

**О.В. НАДТОКА, Д.М. НАДТОКА**

## **ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ПРИ ВИВЧЕННІ КУРСУ «ДЕТАЛІ МАШИН»**

У статті приводиться опис комп'ютерної програми GearKURT, яка призначена для розрахунку механічних передач. Програма дозволяє проводити розрахунки передач:

- закритої циліндричної прямозубої передачі
- закритої циліндричної косозубої передачі
- відкритої циліндричної прямозубої передачі
- передачі Новикова
- закритої конічної прямозубої передачі
- закритої конічної передачі з непрямыми зубами
- відкритої конічної прямозубої передачі
- черв'ячної передачі.

Комп'ютерна програма має діалоговий інтерфейс, написана на об'єктно-орієнтованій мові програмування Delphi та скомпільована у exe-файл. Програма дозволяє обирати необхідний матеріал та спосіб термообробки для виготовлення зубчастих коліс, проводити розрахунки оптимальних геометричних розмірів та параметрів передач, визначати конструкцію зубчастих коліс. У програмі надані всі необхідні довідкові матеріали у вигляді таблиць та графіків, по яким необхідно вибирати коефіцієнти та інші необхідні для розрахунків значення. Програма передбачає доступ до теоретичного матеріалу курсу «Деталі машин» та можливість зберігати результати розрахунків в окремому файлі. Наведені рекомендації щодо використання даної програми.

**Ключові слова:** передача, зубчасті колеса, комп'ютерна програма.

В статье приводится описание компьютерной программы GearKURT, предназначенной для расчета механических передач. Программа позволяет проводить расчеты передач:

- закрытой цилиндрической прямозубой передачи,
- закрытой цилиндрической косозубой передачи,
- открытой цилиндрической прямозубой передачи,
- передачи Новикова,
- закрытой конической прямозубой передачи,
- закрытой конической передачи с непрямыми зубьями,
- открытой конической прямозубой передачи,
- червячной передачи.

Компьютерная программа имеет диалоговый интерфейс, написана на объектно-ориентированном языке программирования Delphi и скомпиллирована в exe-файл. Программа позволяет выбирать необходимые материалы и способ термообработки для изготовления зубчатых колес, проводить расчеты оптимальных геометрических размеров и параметров передач, определять конструкцию зубчатых колес. В программе предоставлены все необходимые справочные материалы в виде таблиц и графиков, по которым выбираются коэффициенты и другие необходимые для расчетов значения. Программа предусматривает доступ к теоретическому материалу курса «Детали машин» и возможность сохранения результатов расчетов в отдельном файле. Приведены рекомендации по использованию данной программы.

**Ключевые слова:** передача, зубчатые колеса, компьютерная программа.

The computer program GearKURT has been created to calculate mechanical gears. The program allows you to calculate gears:

- closed cylindrical spur gear
- closed cylindrical helical gear
- open cylindrical spur gear
- Novikov's gear
- closed bevel spur gear
- closed bevel gear with indirect teeth
- open bevel gear
- worm-gear.

The computer program has a dialog interface in the object-oriented programming language Delphi and compiled into an exe-file. The program allows to choose the necessary material and method of heat treatment for the manufacture of gears, to calculate the optimal geometric dimensions and transmission parameters, to determine the design of gears. The program provides all the necessary reference materials in the form of tables and graphs, which must be used to select the coefficients and other values necessary for calculations. The program provides access to the theoretical material of the course "Machine Parts" and the ability to save the results of calculations in a separate file. Recommendations for using this program are given.

**Key words:** transmission, gears, computer program.

**Вступ.** Розвиток сучасної техніки висуває високі вимоги до виробів машинобудування з точки зору зниження ваги конструкцій, підвищення їх довговічності, надійності та продуктивності. Підвищення технічного рівня робочих машин і збереження його протягом заданого періоду експлуатації є найбільш актуальними завданнями сучасного машинобудування.

У зв'язку з поширенням застосування у сучасному машинобудуванні швидкохідних двигунів значно

зросла роль понижувальних передач. Необхідність застосування передач як проміжних ланок між двигуном та виконавчим органом робочої машини пов'язана з необхідністю зменшувати частоту обертання та підвищити крутний момент. Механічні передачі мають велике значення у машинобудуванні. У зв'язку із цим велика увага приділяється вдосконалюванню та розвитку передач: розширенню меж потужності та швид-

кості, зниженню габаритів і маси, збільшенню довговічності та надійності.

Найпоширенішими типами механічних передач є зубчасті передачі, які застосовуються у всіх галузях машинобудування, зокрема в транспортній галузі, в тому числі, на залізниці, в металорізальних верстатах, в приладобудуванні тощо.

Крім того, створення інформаційного суспільства та соціально-економічні зміни є передумовою необхідності підготовки кожної людини до самореалізації та удосконалення на протязі усього життя. Це орієнтує освітнє співтовариство всіх країн миру на пошук нових шляхів і стратегій удосконалення освіти. Важливу роль у цьому процесі відіграють інформаційні комп'ютерні технології. На порядку денному виникає проблема зміни освітньої парадигми згідно з вимогами суспільства та стратегіями навчальних установ з орієнтацією на постійний розвиток особистості. При цьому велике значення приділяється інформаційним комп'ютерним технологіям і їх впливу на систему освіти [6].

Таким чином, постає задача створення комп'ютерних програм, які дозволяють розраховувати та проектувати оптимальні конструкції деталей та вузлів машин, зокрема, зубчастих передач.

**Метою** створення даної комп'ютерної програми було не тільки отримання оптимальної конструкції зубчастої передачі, але й передбачення можливості використання програми в навчальному процесі. Тому дана комп'ютерна програма має діалоговий інтерфейс, дозволяє обирати необхідний матеріал та спосіб термообробки для виготовлення зубчастих коліс, проводити розрахунки оптимальних геометричних розмірів та параметрів передач, визначати конструкцію зубчастих коліс. У програмі надані всі необхідні довідкові матеріали у вигляді таблиць та графіків, по яким необхідно обирати коефіцієнти та інші необхідні для розрахунків значення. Програма передбачає доступ до теоретичного матеріалу курсу «Деталі машин» та можливість зберігати результати розрахунків в окремому файлі. Наведені рекомендації щодо використання даної програми.

#### **Основні положення методики розрахунку зубчастих передач.**

Основним критерієм оптимальної конструкції зубчастої передачі є зменшення її габаритів при виконанні умов міцності по контактним і згинальним напруженням. Зменшення габаритів передачі веде до зменшення маси редуктора, а, отже, і його собівартості.

Зменшення габаритів і маси зубчастих передач в значній мірі залежить від виду термообробки. Габарити циліндричної зубчастої передачі визначаються міжосьовою відстанню, яка, у свою чергу, залежить від допустимих контактних напружень  $[\sigma_H]$ , значення яких істотно зростає з підвищенням твердості [2]. В той самий час міжосьова відстань залежить від коефіцієнту  $\psi_{ba}$ , який зменшується з підвищенням твердості [2]. Але оскільки допустимі контактні напруження

$[\sigma_H]$  в більшій мірі впливають на габарити, а отже, на масу та ціну редуктора, у крупносерійному виробництві вигідно застосовувати колеса з високою твердістю зубців.

При високій твердості зубців зустрічаються випадки, коли головним критерієм працездатності стає міцність не по контактним, а по згинальним напруженням, тоді згинальну міцність можна підвищити за рахунок позитивного зсуву та збільшення модуля при одночасному зменшенні числа зубців [2]. Усі ці фактори необхідно враховувати при виконанні розрахунків, оскільки вибір матеріалу, спосіб термообробки, остаточні значення міжосьової відстані, модулю зачеплення та інших геометричних параметрів передачі визначаються самостійно на основі рекомендацій, пропонованих у програмі, та вводяться вручну.

На першому етапі проектування зубчастих передач обирається матеріал та спосіб термообробки, визначаються допустимі контактні та згинальні напруження, а також допустимі напруження при перевантаженні. Проектувальний розрахунок полягає у визначенні основних геометричних розмірів зубчастих коліс. Для циліндричних закритих передач основним розміром, який визначає габарити передачі, є міжосьова відстань.

Міжосьова відстань для косозубих зубчастих коліс визначається за формулою:

$$a = 0,75(u+1) \cdot 3 \sqrt{\frac{E_{3\beta} \cdot T_2 \cdot K_{H\beta}}{[\sigma_H]^2 \cdot u^2 \cdot \psi_{ba}}},$$

де  $u$  – передаточне число передачі,  
 $E_{3\beta}$  – приведений модуль пружності для матеріалу шестерні та колеса,  
 $T_2$  – крутний момент на колесі,  
 $K_{H\beta}$  – коефіцієнт концентрації напружень,  
 $[\sigma_H]$  – допустимі контактні напруження,  
 $\psi_{ba}$  – коефіцієнт ширини колеса відносно міжосьової відстані.

Остаточне приймається стандартне значення міжосьової відстані.

Для конічних передач визначається діаметр дільного кола колеса за формулою:

$$d'_{e2} = 2,93 \sqrt{\frac{E_{3\beta} \cdot T_2 \cdot u \cdot K_{H\beta}}{\vartheta_H [\sigma_H]^2}},$$

де  $\vartheta_H$  – коефіцієнт, який характеризує зниження міцності конічної передачі в порівнянні з циліндричною.

Далі згідно методики розрахунку передач [4, 5] визначаються основні геометричні параметри зубчастих коліс, а саме, модуль зачеплення, число зубців, ширина та діаметри коліс, тощо.

Спроектовані передачі перевіряються на контактну та згинальну міцність.

Умова контактної міцності для косозубої циліндричної передачі:

$$\sigma_H = 1,18 Z_{H\beta} \sqrt{\frac{E_{зв} \cdot T_1 \cdot K_H}{d_1^2 \cdot b \cdot \sin 2\alpha} \left( \frac{u+1}{u} \right)} \leq [\sigma_H],$$

де  $Z_{H\beta}$  – коефіцієнт підвищення міцності за контактними напруженнями,

$T_1$  – крутний момент на шестерні,

$K_H$  – розрахунковий коефіцієнт, який враховує концентрацію напружень та динамічні навантаження,

$d_1$  – діаметр діляльного кола шестерні,

$b$  – ширина зубчатого венця,

$\alpha$  – кут зачеплення.

Умова згинальної міцності для косозубої циліндричної передачі:

$$\sigma_F = \frac{Z_{F\beta} \cdot Y_F \cdot F_t \cdot K_F}{b \cdot m_n} \leq [\sigma_F],$$

де  $Z_{F\beta}$  – коефіцієнт підвищення міцності косозубих передач,

$Y_F$  – коефіцієнт форми зубців,

$F_t$  – колова сила,

$m_n$  – нормальний модуль,

$[\sigma_F]$  – допустимі згинальні напруження

Аналогічно розраховуються прямозубі циліндричні передачі, конічні передачі, черв'ячні передачі, при цьому враховуються їх особливості. При розрахунку відкритих передач враховується, що на міцність більш впливають згинальні напруження, тому першим визначається модуль зачеплення.

Алгоритми розрахунку усіх передач закладені у код комп'ютерної програми «Розрахунок зубчастих передач за допомогою комп'ютерної програми GearKURT» (авторське свідоцтво №82688), яка може функціонувати на будь-якій IBM-сумісній електронно-обчислювальній машині (ЕОМ) в середі операційних систем (ОС): Windows 98, Windows Me, Windows 2000, Windows XP, Windows 7, Windows 8, Windows 10.

Програма GearKURT – це окрема програма, яка має діалоговий інтерфейс. Вона написана на об'єктно-орієнтованій мові програмування Delphi [7, 8] та скомпільована у exe-файл. Безпосередньо робота з програмою здійснюється у будь-якій системі Windows. Програма GearKURT не потребує окремої установки. Для успішного доступу до теоретичного матеріалу необхідна наявність на комп'ютері програми, яка дозволяє працювати в файлами, що мають розширення pdf, наприклад, Acrobat Reader чи будь-якої іншої.

Вимоги до конфігурації ЕОМ:

- центральний процесор: будь-який Intel-сумісний, тактова частота не нижче 600 MHz (рекомендується 1,4 GHz);

- оперативна пам'ять: не менше 512 MB (рекомендується 2048 MB);

- графічна підсистема: кількість пікселів – не нижче 800x600, 16-бітний колір;

- принтер (для отримання твердих копій документів);

- маніпулятор «миша».

Необхідно зазначити, що усе програмне забезпечення легальне, і є доступним для вільного використання, у відповідності з ліцензіями Sun Community License, Apache Software License, LGPL, BSD License, HP License та ін.

Програма GearKURT дозволяє проводити розрахунки передач:

- закритої циліндричної прямозубої передачі;

- закритої циліндричної косозубої передачі;

- відкритої циліндричної прямозубої передачі;

- передачі Новикова;

- закритої конічної прямозубої передачі;

- закритої конічної передачі з непрямыми зубами;

- відкритої конічної прямозубої передачі;

- черв'ячної передачі.

У програмі надані усі необхідні довідкові матеріали та теоретичний матеріал по розрахунку передач. Результати розрахунку можуть бути збережені у текстовому файлі.

**Опис програми.** Для запуску програми GearKURT необхідно запустити файл GearKURT.exe. Після запуску на екрані монітора з'являється панель користувача GearKURT (рис. 1), на якій потрібно вибрати мову інтерфейсу програми.



Рис. 1 – Панель користувача програми

У наступному вікні (рис.2) необхідно вибрати тип передачі та ввести вихідні дані, також при використанні програми в навчальному процесі можна ввести особисті дані студента.

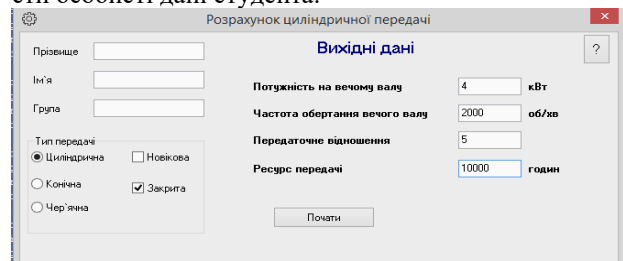


Рис. 2 – Панель вводу вхідних даних

При проведенні розрахунку зубчастих передач у наступному вікні (рис.3) необхідно вибрати ККД передачі та розрахувати значення кутової швидкості та крутних моментів на вхідному на вихідному валах пе-

редачі. Для отримання результату розрахунку у програмі необхідно натиснути на кнопку «=».

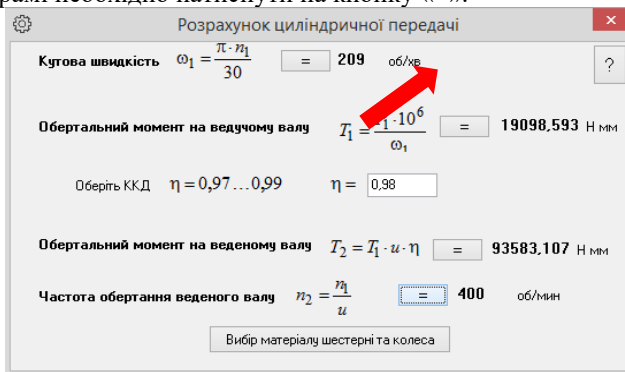


Рис. 3 – Панель розрахунку кутової швидкості та крутних моментів

У наступному вікні (рис.4) проводиться вибір матеріалу та виду термообробки зубчастих коліс передачі. У програмі наданий увесь довідковий матеріал у вигляді таблиць та графіків. Також є можливість переглянути вже отримані результати розрахунків. При підведенні курсору на таблицю з'являється додаткове вікно з поясненнями.

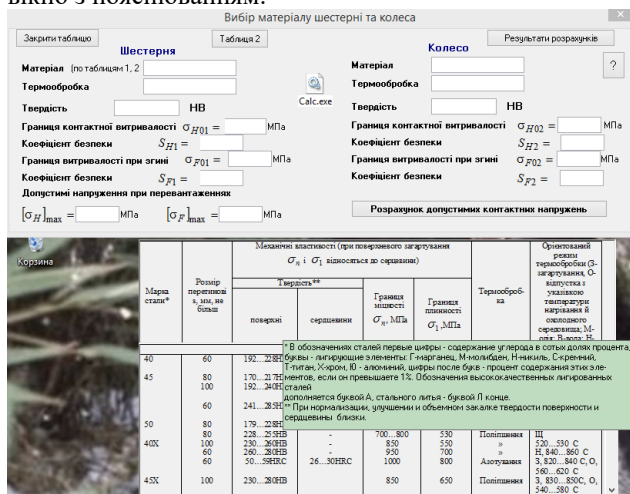


Рис. 4 – Панель вибору матеріалу та способу термообробки коліс

Далі проводиться розрахунок передачі згідно обраної методики [4, 5], тобто визначаються геометричні розміри зубчастих коліс, модуль зачеплення, проводиться вибір усіх необхідних коефіцієнтів, визначаються контактні та згинальні напруження. У разі невиконання умов міцності є можливість змінити ширину зубчатого вінця, модуль чи матеріал зубчастих коліс. Програма дозволяє повернутися до попередніх розрахунків з метою зміни матеріалу та способу термообробки, значень міжшової відстані, модулю, ширини зубчатого вінця та інших реомертичних параметрів в метю отримання більш оптимальної конструкції передачі.

При виконанні розрахунків є можливість ознайомитись з теоретичним матеріалом та отримати рекомендації, щодо користування програмою. Для

цього треба натиснути на кнопку «?» у верхньому правому куті панелі (рис.5).

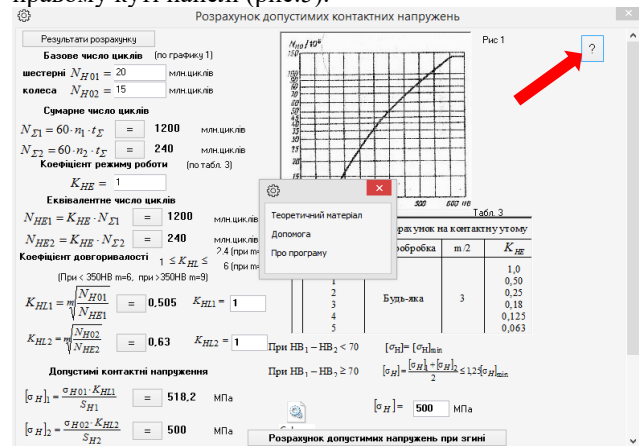


Рис. 5 – Кнопка «?» у програмі

Також на протязі виконання розрахунків можна подивитись на вже отримані раніше результати розрахунків (рис. 6).

Після того, як розраховані усі параметри передачі, визначаються основні конструктивні розміри передачі (рис. 7), і є можливість зберегти отримані результати у текстовому файлі. (рис.7, 8).

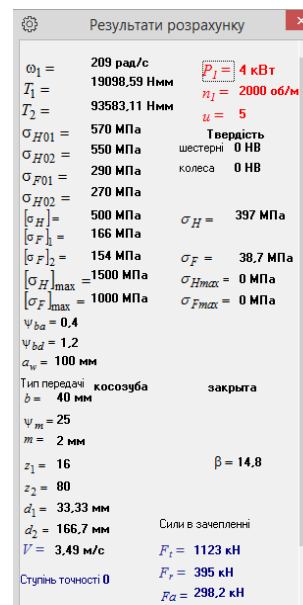


Рис. 6 – Панель отриманих результатів

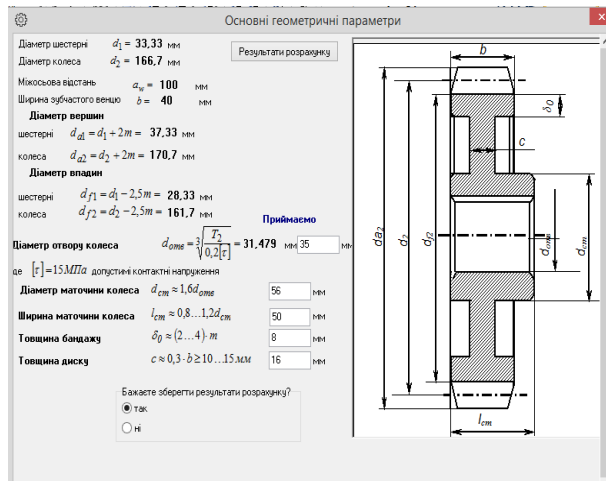


Рис. 7 – Панель розрахунку конструктивних параметрів

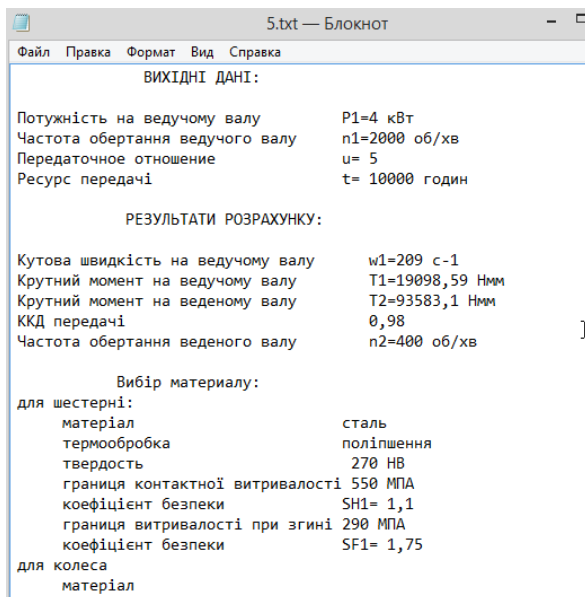


Рис. 8 – Файл з результатами розрахунків передачі

**Висновки.** Розроблена комп'ютерна програма «Розрахунок зубчастих передач за допомогою комп'ютерної програми GearKURT» (авторське свідоцтво №82688) дозволяє проводити розрахунки циліндричних, конічних та черв'ячних передач, вона може використовуватись в навчальному процесі при вивченні курсу «Деталі машин» при виконанні розрахунково-графічних та курсових робіт, в яких передбачений розрахунок механічних передач.

### Список літератури

1. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки. Міністерство інфраструктури. Затверджена постановою Кабінету міністрів України №1390 від 16 грудня 2009 р.
2. Іванов М. Н. Деталі машин. – М.: Вища школа, 2000. – 336 з.

3. В.І. Мороз, В.В. Захарченко, О.В. Надтока., Конспект лекцій «Основи конструювання деталей машин» з дисципліни «Деталі машин» Харків: УкрДАЗТ, 2013. – 133 с.

4. Проектування приводів загальномашинобудівного призначення: навчальний посібник / В. І. Мороз, В. В. Захарченко, О. В. Надтока, С. В. Бобрицький. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – 206 с.

5. В.В. Захарченко, О.В. Надтока, А.В. Павишенко. Завдання та методичні поради до виконання курсового проекту з дисципліни «Деталі машин і основи конструювання». Харків: УкрДАЗТ, 2013. – 69 с

6. Надтока О., В., Аксьонова Н.А., Оробінський О.В., Впровадження сучасних технологій навчання та технічних засобів при вивченні курсу «Деталі машин і основи конструювання» Тези доповідей науково-теоретичної конференції кафедр академії. – Харків, 2012, стор. 154.

7. А. Архангельский. Программирование в Delphi для Windows. Версии 2006, 2007, Turbo Delphi (+ CD-ROM). – Бином-Пресс, 2007, 1248 с.

8. С.В. Федотова. Создание Windows-приложений в среде Delphi. – М.: СОЛОН-Пресс, 2010. – 224 с: ил.

### References (transliterated)

- 1 State target program of railway transport reform for 2010-2019. Ministry of Infrastructure. Approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine №1390 of December 16, 2009
- 2 Ivanov M.N. Details of machines. - M.: Вища школа, 2000. – 336 z.
- 3 Moroz V.I., Zakharchenko V.V., Nadтока E.V., Lecture notes "Fundamentals of designing machine parts" in the discipline "Machine Parts" Kharkiv: UkrDAZT, 2013. -133 p.
4. Design of drives of general machine-building purpose: textbook / VI Moroz, VV Zakharchenko, OV Nadтока, SV Bobritsky. - Kharkiv: UkrDUZT, 2020. - 206 p.
- 5 Zakharchenko V.V., Nadтока E.V., Pavshenko A.V.. Tasks and methodical advice for the course project in the discipline "Details of machines and basics of design". Kharkiv: UkrDAZT, 2013. - 69 p
- 6 Nadтока E.V., Aksonova N.A., Orobinsky A.V., Introduction of modern teaching technologies and technical means in studying the course "Details of machines and basics of design" Abstracts of the scientific-methodical conference of the departments of the academy. – Kharkiv, 2012, p. 154.
- 7 A. Arkhangelsky. Programming in Delphi for Windows. Versions 2006, 2007, Turbo Delphi (+ CD-ROM). - Binom-Press, 2007, 1248 p.
- 8 С.В. Fedotova. Creating Windows-applications in the environment of Delphi. – М.: SOLON-Press, 2010. – 224 p.

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

**Надтока Елена Владимировна** – кандидат технических наук, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, доцент кафедры механики и проектирования машин; тел.: (057) 730-10-52; e-mail: [enadtoka@gmail.com](mailto:enadtoka@gmail.com), ORCID: 0000-0001-9639-4734

**Надтока Елена Володимирівна** – кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри механіки і проектування машин; тел.: (057) 730-10-52; e-mail: [enadtoka@gmail.com](mailto:enadtoka@gmail.com), ORCID: 0000-0001-9639-4734

**Nadtoka Elena Vladimirovna** – candidate of technical sciences, Ukrainian State University of railway transport, Associate Professor at the Department of mechanics and machine engineering, tel.: (057) 730-10-52; e-mail: [enadtoka@gmail.com](mailto:enadtoka@gmail.com), ORCID: 0000-0001-9639-4734

**Надтока Денис Михайлович** – студент строительного факультета и факультета «Информационно-управляющие системы и технологии» Украинского государственного университета железнодорожного транспорта; тел.: (068) 088-03-39; e-mail: [nadtokadenism@gmail.com](mailto:nadtokadenism@gmail.com)

**Надтока Денис Михайлович** – студент будівельного факультету и факультету «Інформаційно-керуючі системи та технології» Українського державний університет залізничного транспорту; тел.: (068) 088-03-39; e-mail: [nadtokadenism@gmail.com](mailto:nadtokadenism@gmail.com)

**Nadtoka Denis Mikhailovich** - student of the Faculty of Civil Engineering and the Faculty of «Information and Control Systems and Technologies», Ukrainian State University of railway transport, tel.: (068) 088-03-39; e-mail: [nadtokadenism@gmail.com](mailto:nadtokadenism@gmail.com)