напруженості зацеплень. *Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут": збірник наукових праць: тематичний випуск "Проблеми механічного приводу"*. Харків, НТУ "ХПІ", 2015, № 15, с. 23–27.
5. 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.

**References (transliterated)**

1. Sobol' I. M., Statnikov R. B. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 175 p.
2. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V. Optymizatsiyi 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". Tematychny vyypusk "Mashynoznavstvo ta SAPR"* [Bulletin of the NTU KhPI. Series: Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 22, pp. 16–27.
3. Bondarenko O. V. Cumishhennja metodiv LPt-poshuku ta zvuzhennja okoliv pri optimizatsii trival'nykh korobok peredach [Concentration of methods of LPT-search and narrowing of nodes during optimization of gearboxes]. *Mekhanika ta mashynobuduvannya* [Mechanics and machine building]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2010, no. 1, pp. 78–84.
4. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V., Serykov V. I. Racional'ne proektuvannya zubchastykh cylindrychnykh dvostupinchastykh reduktoriv z urahuvannjam rivnja napruzhenosti zacheplen' [Rational design of geared cylindrical two-stage gearboxes, taking into account the level of tension of engagement]. *Visnyk Nacional'nogo Politehnichnogo Universytetu "Harkivs'kyj Politehnichnyj Instytut": zbirnyk naukovykh prac': tematychny vyypusk "Problemy mekhanichnogo pryvodu"* [Bulletin of the NTU KhPI. Coll. of scientific papers. Series: Problems of mechanical drive]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 15, pp. 23–27.
5. Anohin A. M., Glotov V. A., Pavel'ev V. V., Cherkashin A. M. Metody opredelenija koefficientov vazhnosti kriteriev [Methods for determining the importance of criteria]. *Avtomatika i telemehaniка* [Automation and telemechanics]. Moscow, Institut problem upravlenija Publ, 1997, no. 8, pp. 3–35.

Надійшла (received) 09.03.2018

**Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Бондаренко Олексій Вікторович (Бондаренко Алексей Викторович, Bondarenko Oleksiy Viktorovych)** – 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: <https://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; e-mail: [avbondko@gmail.com](mailto:avbondko@gmail.com)

**Устиненко Олександр Віталійович (Устиненко Александр Витальевич, Ustynenko Oleksandr Vitalijovych)** – 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: <https://orcid.org/0000-0002-6714-6122>; e-mail: [ustin1964@tmm-sapr.org](mailto:ustin1964@tmm-sapr.org)

**Серіков Володимир Іванович (Серіков Владимир Иванович, Serykov Volodymyr Ivanovych)** – 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: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: [SerikovVI@tmm-sapr.org](mailto:SerikovVI@tmm-sapr.org)