

УДК 62-23+519.863+004.94

О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО, І. Є. КЛОЧКОВ, І. Я. ХРАМЦОВА

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНО-РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТРИВАЛЬНИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ

Стаття присвячена задачі комп'ютерного моделювання оптимально-раціонального проектування тривальних коробок передач за критеріями мінімальних міжосьової відстані, довжини та маси з врахуванням навантажувальної здатності основних елементів. Розроблено комп'ютерну модель оптимально-раціонального проектування тривальних коробок передач, яка включає всі аспекти проектування за рекомендованою комбінованою методикою на основі суміщення методів ЛПт-пошуку та звуження околів, що дає змогу спростити процес проектування та уникнути недоліків цих двох методів, а також організацію багаторівневого зондування, яке дає змогу значно збільшити кількість пробних точок для підвищення точності отриманих даних. 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, критерії, цільова функція, раціональні параметри, ЛПт-пошук

Статья посвящена задаче компьютерного моделирования оптимально-рационального проектирования трехвалных коробок передач по критериям минимальных межосевого расстояния, длины и массы с учетом нагрузочной способности основных элементов. Разработана компьютерная модель оптимально-рационального проектирования трехвалных коробок передач, которая включает все аспекты проектирования по рекомендованной комбинированной методике на основе совмещения методов ЛПт-поиска и сужения окрестностей, что позволяет упростить процесс проектирования и избежать недостатков двух методов, а также организацию многоуровневого зондирования, которое позволяет значительно увеличить количество пробных точек для повышения точности полученных данных. Предоставлено основные схемы и блок-схемы элементов алгоритма. Реализация компьютерной модели осуществлялась в среде Delphi 7.

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

The article is devoted to the problem of computer modeling of rational design of three-shaft gearboxes according to criteria of minimum center distance, length and mass taking into account load capacity of the main elements. Existing methods and approaches to optimization coaxial step machine drives and the basis of common methods of mathematical optimization were considered, on the basis of which the direction of the improvement of methods optimization three-shaft gearboxes was chosen. An algorithm is combination of methods of LPt-sequences and narrowing of parameters space. The chart of optimization algorithm is resulted. The stages of calculations and feature of optimization algorithm work are consistently described. The replacing the logic operations in LPt-sequences is proposed. This allowed to obtain test points with coordinates, which are natural numbers. The implementation of the methodology in the form of a complex algorithm is given, which combines the objective functions, limits and methods of optimization with the rational sequence of check limits, narrowing of parameters space and the analysis and treatment of the obtained results. The algorithm was implemented in Delphi 7.

**Keywords:** rational design, model, algorithm, criteria, objective function, rational parameters, LPt-search

## Актуальність задачі

Сучасне транспортне машинобудування висуває все більш жорсткі вимоги за масогабаритними характеристиками до приводів машин і, отже, до такого їх елементу, як коробки передач. Тому максимально можливе зниження маси та габаритів останніх є актуальною задачею. Одним з перспективних шляхів в цьому напрямку є розв'язання задачі оптимально-раціонального проектування тривальних коробок передач [1] за критерієм мінімізації маси та (або) габаритів.

## Постановка задачі

Найбільше розповсюдженими у трансмісіях транспортних засобів (наприклад, автомобілів) отримали коробки передач (КП), виконані за тривальною схемою [2]. Деякі питання щодо задачі оптимально-раціонального проектування таких коробок передач, а також багатоступеневих зубчастих приводів загального призначення розглянуті у статтях [3, 4] та книгах [5, 6].

Оптимально-раціональне проектування коробок передач може проводитись за багатьма критеріями: маса, габаритні розміри (довжина, ширина, висота, міжосьова відстань), вібрація та інше. Але, на погляд авторів, з усього різноманіття критеріїв найбільш відповідають за масогабаритні характеристики КП її міжосьова відстань, довжина та маса.

## Шляхи розв'язання задачі

Як відомо, послідовність розв'язання будь-якої задачі складається з наступних етапів (рис. 1): введен-

ня вхідних даних, безпосередньо розв'язання задачі, отримання результатів, проведення перевірки та аналіз отриманих результатів.

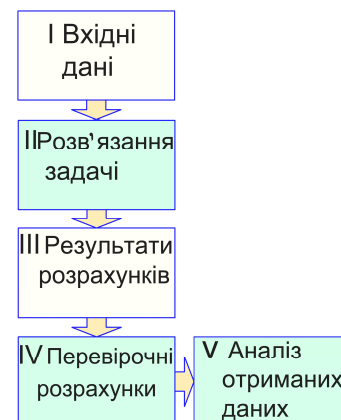


Рисунок 1 – Загальна схема розв'язання задачі

Зважаючи на обставини та потреби при проектуванні нової коробки передач, можна виділити два концептуальних шляхи процедури оптимально-раціонального проектування (рис. 2).

*Перший* – оптимально-раціональне проектування вже існуючої коробки передач у якості базової. Цей шлях обумовлено тими факторами, що раніше було дуже складно проводити розв'язання задач оптимально-раціонального проектування високої складності.

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

Це спричинено відсутністю на той час швидкодіючих алгоритмів оптимально-раціонального проектування, що не потребують ручної перевірки, та потужностей електронно-обчислювальної техніки, тому проектувальник оперував здобутками попередників, деякими підходами і власними досвідом та інтуїцією. 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 границями технічних та технологічних можливостей виробництва, а також оптимально-раціональне проектування у просторі параметрів змінних проектування, що є окільним відносно прототипної коробки передач.

Другий – оптимально-раціональне проектування нового зразка коробки передач. Зрозуміло, що оптимально-раціональне проектування на даному шляху проводиться виключно у просторі параметрів змінних проектування, що обмежується границями технічних та технологічних можливостей виробництва та вимог до самої коробки передач.

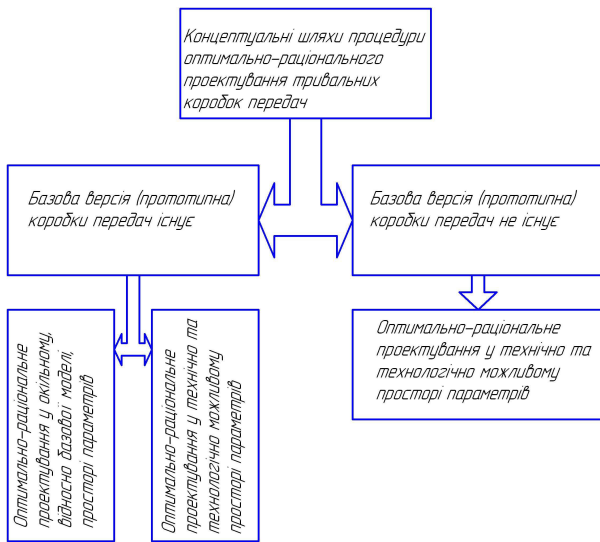


Рисунок 2 – Концептуальні шляхи процедури оптимально-раціонального проектування

Зважаючи на шлях оптимально-раціонального проектування, проектувальник обирає ті чи інші вхідні дані (параметри базової коробки передач чи вхідні дані для проектування нової коробки передач). Вони обираються ним в залежності від різних особливостей тієї чи іншої конструкції тривальних коробок передач, технологічних та технічних обмежень, наявності чи відсутності базових варіантів конструкції коробок передач, вимог, що висувуються до майбутньої конструкції та інших чинників.

Схема запропонованого алгоритму оптимально-раціонального проектування з урахуванням суміщення методів пошуку [3] проілюстрована на рис. 3.

Зважаючи на представлений алгоритм оптимально-раціонального проектування тривальних коробок передач, який об'єднує математичну модель задачі (цільові функції та обмеження на змінні проектування), методи розв'язання 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.



Рисунок 3 – Схема запропонованого алгоритму оптимально-раціонального проектування

Отримана програма має блочно-процедурну структуру, тому може бути з легкістю модифікована за бажанням проектувальника, це дає можливість проводити оптимально-раціональне проектування інших типів зубчастих приводів з нерухомими паралельними вісями валів. Блок-схема програми оптимально-раціонального проектування представлена на рис. 4.

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 введення вхідних даних представлений на рис. 5.

**Функціонування алгоритму** оптимально-раціонального проектування проходить наступним чином.

1. У першу чергу проектувальником задаються вхідні данні. Вони обираються ним в залежності від різних особливостей тієї чи іншої конструкції тривальних коробок передач, технологічних та технічних обмежень, наявності чи відсутності базових варіантів конструкції коробок передач, вимог, що висувуються до майбутньої коробки передач та інших чинників.

У даному алгоритмі прийняті наступні вхідні дані:  
 - числові обмеження на змінні проектування;  
 - дані, що відповідають конструкторським та технологічним вимогам.

2. Генерування ЛПт-послідовності для зондування двохвимірного простору у координатах  $\Omega_1, \Omega_2$  – коефіцієнтів звуження околів параметрів проектування. Для кожної точки проводяться обчислення внутрішнього кола алгоритму, особливості якого приведено нижче відповідно до блоків.

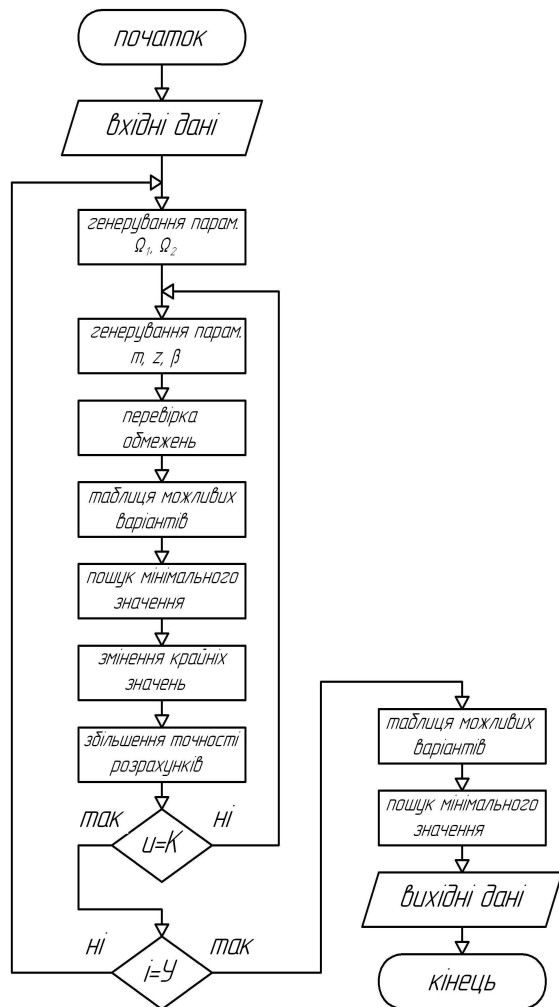


Рисунок 4 – Блок-схема програми оптимально-раціонального проектування:  $i$  та  $u$  – номер кроку;  $Y$  та  $K$  – кількість кроків

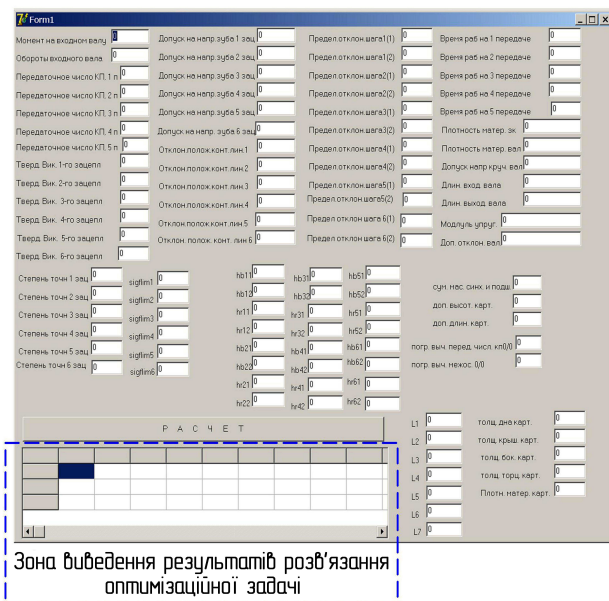


Рисунок 5 – Вікно програми

3. Генерування ЛПТ-послідовності ( $t, z, \beta$ ). Розглянемо змінні проектування – модулі зачеплень. Особливістю цієї групи є те, що вони повинні прийма-

ти 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.

Наступна група параметрів – числа зубців коліс. Числа зубців повинні приймати тільки цілі значення, на відміну від координат, отриманих за ЛПТ-послідовністю. Застосування математичного округлення на ці параметри дозволяє уникнути цієї проблеми, пробні точки зсуваються за відповідними координатами.

Деякі з параметрів ( $z_{2,2}, z_{3,2}, z_{4,2}, z_{5,2}, \dots$ ) буде розраховувати через інші у відповідності до конструктивно-технологічних особливостей тривальних коробок передач, це суттєво зменшить кількість параметрів, що варіюються. Це також дозволить забезпечити передаточні числа коробки передач для кожної передачі (у межах похибки, що допускається).

Наведемо схему вибору координат пробних точок за цією групою параметрів, як більш складну, на рис. 6.

Розглянемо наступну групу. Кути нахилу зубців у зачепленні знаходимо у відповідності до ЛПТ-послідовністю у певному діапазоні значень.

З наведеного вище видно, що кількість параметрів проектування є мінімально можливою. Це було досягнуто завдяки можливості виразити деякі параметри проектування через інші (деякі значення чисел зубців, це мінус чотири параметри від загальної їх кількості), та додавання двох додаткових (коефіцієнтів звуження околів, це плюс два параметри до загальної їх кількості).

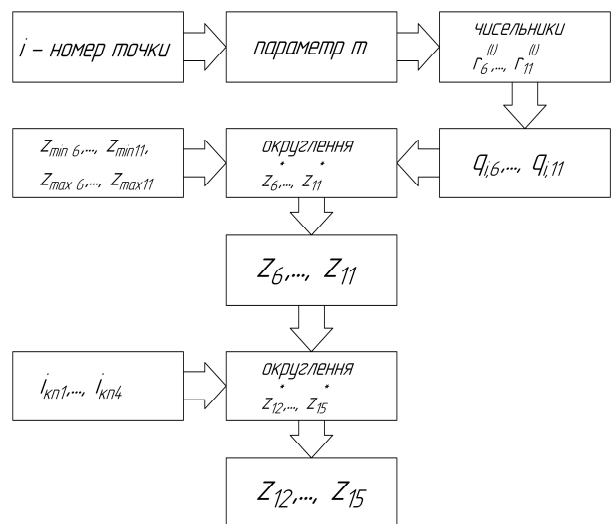


Рисунок 6 – Схема вибору координат пробних точок за параметрами чисел зубців

4. Наступним етапом у внутрішньому колі алгоритму 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 (тут наведені позначення: А – габаритне співвідношення зубчастих коліс; Б – числове обмеження на числа зубців; В – перевірка похибки передавальних відношень коробки передач; 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).

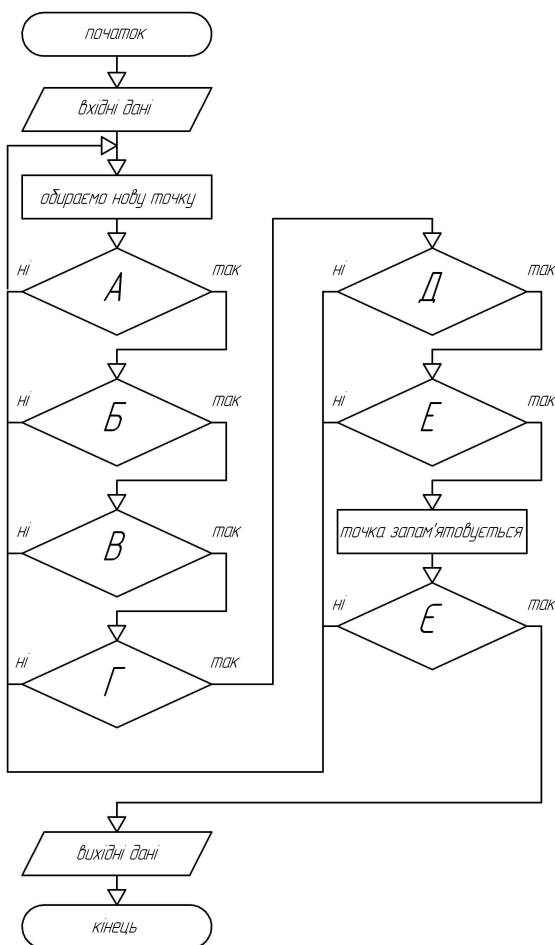


Рисунок 7 – Блок-схема послідовності перевірки точок за обмеженнями

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

Якщо пробна точка проходить усі умови, то вона потрапляє до таблиці можливих варіантів. Таблиця – це двовимірний масив, у якому кожному номеру точки відповідає набір параметрів проектування та зна-

чення цільових функцій.

5. Після того, як було складено таблицю можливих комбінацій параметрів, проводиться *пошук найкращого варіанта* (пробної точки, що відповідає мінімальному значенню цільової функції). Пошук найкращого варіанту здійснюється сортуванням. З усього різноманіття методів сортування було обрано метод сортування вставками, який не є самим швидким із методів, але дуже простий у програмній реалізації.

Сортування масиву проводиться окремо за кожним критерієм оптимізації. Наприкінці всіх етапів сортування маємо три впорядковані масиви, що очолюються мінімальними значеннями цільових функцій та відповідними наборами параметрів, що відповідають їх значенням.

6. Якщо точності розрахунків недостатньо, проводиться наступний етап алгоритму, а саме, *змінення крайніх значень параметрів* (звуження околів простору параметрів). У якості точок, відносно яких звужуються околи на кожному кроці, беруться точки з попереднього кроку, що відповідають мінімальним значенням цільової функції.

Як результат, на кожному кроці внутрішнього кола алгоритму граничні значення для деяких параметрів проектування звужуються, об'єм  $n$ -вимірного паралелепіпеда зменшується. З урахуванням того, що кількість пробних точок залишається постійною, це призводить до більш високої щільності дослідження, а як наслідок – і до максимально можливого наближення до абсолютного мінімуму цільової функції.

7. На етапі *збільшення точності розрахунків* проводиться поступове зменшення на кожному кроці похибки рівності міжосьових відстаней між зубчастими зачепленнями.

## Висновок

Розроблена комп'ютерна модель алгоритму оптимально-раціонального проектування тривальних коробок передач поєднує методи ЛПт-пошуку та звуження околів, що дозволило збільшити кількість пробних точок для більш точного результату. Урахування конструктивних, технічних та технологічних особливостей тривальних коробок передач у даному алгоритмі дозволило задовольнити вимоги, що висувуються до агрегатів такого класу. Особлива послідовність алгоритму дозволила скоротити час розрахунків.

## Список літератури

1. Соболь І. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / Соболь И. М., Статников Р. Б. – М. : Дрофа, 2006. – 175 с.
2. Бондаренко О. В. Оптимізація співвісних ступінчастих приводів машин по масогабаритним характеристикам на прикладі тривальних коробок передач / О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко // Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип. "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 / О. В. Бондаренко // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – № 1. – С. 78–84.
4. Бондаренко О. В. Рациональное проектирование зубчатых цилиндрических двоступенчатых редукторов с учетом уровня напряженности зацепления / О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, В. І. Серіков // Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип. "Проблеми механічного приводу". – Харків : НТУ "ХПІ", 2015. – № 15. – С. 23–27.

5. **Кудрявцев В. Н.** Расчет и проектирование зубчатых редукторов: Справочник / Под общ. ред. В. Н. Кудрявцева. / **Кудрявцев В. Н., Кузьмин И. С., Филипенков А. Л.** – СПб.: Политехника, 1993. – 448 с.
6. **Иосилевич Г. Б.** Детали машин. / **Иосилевич Г. Б.** – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

## References (transliterated)

1. **Sobol' I. M.** Vybór optimal'nykh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami / **Sobol' I. M., Statnikov R. B.** – Moscow : Drofa, 2006. – 175 p.
2. **Bondarenko O. V.** Optimizacija spivvisnih stupinchastih privediv mashin po masogabaritnimi harakteristikami na prikladni trival'ni korobok peredach / **O. Bondarenko, O. Ustinenko** // Visnik NTU "KhPI". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2012. – No 22. – P. 16–27.
3. **Bondarenko O. V.** Cumishhennja metodiv LPr-poshuku ta

zvuzhennja okoliv pri optimizacii trival'ni korobok peredach / **Bondarenko O. V.** // Mehanika ta mashinobuduvannja. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2010. – No 1. – P. 78–84.

4. **Bondarenko O. V.** Racional'ne proektuvannja zubchatih cilindrichnih dvostupinchastih reduktoriv z urahuvannjam rivnja napruzhnosti zacheplen/ **O. Bondarenko, O. Ustinenko, V. Srikov** // Visnik NTU "KhPI". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 15. – P. 23–27.

5. **Kudrjavcev V. N.** Raschet i proek-tirovanie zubchatyh reduktorov: Spravochnik / Pod obshh. red. V. N. Kudrjavceva / **Kudrjavcev V. N., Kuz'min I. S., Filipenkov A. L.** – S-Pb.: Politehnika, 1993. – 448 p.

6. **Iosilevich G. B.** Detali mashin / **Iosilevich G. B.** – Moscow : Mashinostroenie, 1988. – 368 p.

*Надійшла (received) 19.01.2017*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Комп'ютерне моделювання оптимально-раціонального проектування тривальних коробок передач / О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, І. Є. Клочков, І. Я. Храмова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: машинознавство та САПР. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 12 (1234). – С. 9–13. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0775.**

**Компьютерное моделирование оптимально-рационального проектирования трехвалльных коробок передач / А. В. Бондаренко, А. В. Устиненко, И. Е. Клочков, И. Я. Храмова // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиноведение и САПР. – Х. : НТУ "ХПИ", 2017. – № 12 (1234). – С. 9–13. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0775.**

**Computer modeling of rational design of three-shaft gearboxes / O. V. Bondarenko, O. V. Ustynenko, I. E. Klochkov, I. Ya. Khramtsova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – № 12 (1234). – P. 9–13. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0775.**

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

**Бондаренко Олексій Вікторович** – кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", доцент кафедри ТММ і САПР; тел.: (067) 189-97-00; e-mail: avbondarenko@yandex.ua.

**Бондаренко Алексей Викторович** – кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", доцент кафедры ТММ и САПР; тел.: (067) 189-97-00; e-mail: avbondarenko@yandex.ua.

**Bondarenko Olexiy Viktorovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", Associate Professor of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (067) 189-97-00; e-mail: avbondarenko@yandex.ua.

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

**Устиненко Александр Витальевич** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, НТУ "ХПИ", профессор кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-64-78; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org.

**Ustynenko Olexandr Vitaijovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, SRF, NTU "KhPI", Professor of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-64-78; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org.

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

**Клочков Илья Евгеньевич** – НТУ "ХПИ", аспирант кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: s008@tmm-sapr.org.

**Klochkov Illia Evgenovych** – NTU "KhPI", postgraduate student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01; e-mail: s008@tmm-sapr.org.

**Храмова Ірина Яківна** – НТУ "ХПІ", науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-61-66; e-mail: iyakhram@gmail.com.

**Храмова Ирина Яковлевна** – НТУ "ХПИ", научный сотрудник кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-61-66; e-mail: iyakhram@gmail.com.

**Khramtsova Iryna Yakivna** – NTU "KhPI", Researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-61-66; e-mail: iyakhram@gmail.com.