

руководящих материалов, предназначенных для разработки и совершенствования технологических процессов обработки деталей с учетом реальных ресурсных возможностей токарно-винторезных станков.

Ожидаемая годовая экономическая эффективность от внедрения результатов исследовательской работы профессора Х. С. Самидова и докторанта А. Б. Ахадова в производственном объединении "Промавтоматика", Азербайджан, составит около 90 (девяносто) тысяч Азербайджанских манат в год.

#### Список литературы

1. Самидов Х. С., Самидов Э. Х. Динамика и оптимальное конструирование машин. – Баку: "Нурлан", 2003. – 622 с.
2. Самидов Х. С., Алиев Б. Г. Вынужденные колебания электромеханических систем приводов машин // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. научн. трудов. Тем. вып. "Проблемы механического привода". – Х.: НТУ "ХПИ", 2007. – № 21. – С. 132–143.
3. Sadek M. M., Knight W. A. The selection of Dynamic Acceptance Test Conditions for Machine Tools // Production Engineering. – Vol. 51, № 12. – 1972. – P. 429–435.
4. Самидов Х. С., Ахадов А. Б. Оптимизация динамических процессов

приводов технологических машин методом "Обобщенные безразмерные параметры" // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 142–145.

#### References (transliterated)

1. Samidov X. S., Samidov E. X. *Dinamika i optimal'noe konstruirovaniye mashin* [The dynamics and optimal design of machines]. Baku, Nurlan Publ., 2003. 622 p.
2. Samidov X. S., Aliev B. G. Vynuzhdennye kolebanija elektromekhanicheskikh sistem privodov mashin [Forced oscillations of electromechanical systems of machine drives]. *Vestnik NTU "KhPI". Tem. vyp. "Problemy mekhanicheskogo privoda"* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2007, no. 21, pp. 132–143.
3. Sadek M. M., Knight W. A. The selection of Dynamic Acceptance Test Conditions for Machine Tools. *Production Engineering*. Vol. 51, no. 12, 1972, pp. 429–435.
4. Samidov X. S., Ahadov A. B. Optimizatsiya dinamicheskikh processov privodov tehnologicheskikh mashin metodom "Obobshhjonnye bezrazmernye parametry" [Optimization of dynamic processes of technological machines drives by "Generalized dimensionless parameters"]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy mekhanicheskogo privodu* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 23 (1195), pp. 142–145.

Поступила (received) 07.03.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Теоретичні та експериментальні методи дослідження динаміки технологічних машин / А. Б. Ахадов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 5–10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0791.**

**Теоретические и экспериментальные методы исследования динамики технологических машин / А. Б. Ахадов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 5–10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0791.**

**Theoretical and experimental methods for studying the dynamics of technological machines / А. В. Ahadov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 5–10. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-0791.**

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

**Ахадов Анар Бейбала оглу** – інженер, докторант, технік вимірювальних приладів "BP Caspian sea exploration", м. Баку; тел.: +994 55 606-06-17; e-mail: ehedov.anar@gmail.com.

**Ахадов Анар Бейбала оглу** – инженер, докторант, техник измерительных приборов "BP Caspian sea exploration", г. Баку; тел.: +994 55 606-06-17; e-mail: ehedov.anar@gmail.com.

**Ahadov Anar Beybala** – engineer, PhD student, instrumentation technician at "BP Caspian Sea Exploration", Baku; tel.: +994 55 606-06-17; e-mail: ehedov.anar@gmail.com.

УДК 62-23+519.863

**О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО, І. Є. КЛОЧКОВ**

### КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДВОСТУПІНЧАСТИХ РЕДУКТОРІВ

Стаття присвячена задачі комп'ютерного моделювання 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 компоновання та взаємозв'язок параметрів унеможливають їх вибір без використання підходів математичної оптимізації. Використання відомого псевдо-випадкового методу *ММТ*-пошуку з авторською модифікацією дало змогу уникнути проблем пов'язаних з дискретністю та кількістю параметрів. Для розв'язання вказаної задачі було сформувано 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 *ММТ*-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. Надано основні схеми та блок-схеми елементів алгоритму. Реалізація комп'ютерної моделі здійснювалася у програмному середовищі Delphi 7.

**Ключові слова:** оптимально-раціональне проектування, модель, алгоритм, редуктор, критерії, цільова функція, раціональні параметри, алгоритм, *ММТ*-пошук, напруженість.

© О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, І. Є. Клочков, 2017

Статья посвящена задаче компьютерного моделирования 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 сформулировано 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. Предоставлено основные схемы и блок-схемы элементов алгоритма. Реализация компьютерной модели осуществлялась в среде Delphi 7.

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

The article is devoted to the problem of computer modeling 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. The algorithm was implemented in Delphi 7.

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

**Актуальність задачі.** На сьогоднішній день широко застосовування у машинобудуванні набули зубчасті редуктори, які використовуються для зміни обертового моменту та частоти обертання, найбільш яскравими та розповсюдженими представниками яких є циліндричні двоступінчасті редуктори.

Основною проблемою при проектуванні таких редукторів є необхідність забезпечити рівномірність зубчастих зачеплень з одночасним поліпшенням масогабаритних характеристик. Це досягається обранням конструктивних параметрів та відповідним розподіленням передаточних чисел між ступеннями редуктора. Зазвичай, при проектуванні технічних систем інженер стикається з дилемою, бо широкий спектр вимог до виробу приводить до появи декількох критеріїв якості. Більшість задач оптимального проектування співвісних ступінчастих приводів також є багатокритеріальними. 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, що базується на зондуванні простору параметрів, де у якості пробних точок в одиничному багатомірному кубі використовуються точки ЛПт-последовності [1]. А усі критерії об'єднуються в один.

При такому підході до розв'язання задачі постають питання формулювання цільових функцій, що відповідають критеріям, підхід об'єднання критеріїв та алгоритм реалізації розв'язання задачі, що дає змогу звести задачу до однокритеріальної. Таким чином, розробка алгоритму розв'язання задачі раціонального проектування двоступінчастого редуктора при декількох критеріях, з об'єднанням їх у один, є актуальним.

**Конструктивні параметри та критерії проектування.** У якості змінних параметрів оптимально-раціонального проектування запропоновано використати наступні конструктивні параметри редуктора:  $m_{\mu}$  – 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.

Далі наведено запропоновані критерії якості двоступінчастого редуктора.

Цільову функцію критерію мінімальної міжосьової відстані представимо у вигляді [2, 3]:

– для розгорнутої компоновки (при сумарному коефіцієнті зміщення  $x_{\Sigma} = 0$ ):

$$F_a = \sum_{\mu=1}^2 a_{w\mu} = \sum_{\mu=1}^2 0.5 \cdot m_{\mu} \cdot (z_{\mu,1} + z_{\mu,2}) \cdot \frac{1}{\cos(\beta_{\mu})},$$

$$F_a \rightarrow \min; \quad (1)$$

– для співвісної компоновки:

$$F_a = a_{w1} = a_{w2} = 0.5 \cdot m_1 \cdot (z_{1,1} + z_{1,2}) \cdot \frac{1}{\cos(\beta_1)}$$

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

Цільову функцію у випадку, коли критерієм оптимальності є мінімальна довжина редуктора визначимо як суму ширин зубчастих коліс та додаткової величини  $L_d$ , що враховує розміри опор, картеру, різноманітних зазорів, тощо [2–4]:

$$F_L = \sum_{w=1}^h L_{zaz} + \sum_{r=1}^g L_{nidu} + \sum_{t=1}^f L_k + \sum_{\mu=1}^s b_{w\mu}, \quad F_L \rightarrow \min. \quad (3)$$

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 [2]. Запишемо цільову функцію у вигляді:

$$F_M = \sum_{j=1}^r M_{кол} + \sum_{c=1}^v M_{вал} + \sum_{o=1}^6 M_{nidu} + M_{кар}, \quad F_M \rightarrow \min. \quad (4)$$

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:

$$F_P = p(K_{nH1}) \cdot p(K_{nF11}) \cdot p(K_{nF12}) \times$$

$$\times p(K_{nH2}) \cdot p(K_{nF21}) \cdot p(K_{nF22}),$$

$$F_P \rightarrow \max. \quad (5)$$

**Обмеження та функціональні залежності між конструктивними параметрами** дивись у [4].

**Підхід та алгоритм розв'язання задачі.**

Підхід побудовано на позиції дослідження точками ЛПт-рівномірно-розподіленої ( $A_i$ ) последовності

усього можливого простору параметрів ( $W$ ), що визначається технічними та технологічними вимогами до типу приводу, що розглядається.

Потім точки проходять перевірку за функціональними обмеженнями у певній послідовності. З точок, що пройшли перевірку, складається множина, що задовольняє умовам проектування ( $Q, Q \in W$ ).

Подальший аналіз  $Q$  ведеться у напрямку оперування критеріями якості та об'єднання їх в один.

Авторами було запропоновано відійти від досить розповсюдженого лінійного згортання [5] та 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 будь-яких критеріїв, що дає змогу реалізувати ієрархічні, бінарні чи будь-які інші зв'язки та співвідношення між критеріями.

Для всіх точок множини  $Q$  розраховуються окремо значення всіх критеріїв за відповідними цільовими функціями (1–5). 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 ввести **крок критерію**, що відповідає цінні ділення шкали важливості, який відображає приріст значення критерію у відповідності до 1-го балу шкали важливості:

$$R_u = \frac{F_{u \max} - F_{u \min}}{(\alpha_{\max} + 1)}, u = a, L, M, P. \quad (6)$$

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

$$\left\{ \begin{aligned} E_{a s} &= \frac{|(F_{a \min} + \alpha_a \cdot R_a) - F_{a s}|}{F_{a s}}; \\ E_{L s} &= \frac{|(F_{L \min} + \alpha_L \cdot R_L) - F_{L s}|}{F_{L s}}; \\ E_{M s} &= \frac{|(F_{M \min} + \alpha_M \cdot R_M) - F_{M s}|}{F_{M s}}; \\ E_{P s} &= \frac{|(F_{P \max} - \alpha_P \cdot R_P) - F_{P s}|}{F_{P s}}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

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

$$E_s = \frac{\sum E_{u s}}{4}. \quad (8)$$

Залежність (18) пропонується використовувати у якості критерію при аналізі точок множини  $Q$ : чим

менше  $E_s$ , тим більше пробна точка наближена до бажаного проектувальником розв'язання:

$$E_s \rightarrow \min. \quad (9)$$

Таким чином задача трансформується в однокритеріальну, а введений критерій характеризує відносне наближення пробної точки до бажаного розв'язання.

Розглянемо **алгоритмізацію** даного підходу.

Як відомо, послідовність розв'язання будь-якої задачі складається з етапів, наведених на рис. 1.

Можна виділити два концептуальних шляхи процедури оптимально-раціонального проектування редукторів (рис. 2).

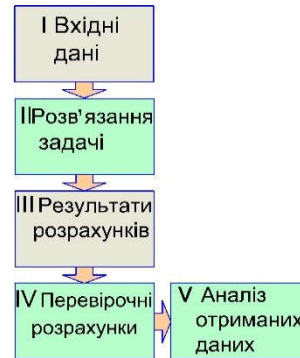


Рис. 1 – Загальна схема розв'язання задачі

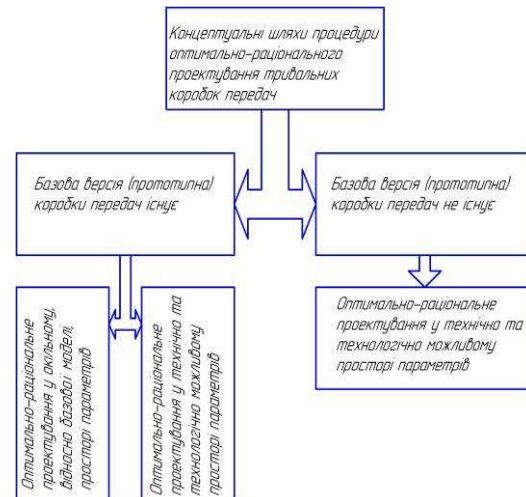


Рис. 2 – Концептуальні шляхи процедури оптимально-раціонального проектування

Перший, оптимально-раціональне проектування вже існуючого редуктора, що є базовим. У межах цього шляху є можливість розв'язувати задачу оптимально-раціонального проектування за двома підходами: оптимально-раціональне проектування у просторі параметрів змінних проектування, що обмежується технічними та технологічними можливостями виробництва, а також оптимально-раціональне проектування у просторі параметрів змінних проектування, що є окільним відносно базового редуктора.

Другий, оптимально-раціональне проектування нового зразка редуктора, яке проводиться виключно у просторі параметрів змінних проектування, що обмежується границями технічних та технологічних можливостей виробництва та вимог до самого редуктора.

Зважаючи на шлях оптимально-раціонального проектування, проектувальник обирає ті чи інші вхідні дані в залежності від різних особливостей тієї чи іншої конструкції редуктора, технологічних та технічних обмежень, на-

явності чи відсутності базових варіантів, вимог, що висуюються до майбутньої конструкції та інших факторів.

Функціонування алгоритму оптимально-раціонального проектування редуктора (рис. 3) проходить наступним чином.

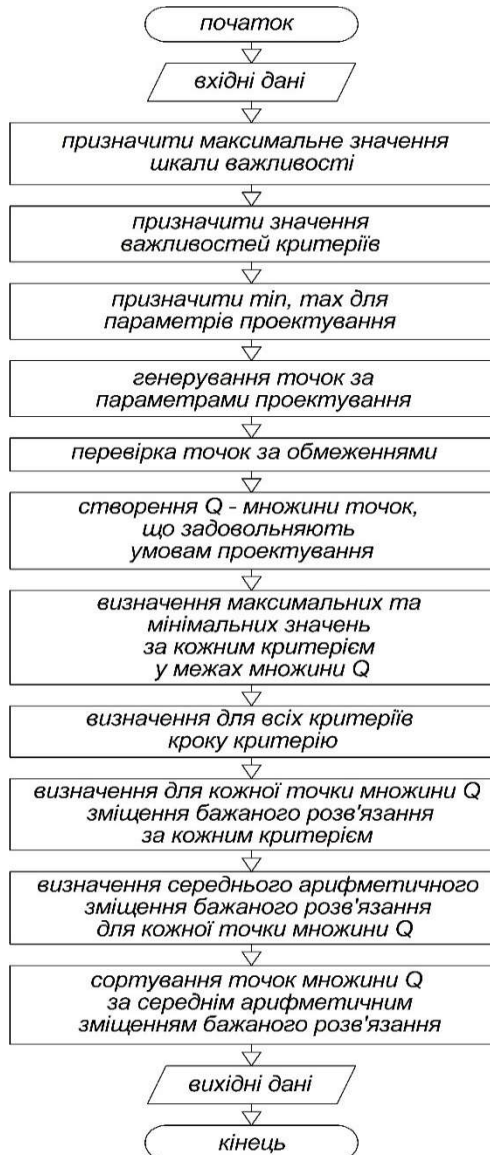


Рис. 3 – Блок-схема програми багатокритеріального оптимально-раціонального проектування

1. В першу чергу проектувальником задаються вхідні дані. Вони обираються ним в залежності від різних особливостей тієї чи іншої конструкції редуктора, технологічних та технічних обмежень, наявності чи відсутності базових варіантів редуктора, вимог, що висуюються до майбутнього редуктора та інших факторів.

У даному алгоритмі прийняті наступні вхідні данні:

- числові обмеження на змінні проектування;
- функціональні обмеження, що відповідають конструкторським та технологічним вимогам.

2. Призначити максимальне значення шкали важливості  $\alpha_{max}$ , причому, чим більше  $\alpha_{max}$ , тим більш точне співвідношення між критеріями може бути досягнуто. Також, значення цього параметру слід приймати беручи до уваги і кількість критеріїв якості, і те, що у підході використовується метод псевдо-випадкового пошуку і результуюча пробна точка може бути далеко від точки з бажаним співвідношенням критеріїв. Тому рекомендується провести розв'язання задачі при декількох значеннях

$\alpha_{max}$ , тим самим відстежити зміну розв'язання.

3. Призначення значень важливостей критеріїв проводиться проектувальником виключно з власних міркувань, але приймаючи до уваги сказане у попередньому пункті.

4. Призначення максимальних та мінімальних значень параметрів проектування виконується беручи до уваги технічні та технологічні вимоги.

5. Генерування ЛПТ-последовності  $(m, z, \beta)$ . Розглянемо змінні проектування – модулі зачеплень. Особливістю цієї групи є те, що вони повинні приймати стандартні (фіксовані) значення. Вибір модулів з стандартного ряду пропонується здійснювати шляхом збільшення координати  $q_{i,j}$  [2] на порядок з наступним математичним округленням до цілого значення. За отриманим числом (порядковим номером) обираємо модуль з ряду.

Прийmemo  $J$  – порядковий номер параметру.

Операція знаходження модулів може бути проілюстрована наступною схемою (рис. 4).

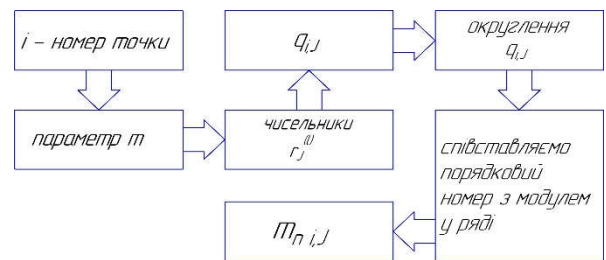


Рис. 4 – Схема вибору координат модулів

Наступна група параметрів – числа зубців коліс. Вони повинні приймати тільки цілі значення, на відміну від координат, отриманих за ЛПТ-последовністю. Застосування математичного округлення на ці параметри дає змогу уникнути цієї проблеми, пробні точки зсуваються за відповідними координатами. Параметр  $z_6$  ( $z_{2,2}$ ) будемо розраховувати через інші у відповідності до конструкції редуктора, що зменшить кількість параметрів, що варіюються. Це також дає змогу забезпечити наперед задане передавальне відношення редуктора (у межах похибки, що допускається).

Схема вибору координат пробних точок за цією групою параметрів наведено на рис. 5. Тут  $s$  – кількість ступенів редуктора ( $s = 2$ ).

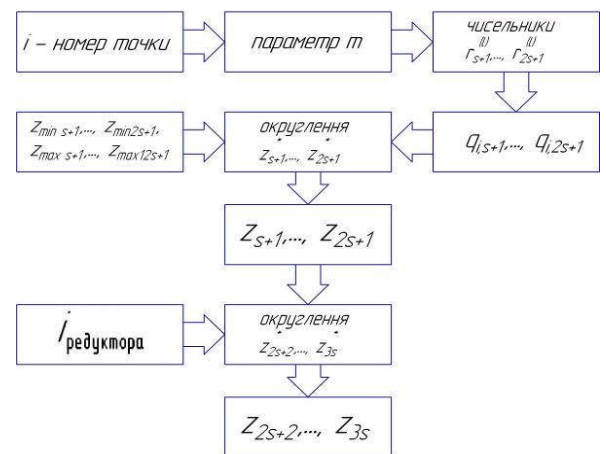


Рис. 5 – Схема вибору координат чисел зубців:

$z^*$  – розрахункові за ЛПТ-последовністю (дробні) значення чисел зубців

Координати точок, що відповідають параметрам кутів нахилу зубців у зачепленні знаходимо за алгоритмом, наданим на схемі (рис. 6).

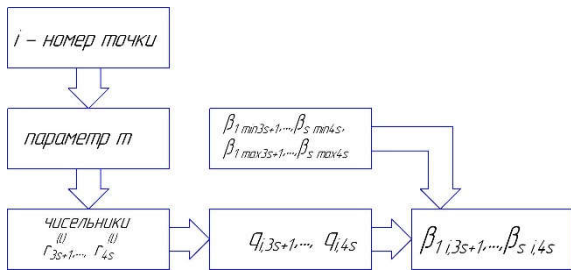


Рис. 6 – Схема вибору координат кутів нахилу

6. Наступним етапом у алгоритмі оптимізації є *перевірка обмежень*. Розглянемо цей етап детальніше.

Перевірка обмежень на змінні проектування (пробні точки) здійснюється у певній послідовності, що дозволяє зменшити загальний час оптимізації за рахунок своєчасного відсіву пробних точок, котрі не відповідають ряду вимог. Пробна точка проходить послідовно перевірку за числовими та функціональними обмеженнями рівності та нерівності, і, якщо вона не задовольняє на певному етапі якійсь вимозі, то відкидається, а послідовну перевірку починає наступна точка.

Загальна схема перевірки для однієї точки може бути представлена у вигляді рис. 7.

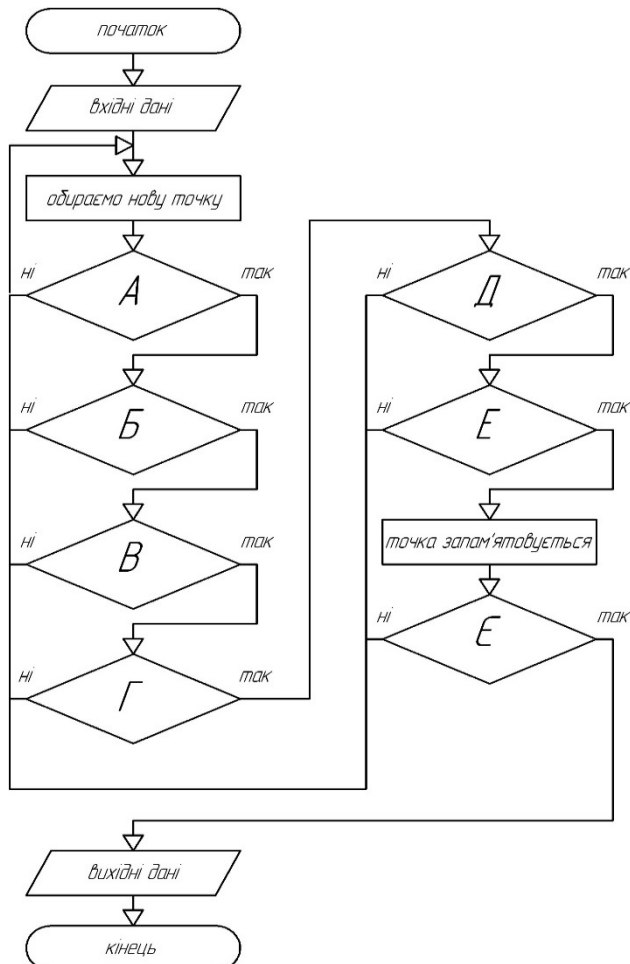


Рис. 7 – Блок-схема послідовності перевірки точок за обмеженнями: А – габаритне співвідношення зубчастих коліс, Б – числове обмеження на числа зубців, В – перевірка похибки передавальних відношень редуктора, Г – перевірка похибки розрахункових міжосьових відстаней відносно середнього значення, Д – перевірка зубців на контактну витривалість та міцність, Е – перевірка зубців на згинну витривалість та міцність, Є – чи всі точки перевірено

Саме таку послідовність проходження перевірки обмежень пробною точкою було обрано з урахуванням об'єму математичних обчислень. Якщо точка не задовольняє малим за об'ємом математичних обчислень умовам, то вона відкидається і не витрачається час на перевірку великих за об'ємом математичних обчислень умов.

7. Якщо пробна точка проходить всі умови, то вона потрапляє до таблиці можливих варіантів. Таблиця являє собою двовимірний масив, у якому кожному номеру точки відповідає набір параметрів проектування та значення цільових функцій.

8. Визначення максимальних та мінімальних значень всіх критеріїв здійснюється шляхом сортування таблиці можливих варіантів.

9–11. Розрахунки в даних операціях проводяться за залежностями (6–8).

12. Після того як було розраховано середнє арифметичне зміщеннями бажаного розв'язання відносно дійсного для кожної точки множини  $Q$ , проводиться *пошук найкращого варіанта* (пробної точки, що відповідає мінімальному значенню цільової функції). Пошук найкращого варіанта здійснюється сортуванням. З усього різноманіття методів сортування було обрано метод сортування вставками, який і не є самим швидким з методів, але дуже простий у програмній реалізації.

### Висновки:

1 Розглянута актуальність поставленої задачі та доведена необхідність розробки алгоритму 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 змінні 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 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, яке пропонується використовувати у якості об'єднуючого критерію.

4. Розроблена комп'ютерна модель алгоритму оптимально-раціонального проектування циліндричних двоступінчастих редукторів. Врахування конструктивних, технічних та технологічних особливостей циліндричних двоступінчастих редукторів у даному алгоритмі дозволило задовольнити вимоги, що висувуються до агрегатів такого класу. Особлива послідовність алгоритму дозволила скоротити час машинних розрахунків.

### Список літератури

1. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М. : Наука, 1981. – 107 с.
2. Бондаренко О. В. Оптимізація співвісних ступінчастих приводів машин по масогабаритними характеристиками на прикладі тривальних коробок передач / Олексій Бондаренко, Олександр Устиненко // Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут": збірник наукових праць: тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – № 22. – С. 16–27.
3. Бондаренко О. В. Суміщення методів ЛПТ-пошуку та звууження околів при оптимізації тривальних коробок передач / Бондаренко Олексій // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. – № 1. – С. 78–84.
4. Бондаренко О. В. Раціональне проектування зубчастих циліндричних двоступінчастих редукторів з урахуванням рівня напруженості зачеплень / Олексій Бондаренко, Олександр Устиненко,

- Володимир Серіков // 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. Методы определения коэффициентов важности критериев / Анохин А. М., Глотов В. А., Павельев В. В., Черкашин А. М. // Автоматика и телемеханика – М. : Институт проблем управления, 1997. – № 8. – С. 3–35.

## References (transliterated)

1. Sobol' I. M., Statnikov R. B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 107 p.
2. Bondarenko O. V., Ustinenko O. V. Optimizaciya spivvisnih stupinchastih privodiv mashin po masogabaritnimi harakteristikami na prikladi trival'nykh korobok peredach [Optimization of coaxial stepped drives of cars by mass-size characteristics on the example of long gearboxes]. *Visnik Nacional'nogo Politehnichnogo Institutu "Harkivs'kij Politehnichnij Institut": zbirnik naukovih prac': tematichnij vipusk "Problemi mehanichnogo privodu"* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 15, pp. 23–27.

- ries: Problem of mechanical drive]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 22, pp. 16–27.
3. Bondarenko O. V. Cumishhennja metodiv LPt-poshuku ta zvu-zhennja okoliv pri optimizacii trival'nykh korobok peredach [Concentration of methods of LPT-search and narrowing of nodes during optimization of long gearboxes]. *Mehanika ta mashinobuduvannja*. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2010, no. 1, pp. 78–84.
4. Bondarenko O. V., Ustinenko O. V., Serikov V. I. Racional'ne proektuvannja zubchastih cilindrichnih dvostupinchastih reduktoriv z urahuvannjam rivnja napruzhenosti zacheplen' [Rational design of geared cylindrical two-stage gearboxes, taking into account the level of tension of engagement]. *Visnik Nacional'nogo Politehnichnogo Institutu "Harkivs'kij Politehnichnij Institut": zbirnik naukovih prac': tematichnij vipusk "Problemi mehanichnogo privodu"* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem 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 koeficientov vazhnosti kriteriev [Methods for determining the coefficients of importance of criteria]. *Avtomatika i telemechanika*. Moscow, Institute of Management Problems, 1997, no. 8, pp. 3–35.

Надійшла (received) 09.03.2017

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Комп'ютерна модель багатокритеріального раціонального проектування циліндричних двоступінчатих редукторів / О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, І. Є. Клочков // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 10–15. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0791.**

**Компьютерная модель многокритериального рационального проектирование цилиндрических двухступенчатых редукторов / А. В. Бондаренко, А. В. Устиненко, И. Е. Клочков // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 10–15. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0791.**

**The computer modeling of rational design cylindrical gear with multiple criteria / A. V. Bondarenko, A. V. Ustinenko, I. E. Klochkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 10–15. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0791.**

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

**Бондаренко Олексій Вікторович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (067) 189-97-00; e-mail: avbondko@gmail.com.

**Бондаренко Олександр Вікторович** – кандидат технічних наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (067) 189-97-00; avbondko@gmail.com.

**Bondarenko Olexiy Viktorovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; tel.: (067) 189-97-00; e-mail: avbondko@gmail.com.

**Устиненко Олександр Віталійович** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-64-78; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org.

**Устиненко Олександр Віталійович** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-64-78; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org.

**Ustinenko Aleksandr Vital'evich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, SRF, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; tel.: (057) 707-64-78; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org.

**Клочков Ілля Євгенович** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: s008@tmm-sapr.org.

**Клочков Ілля Євгеньевич** – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", аспирант кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: s008@tmm-sapr.org.

**Klochkov Illia Evgenovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; phone: (057) 707-69-01; e-mail: s008@tmm-sapr.org.