

УДК 004.942:004.021

**О. Л. СТАНОВСЬКИЙ, П. С. ШВЕЦЬ, А. В. ТОРОПЕНКО, В. В. БОНДАРЕНКО, А. О. СТАНОВСЬКИЙ, О. АБУ ШЕНА, О. М. КРАСНОЖОН**

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЗВ'ЯЗНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ

Показано, що оптимізація складних систем в САПР повинна враховувати в якості обмежень об'єктивно існуючий зв'язок в межах деякої області оптимізуючих аргументів між окремими елементами цих систем. Розглянуто проблему «зворотної» оптимізації, коли цільовими функціями є параметри області зв'язності. Теоретично доведені і практично підтверджені можливості зниження часу проектування та якості продукції електротехнічного виробництва за рахунок використання САПР, яка забезпечує ефективну оптимізацію параметрів слабов'язаних підсистем об'єкта проектування з цільовою функцією у вигляді області зв'язності.

**Ключові слова:** зв'язані елементи складних систем, параметри області зв'язності, зворотна оптимізація, САПР.

**Вступ.** Для ефективного розв'язання багатьох задач оптимізації складних систем в САПР важливе значення має результат вибору відповідної цільової функції. При такому виборі увагу необхідно звертати не тільки на функціональні параметри спроектованої системи, але й на деякі початкові, дані ззовні обмеження, які настільки важливі для характеристик майбутньої системи, що їх краще було б отримувати саме в результаті оптимізації. Очевидними прикладами таких обмежень можуть служити деякі стандартні розміри машин та механізмів, граничні швидкості обертання та прямолінійного руху окремих деталей та вузлів в механіці, «паспортні» напруження та струми в електрообладнанні та багато інших.

Але існують й менш очевидні параметри систем, які самі є «вторинними» при розв'язанні деяких задач оптимізації та які виникають лише в результаті глибокого аналізу процесів, що протікають в об'єкті проектування під час його життєвого циклу. До таких параметрів можна віднести показники зв'язності елементів складних систем, в самій можливості реально або віртуально впливати на цю зв'язність і знаходити за рахунок такого впливу додаткові можливості створення сучасної продукції із «заоптимальними» властивостями.

Із врахуванням постійно зростаючих вимог до якості продукції, технологій та обладнання сучасного виробництва, можна стверджувати, що пошук та створення методів такої оптимізації є надзвичайно актуальним.

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** Оптимізація або програмування – це пошук вектора аргументів  $\mathbf{x}$ , що доставляють екстремум деякої цільової функції  $f(\mathbf{x})$  [1]. Багатокритеріальна оптимізація або програмування – це процес одночасної оптимізації двох або більше конфлікуючих цільових функцій у заданій області визначення [2].

Як відомо, завдання багатокритеріальної оптимізації формулюється наступним чином [3]:

$$\min_{\mathbf{x}} \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})\}, \quad \mathbf{x} \in S, \quad (1)$$

де  $f_i: R^n \rightarrow R$  це  $k$  ( $k \geq 2$ ) цільових функцій, а усі можливі для цієї задачі вектори рішень  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  відносяться до області визначення  $S$ .

Завдання багатокритеріальної оптимізації полягає в пошуку вектора рішення (множини оптимізуючих аргументів), що задовольняє накладеним обме-

женням і оптимізує деяку загальну векторну функцію, елементи якої відповідають окремим цільовим функціям з (1). Останні утворюють математичний опис критерію задовільності і, як правило, взаємно конфлікують. Звідси, оптимізувати – означає знайти таке рішення, при якому значення окремих цільових функцій були б прийнятними для постановника завдання [4].

При автоматизованому проектуванні систем часто виникає проблема, викликана тим, що окремі параметри тієї або іншої системи належать одночасно двом або більше її елементам [5]. Наприклад, проектуючи редуктор, неможливо оптимізувати швидкість обертання зубчастого колеса без врахування «інтересів» іншої шестерні, яка знаходиться з першою на одному валу [6]; не можна проектувати графік відключення однієї частини електронного пристрою, не погоджуючи результат проектування з іншою частиною, якщо у них загальний вимикач [7] і т. п.

Подібні зв'язки між параметрами елементів є жорстким обмеженням і, наприклад, при послідовному проектуванні елементів є спроектованими параметрами тільки для першого з них, – для подальших вони автоматично переводяться в множину початкових даних.

Такий підхід може як спростувати проектування (як мінімум, одним розрахунковим параметром менше), так і істотно ускладнювати його, примушуючи неодноразово повертатися до вже спроектованих елементів або проектувати систему в цілому одночасно.

Для рішення задачі оптимізації в цьому випадку використовується комплексний генетичний алгоритм, доповнений блоком врахування нових обмежень [8].

Останнім часом з'явилися роботи, в яких згадані вище зв'язки між елементами систем, не є жорсткими [9]. Наявність таких зв'язків дозволяє вирішувати завдання оптимізації систем більш ефективно, наприклад, глибше, ніж за Парето [10]. І в цьому випадку використовуються комплексні генетичні алгоритми, доповнені блоками адаптації розрахункових моделей під «гнучкий» зв'язок між цільовими функціями оптимізації [11].

У цих випадках додаткові зв'язки між параметрами елементів спроектованих систем використовуються виключно як жорсткі або гнучкі обмеження на зміни варіюваних в процесі оптимізації параметрів. В даній роботі пропонується завдання, в процесі розв'язання якого оптимізації піддається сам зв'язок між елементами, його ступінь або глибина.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є зменшення термінів підготовки виробництва і підвищення якості продукції промислових підприємств на етапі автоматизованого проектування об'єктів із слабкозв'язаними елементами шляхом розробки та впровадження вдосконаленого методу оптимізації в САПР, який базується на використанні в якості цільової функції оптимізації розміру області зв'язності аргументів останньої.

Для досягнення цієї мети в роботі були розв'язані наступні задачі:

- проаналізовані існуючі проблеми і методи автоматизованого проектування слабкозв'язаних технічних об'єктів в САПР;
- виконана постановка та удосконалений метод розв'язання завдань оптимізації слабкозв'язаних технічних систем в САПР за рахунок використання в якості цільової функції оптимізації розміру області зв'язності аргументів останньої;
- здійснене лабораторне комп'ютерне випробування результатів дослідження та виробниче випробування САПР-К «EVOSOFT», яка побудована на основі запропонованого методу, з позитивним технічним ефектом.

**Розв'язання «прямої» задачі оптимізації зв'язаних систем.** Розглянемо для простоти викладення двохкритеріальну задачу оптимізації (максимізації) двох цільових функцій  $f_1(x)$  і  $f_2(x)$  одного одно-вимірного аргументу  $x$  [12, 13]. В залежності від зв'язності аргументів  $x$  для кожної з функцій отримуємо три задачі та три різних рішення, а також, що суттєво, три різних значення оптимізуючих аргументів та три ступеня (глибини) рішення задачі оптимізації.

1. Якщо аргументи для кожної з цільових функцій незалежні (у тому сенсі, що вони можуть приймати незалежні значення з області свого існування  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ ), то маємо дві незалежні задачі оптимізації [14] та два її рішення:  $x^*$ , яке забезпечує  $f_{1\max}(x^*)$ , та  $x^{**}$ , яке забезпечує  $f_{2\max}(x^{**})$  (рис. 1 а).

2. Якщо аргументи сильнозв'язані, або повністю залежні (можуть приймати тільки єдине для кожної з цільових функцій значення з області свого існування  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ ), то маємо одну задачу, наприклад, Парето-оптимізації [15] та її єдине рішення  $x^*$ , яке забезпечує  $f_{1\text{opt}}(x^*) = f_{2\text{opt}}(x^*)$  (рис. 1 б). Ситуація, коли досягнута ефективність за Парето – це ситуація, коли всі вигоди від зміни аргументів вичерпані [16, 17]. Діапазон значень оптимальних за Парето рішень в області допустимих значень дає корисну інформацію про досліджувану задачу, якщо цільові функції обмежені областю визначення.

Одночасно це дає нижню оцінку можливих оптимумів при сильнозв'язаних аргументах.

Для розв'язання задач багатовимірної оптимізації по кільковимірних сильнозв'язаних аргументах в САПР використовують еволюційні методи, зокрема, комплексний генетичний алгоритм (КГА), схема якого призначена для постійного моніторингу під час еволюції рішення з метою недопущення порушення умов зв'язності. В ній застосовуються розгалужені комплексні символічні моделі генотипу об'єкта проектування, який містить по-різному зв'язані параметри елементів [18].

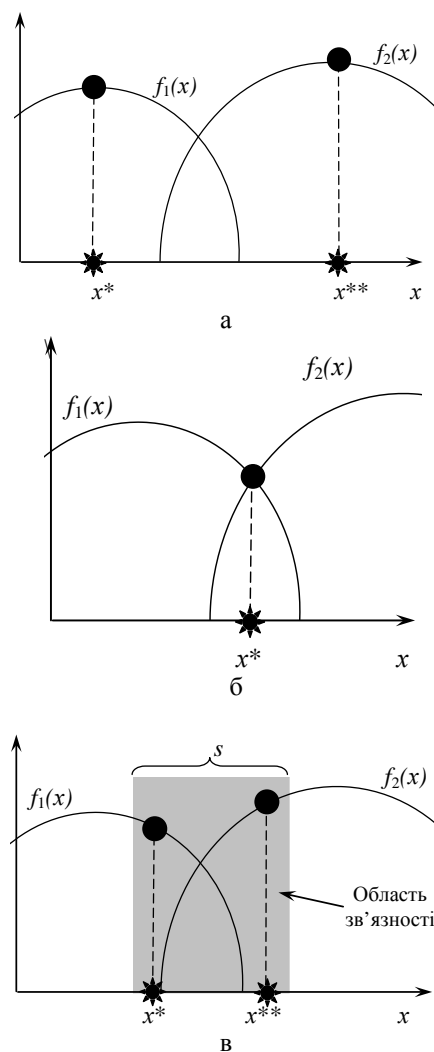


Рис. 1 – Схема двохкритеріальної оптимізації при одно-вимірному аргументі: а – аргумент допускає незалежні рішення; б – аргумент допускає лише єдине рішення; в – аргумент допускає зв'язане рішення

Це дає незалежні оптимуми для обох функцій і, одночасно, верхню (при максимізації) оцінку можливих рішень при оптимізації.

3. Додаткова парадоксальна можливість виконати віртуальну багатокритеріальну *розширену* Парето-оптимізацію «глибше, ніж за Парето» [19] ілюструє рис. 1 в. Тут наведено випадок, коли аргументи слабкозв'язані, або неповністю залежні (можуть приймати різні для кожної з цільових функцій значення з області свого існування  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ , але тільки такі, що належать ще й деякій «області зв'язності»)  $z = x_{\text{звmax}} - x_{\text{звmin}}$  ( $x_{\text{звmin}} \leq x \leq x_{\text{звmax}}$ ), яка цілком лежить в області існування та менша за останню), то маємо одну задачу оптимізації та, в загальному випадку, два її рішення  $x^*$  та  $x^{**}$ , які забезпечують  $f_{1\text{opt}}(x^*) \neq f_{2\text{opt}}(x^*)$  (рис. 1 в). Розширений оптимум Парето розташовується нижче верхньої та вище нижньої оцінок для наведених вище двох крайніх випадків оптимізації.

Для розв'язання задач багатовимірної оптимізації по кільковимірних слабкозв'язаних аргументах в САПР використовують адаптивні еволюційні методи, зокрема, адаптивний комплексний генетичний алгоритм (АКГА) [11].

В ньому комплексні символічні моделі генотипу об'єкта, що містить по-різному зв'язані параметри елементів, а також методи «заселення» множини аргументів первинними особинами, оператори роботи з такими моделями та критерії управління проектними процедурами засновані на адаптивній комплексній еволюційній оптимізації.

Схема двокритеріальної задачі оптимізації цільових функцій  $f_1(x)$  і  $f_2(x)$  єдиного векторного аргументу  $x(x_1, x_2)$ , який складається з двох незалежних змінних і, фактично, є двома аргументами  $x_1$  та  $x_2$ , у яких компоненти повністю співпадають ( $x_1 = x_2 = x$ ), наведена на рис. 2.

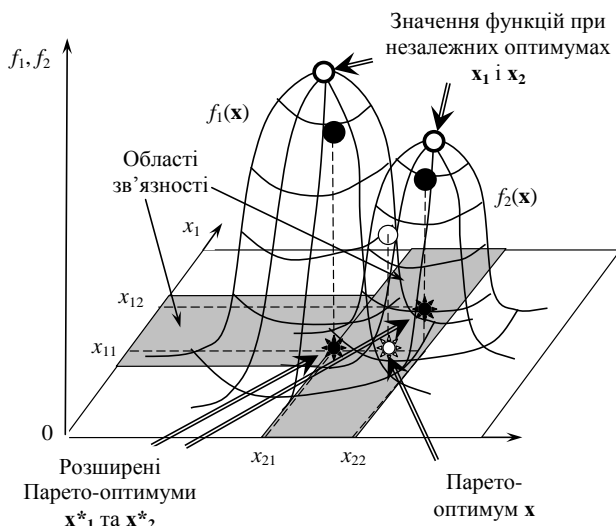


Рис. 2 – Схема двокритеріальної розширеної оптимізації цільових функцій  $f_1(x)$  і  $f_2(x)$  при двовимірному аргументі  $x(x_1, x_2)$

Як видно з рис. 2, «жорсткий» двокритеріальний Парето-оптимум для цільових функцій  $f_1(x)$  і  $f_2(x)$  для сильнозв'язаних аргументів може бути покращено при слабкозв'язаних, звичайно, в переносному сенсі, оскільки обидва компоненти  $x_1$  та  $x_2$  оптимізуючого аргументу  $x$  фактично «роздвоюються» на нерівні один одному  $x_{11}$  і  $x_{12}$ , а також на  $x_{21}$  і  $x_{22}$ .

**Розв'язання «зворотної» задачі оптимізації зв'язаних систем.** Повернемося до виразу (1) та представимо його в якості **прямої** двокритеріальної задачі оптимізації функцій двох аргументів, в яких їхні компоненти співпадають лише частково, у вигляді:

$$\min_{x_1, x_2} \{f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)\}, \quad x_1 \in S_1, x_2 \in S_2 \quad (2)$$

де  $f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)$  – цільові функції,  $x_1, x_2$  – вектори, які оптимізують.

Якщо між оптимізуючими векторами є слабкий зв'язок, можна записати:

$$x_1 = x_2 + b, \quad (3)$$

де  $b$  – векторний розмір області зв'язності. Значимо, що розмірність цієї області дорівнює кількості зв'язаних компонентів оптимізуючих векторів. Якщо в результаті аналізу конкретного об'єкта проектування виявляється, що розмірність області зв'язності до-

рівнює нулю, то оптимізація може виконуватися окремо:  $f_1(x_1, x_2)$  по  $x_1$ , а  $f_2(x_1, x_2)$  – по  $x_2$ .

Величина області зв'язності  $b$  при розв'язанні прямих оптимізаційних задач входить до множини обмежень і задається на підставі аналізу майбутнього об'єкта. При стохастичному характері області зв'язності ймовірність відхилень  $x_1$  та  $x_2$  в її межах залежить від властивостей об'єкта та умов його експлуатації. В процесі оптимального проектування області зв'язності може переміщуватися та змінювати свій розмір  $b$ , яка також є випадковою величиною, але параметри слабкозв'язаних елементів будуть завжди залишатися в ній.

В рамках розв'язання **зворотної** оптимізаційної задачі в якості цільових функцій вибираються вже не властивості об'єкта, а саме область зв'язності  $b$ :

$$\min_{x_1, x_2} \{b\}, \quad x_1 \in S_1, x_2 \in S_2. \quad (4)$$

Це, як сказано вище, надає додаткові можливості САПР, оскільки параметри цільових функцій  $f_1(x_1, x_2)$  та  $f_2(x_1, x_2)$  відбивають одні властивості об'єкта проектування, а параметри області зв'язності  $b$ , як правило, зовсім інші, такі, що при «звичайній» оптимізації залишаються поза увагою останньої.

Розглянемо конкретний приклад з області проектування електротехнічного обладнання. В цьому випадку завдання **прямої** двокритеріальної оптимізації може виглядати таким чином: спроектувати такий трансформатор, який, залишаючись у рамках теоретичних і технологічних обмежень, при мінімальних втратах матеріалів ( $f_1(x_1, x_2)$ ) забезпечить відсутність перегріву обмоток ( $f_2(x_1, x_2)$ ) у всіх штатних режимах його роботи [10, 18]. У такій постановці кожна згортка цільових функцій має явно виражений екстремум, оскільки збільшення габаритів трансформатора призводить до перевитрати матеріалів, а зменшення – до перегріву.

Для цього прикладу пряме завдання оптимізації (2) виглядає таким чином [19]:

$$\min_{x_1, x_2} \{\theta(x_1, x_2), m_{тр}(x_1, x_2)\}, \quad x_1 \in S_1, x_2 \in S_2, \quad (5)$$

а зворотнє за (4) таким:

$$\min_{x_1, x_2} \{b(x_1, x_2)\}, \quad x_1 \in S_1, x_2 \in S_2 \quad (6)$$

де  $\theta(x_1)$  – перевищення температури обмоток і сердечника над температурою навколишнього середовища  $\Theta$ , яке можна розрахувати за відомою формулою:

$$f_1(x_1) = \theta(x_1) = \frac{P_{обм} + P_{серд}}{\alpha_0(S_{обм} + S_{серд})} + \Delta\theta K; \quad (7)$$

$$x_1 = \{P_{обм}, P_{серд}, \alpha_0, S_{обм}, S_{серд}, \Delta\theta\},$$

де  $P_{обм}$  – сумарні втрати в обмотці, Вт;  $P_{серд}$  – сумарні втрати в сердечнику, Вт;  $\alpha_0$  – середній коефіцієнт тепловіддачі відкритих поверхонь трансформатора, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $S_{обм}$  – площа відкритої поверхні мідної обмотки, м<sup>2</sup>;  $S_{серд}$  – площа відкритої поверхні сталевो-

го сердечника,  $m^2$ ;  $\Delta\Theta$  – перепад температур від внутрішніх шарів обмоток до зовнішніх, К, а  $m_{тр}(x_2)$  – маса трансформатора, яка розраховується за відомою формулою:

$$f_2(x_2) = m_{тр}(x_2) = m_{обм} + m_{серд} + m_{доп}; \quad (8)$$

$$x_2 = \{m_{обм}, m_{серд}, m_{доп}\},$$

де  $m_{обм}$  – маса обмотки;  $m_{серд}$  – маса сердечника;  $m_{доп}$  – маса допоміжних елементів трансформатора (кріплення, клеми, прокладки, пропитка, тощо).

Кожний з аргументів  $x_1$  і  $x_2$ , що входять до (7) та (8), у свою чергу, є функцією множини конструктивних параметрів трансформатора.

Оскільки в цьому прикладі два аргументи  $x_1$  і  $x_2$  представляють собою частково пересічні множини (компоненти  $x_2 = \{m_{обм}, m_{серд}\}$  однозначно залежать від деяких компонентів  $x_1 = \{S_{обм}, S_{серд}\}$ , в наявності дві цільові функції  $f_1(x_1, x_2)$  і  $f_2(x_1, x_2)$ , що конкурують «за ресурси» – конструктивні параметри обмоток та сердечника трансформатора.

Завдяки цьому «заоптимальні» значення (глибше, ніж за Парето) можуть бути отримані не тільки на шляху виконання не зовсім сумісних вимог до розміру та температурного режиму трансформатора, але й шляху конструктивних вимог, які впливають на **b**.

Аналогічні оптимізаційні задачі розв'язували при автоматизованому проектуванні механічних конструкцій, а саме, двохступінчатого циліндричного редуктора [21], в якому в якості параметрів цільової функції **b** виступають різниці між потужностями, що передаються окремими ступеннями редуктора, та їхніми ККД, а в якості оптимізуючих параметрів – розміри деталей редуктора та умови тертя у його підшипниках.

**Висновки.** В результаті аналізу проблем і методів автоматизованого проектування зв'язаних технічних об'єктів в САПР виконана постановка та удосконалений метод розв'язання завдань оптимізації слабкозв'язаних технічних систем за рахунок використання в якості цільової функції оптимізації розміру області зв'язності аргументів останньої, що надає додаткові можливості проектувальнику, оскільки параметри цільових функцій відбивають одні властивості об'єкта проектування, а параметри області зв'язності, як правило, інші, такі, що при «звичайній» оптимізації залишаються поза увагою останньої.

Теоретично доведені і практично, за допомогою комп'ютерного експерименту і виробничих випробувань, підтверджені можливості підвищення швидкості проектування та якості продукції електротехнічного виробництва за рахунок використання САПР, що забезпечують ефективну оптимізацію параметрів слабкозв'язаних підсистем об'єкта проектування із цільовою функцією у вигляді області зв'язності.

В Одеському МП НТЦ «Техсервіс» (Україна) проведено випробування розробленої в ОНПУ САПР-К «EVOSOFT». В якості об'єкта автоматизованого проектування використовували трансформатор моделі ТМ 25/10/0,4. В результаті випробування встановлено, що використання згаданої вище САПР-К електротехнічного обладнання «EVOSOFT» дозволило змен-

шити масу трансформатора на 15 %, при цьому залишивши незмінним термін його служби, та знизити термін проектування, в середньому на 28,6 %.

**Список літератури:** 1. Зуховицький, С. И. Линейное и выпуклое программирование [Текст] / С. И. Зуховицький, Л. И. Авдеева. – М.: Наука, 1994. – 288 с. 2. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения [Текст] / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с. 3. Шоробура, Н. Н. Решение задач многокритериальной оптимизации сложных объектов и систем. – ДонНТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://www.masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita\\_shorobura.pdf](http://www.masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita_shorobura.pdf)>. – 11.07.2010. 4. Многокритериальная оптимизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://ru.wikipedia.org/wiki/ Многокритериальная\\_оптимизация](http://ru.wikipedia.org/wiki/Многокритериальная_оптимизация)>. – 26.10.2013. 5. Тонконогий, В. М. Разработка САПР многоиточного резбошлифования [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпери, А. А. Березовский // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – № 41. – С. 212–216. 6. Тонконогий, В. М. Многоцелевая оптимизация методом комплексного генетического алгоритма [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпери, Д. А. Монова // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 6. – Харків, НТУ «ХПБ», 2011. – С. 276–281. 7. Становский, А. Л. Эволюционная оптимизация электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швеи, А. В. Торопенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2013. – № 4/3 (64). – С. 36–40. 8. Тонконогий, В. М. Многопараметрическая оптимизация методом комплексного генетического алгоритма [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпери, Д. А. Монова // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании – 2011». – Севастополь: СНТУ, 5 – 10 сентября 2011. – С. 56–57. 9. Духанина, М. А. Эволюционная оптимизация слабосвязанных систем [Текст] / М. А. Духанина, Е. Ю. Лебедева, П. С. Швеи, Л. А. Одукалец // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова, Київ, 2013. – № 67 – С. 74–81. 10. Становский, А. Л. Оптимизация слабосвязанных систем в автоматизированном проектировании и управлении [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швеи, И. Н. Щедров // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 6. – Харків, НТУ «ХПБ», 2011. – С. 129–134. 11. Прокопович, И. В. Адаптивный генетический алгоритм для «мягких» эволюционных вычислений [Текст] / И. В. Прокопович, П. С. Швеи, И. И. Становская, М. А. Духанина // Праці Одеського політехнічного університету, 2012. – Вип. 2(39). – С. 218–224. 12. Постановка задачи многокритериальной оптимизации. Множество Парето [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc= MO/ch1101.mod/?cou=MO/base.cou](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/ch1101.mod/?cou=MO/base.cou)>. – 16.04.2011. 13. Безруж, В. М. Принятие оптимальных решений в телекоммуникационных сетях с учетом совокупности показателей качества [Текст] / В. М. Безруж, А. Н. Буханько // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 52 – 66. 14. Перпери, А. А. К решению задачи многоцелевой оптимизации [Текст] / А. А. Перпери, В. М. Тонконогий, Д. А. Монова // Материалы XIX семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 17 – 18 марта 2011. – С. 5–6. 15. Становский, А. Л. САПР электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швеи, А. В. Торопенко // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 8. – Харків, НТУ «ХПБ». – С. 133–143. 16. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В. Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 176 с. 17. Петросян, Л. А. Теория игр [Текст] / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. В. Шевкопляс. – СПб: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с. 18. Становский, А. Л. Эволюционная оптимизация слабосвязанных технических систем в САПР [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швеи, Д. А. Желудобовский // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – 2011. – Вип. 2(36). – С. 234–238. 19. Становский, А. Л. САПР электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами [Текст] / А. Л. Становский, П. С. Швеи, А. В. Торопенко // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 8. – Харків, НТУ «ХПБ». – С. 133–143. 20. Тонконогий, В. М. Оптимизация параллельной обработки в САПР [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпери, Д. А. Пурич // Материалы международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения». – Севастополь, СНТУ, 5 – 9 сентября 2011. – С. 268 – 269. 21. Редукторы Ц2-250, Ц2-300, Ц2-350, Ц2-400, Ц2-400П. [Электрон-

ний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.evropivod.ru/catalogue/cylindrical/double-stage/reduktory-c2-400-c2-400p>. – 07.08.2015.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zuhovitskiy, S. I., Avdeeva, L. I. (1994). Lineynoe i vyipukloe programmirovaniye. Moscow: Nauka, 288. 2. Kini, R. L., Rayfa, N. (1981). Prinyatie resheniy pri mnogih kriteriyah: predpochteniya i zamesheniya. Moscow: Radio i svyaz, 560. 3. Shorobura, N. N. Reshenie zadach mnogokriterialnoy optimizatsii slozhnykh ob'ektov i sistem. DonNTU. Avialable: [http://www.masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita\\_shorobura.pdf](http://www.masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita_shorobura.pdf). 11.07.2010. 4. Mnogokriterialnaya optimizatsiya. Avialable: <[http://ru.wikipedia.org/wiki/Mnogokriterialnaya\\_optimizatsiya](http://ru.wikipedia.org/wiki/Mnogokriterialnaya_optimizatsiya)>. 26.10.2013. 5. Tonkonogiy, V. M., Perperi, A. A., Berezovskiy, A. A. (2011). Razrabotka SAPR mnogonitochno go rezboshlifovaniya. Visnyk Odeskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnistva ta arhitektury, № 41, 212–216. 6. Tonkonogiy, V. M., Perperi, A. A., Monova, D. A. (2011). Mnogotselovaya optimizatsiya metodom kompleksnogo geneticheskogo algoritma. Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni: zbirnyk naukovykh prats, V. 6, Harkov, NTU «HPI», 276–281. 7. Stanovskiy, A. L., Shvets, P. S., Toropenko, A. V. (2013). Evolyutsionnaya optimizatsiya elektrotehnicheskogo oborudovaniya so slabosvyazannymi elementami. Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy. Informatsionnyie tehnologii, Harkov, 4/3 (64), 36–40. 8. Tonkonogiy, V. M., Perperi, A. A., Monova, D. A. (2011). Mnogoparametricheskaya optimizatsiya metodom kompleksnogo geneticheskogo algoritma. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Informatsionnyie tehnologii i informatsionnaya bezopasnost v nauke, tehnike i obrazovanii – 2011». Sevastopol: SNTU, 56–57. 9. Duhanina, M. A., Lebedeva, E. Yu., Shvets, P. S., Odukalets, L. A. (2013). Evolyutsionnaya optimizatsiya slabosvyazannykh sistem. Zbirnyk naukovykh prats Institutu problem modelyuvannya v energetitsi Im. G. S. Puhova, Kyiv, № 67, 74–81. 10. Stanovskiy, A. L., Shvets, P. S., Schedrov, I. N. (2011). Optimizatsiya slabosvyazannykh sistem v avtomatizirovannom proektirovanii i upravlenii. Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni: zbirnyk naukovykh prats, V. 6, Harkiv, NTU «HPI»,

129–134. 11. Prokopovich, I. V., Shvets, P. S., Stanovskaya, I. I., Duhanina, M. A. (2012). Adaptivnyiy geneticheskiiy algoritm dlya «myagkih» evolyutsionnykh vyichisleniy. Pratsi Odeskogo politehnichnogo universitetu, V. 2(39), 218–224. 12. Postanovka zadachi mnogokriterialnoy optimizatsii. Mnozhestvo Pareto. Avialable: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/ch1101.mod/?cou=MO/base.cou>. 16.04.2011. 13. Bezruk, V. M., Buhanko, A. N. (2012). Prinyatie optimalnykh resheniy v telekommunikatsionnykh setyah s ucheto m sovokupnosti pokazateley kachestva. Problemyi telekommunikatsiy, № 1(6), 52–66. 14. Perperi, A. A., Tonkonogiy, V. M., Monova, D. A. (2011). K resheniyu zadachi mnogotselovoy optimizatsii. Materialy XIX seminaru «Modelirovaniye v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh». Odessa: ONPU, 5–6. 15. Stanovskiy, A. L., Shvets, P. S., Toropenko, A. V. (2013). SAPR elektrotehnicheskogo oborudovaniya so slabosvyazannymi elementami. Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni: zbirnyk naukovykh prats, Vip. 8, Harkov, NTU «HPI», 133–143. 16. Nogin, V. D. (2005). Prinyatie resheniy v mnogokriterialnoy srede: koliche-stvennyiy podhod. Moskva: FIZMATLIT, 176. 17. Petrosyan, L. A., Zenkevich, N. A., Shevkoplyas, E. V. (2012). Teoriya igr. Saint-Peterburg, 432. 18. Stanovskiy, A. L., Shvets, P. S., Zheldubovskiy, D. A. (2011). Evolyutsionnaya optimizatsiya slabosvyazannykh tehnicheskikh sistem v SAPR. Pratsi Odeskogo politehnichnogo unIversitetu: Naukoviy ta naukovovirobnichiy zbirnik, V. 2(36), 234–238. 19. Stanovskiy, A. L., Shvets, P. S., Toropenko, A. V. (2013). SAPR elektrotehnicheskogo oborudovaniya so slabosvyazannymi elementami. Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni: zbirnyk naukovykh prats, V. 8, Harkiv, NTU «HPI», 133–143. 20. Tonkonogiy, V. M., Perperi, A. A., Purich, D. A. (2011). Optimizatsiya parallelnoy obrabotki v SAPR. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Avtomatizatsiya: problemyi, idei, resheniya», Sevastopol, SNTU, 268–269. 21. Reduktory Ts2-250, Ts2-300, Ts2-350, Ts2-400, Ts2-400P. Avialable: <http://www.evropivod.ru/catalogue/cylindrical/double-stage/reduktory-c2-400-c2-400p>. 07.08.2015.

Надійшла (received) 07.10.2015

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

**Становський Олександр Леонідович** – доктор технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; тел.: 095-279-15-15; e-mail: [stanovsky@mail.ru](mailto:stanovsky@mail.ru).

**Становский Александр Леонидович** – доктор технических наук, Одесский национальный политехнический университет, профессор кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одеса, Украина, 65044; тел.: 095-279-15-15; e-mail: [stanovsky@mail.ru](mailto:stanovsky@mail.ru).

**Stanovskiy Alexandr** – Doctor of technical Science, Odessa National Polytechnic University, Professor of Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; tel.: 095-279-15-15; e-mail: [stanovsky@mail.ru](mailto:stanovsky@mail.ru).

**Швець Павло Степанович** – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; тел.: 068-818-11-16; e-mail: [pshvets@mail.ru](mailto:pshvets@mail.ru).

**Швец Павел Степанович** – кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; тел.: 068-818-11-16; e-mail: [pshvets@mail.ru](mailto:pshvets@mail.ru).

**Shvets Pavel** – candidate of technical Science, Odessa National Polytechnic University, Docent of Department of electric power and energy management; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; tel.: 068-818-11-16.

**Торопенко Алла Володимирівна** – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; тел.: 066-16-18-211; e-mail: [alla.androsyk@gmail.com](mailto:alla.androsyk@gmail.com).

**Торопенко Алла Владимировна** – кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; тел.: 066-16-18-211; e-mail: [alla.androsyk@gmail.com](mailto:alla.androsyk@gmail.com).

**Toropenko Alla** – candidate of technical Science, Odessa National Polytechnic University, Docent of Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; tel.: 066-16-18-211; e-mail: [alla.androsyk@gmail.com](mailto:alla.androsyk@gmail.com).

**Бондаренко Віктор Володимирович** – магістр, Одеський національний політехнічний університет, ст. викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; тел.: 097-744-89-80; e-mail: [snow\\_dog@ukr.net](mailto:snow_dog@ukr.net).

**Бондаренко Виктор Владимирович** – магистр, Одесский национальный политехнический университет, ст. преподаватель кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; тел.: 097-744-89-80; e-mail: [snow\\_dog@ukr.net](mailto:snow_dog@ukr.net).

**Bondarenko Viktor** – master, Odessa National Polytechnic University, Senior Lecturer of Department of electric power and energy management; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; tel.: 097-744-89-80; e-mail: [snow\\_dog@ukr.net](mailto:snow_dog@ukr.net).

**Абу Шена Осам Мохаммед Али** – магістр, Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; тел.: 093-910-88-11; e-mail: [klombalibya@hotmail.fr](mailto:klombalibya@hotmail.fr).

**Абу Шена Осам Мохаммед Али** – магістр, Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; тел.: 093-910-88-11; e-mail: [klombalibya@hotmail.fr](mailto:klombalibya@hotmail.fr).

**Abu Shena Osama** – master, Odessa National Polytechnic University, graduate student of Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; tel.: 093-910-88-11; e-mail: [klombalibya@hotmail.fr](mailto:klombalibya@hotmail.fr).

**Красножон Олександр Миколайович** – магістр, Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; тел.: 067-488-18-71; e-mail: [krasnozhonan@gmail.com](mailto:krasnozhonan@gmail.com).

**Красножон Александр Николаевич** – магістр, Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; тел.: 067-488-18-71; e-mail: [krasnozhonan@gmail.com](mailto:krasnozhonan@gmail.com).

**Krasnozhon Oleksandr** – master, Odessa National Polytechnic University, graduate student of Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; tel.: 067-488-18-71; e-mail: [krasnozhonan@gmail.com](mailto:krasnozhonan@gmail.com).

**Становський Андрій Олександрович** – магістр, Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем та мереж, просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; тел. 093-374-54-87, e-mail [redline@normaplus.ua](mailto:redline@normaplus.ua)

**Становский Андрей Александрович** – магістр, Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры интеллектуальных систем и сетей; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; тел.: 093-374-54-87; e-mail: [redline@normaplus.ua](mailto:redline@normaplus.ua).

**Stanovskyi Andriy** – master, Odessa National Polytechnic University, graduate student of Department of Computer intellectual systems and networks; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; tel.: 093-374-54-87; e-mail: [redline@normaplus.ua](mailto:redline@normaplus.ua).

УДК 004.94:377

**I. В. ХОМЕНКО**

## ГЕОМЕТРИЧНІ ТА ГРАФІЧНІ КОМП'ЮТЕРНІ МОДЕЛІ У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

Проаналізовано сучасні проблеми графічної підготовки, зокрема виділено характерні риси сучасної графічної підготовки. Розглянуто геометричні та графічні комп'ютерні моделі, які використовуються у комп'ютерно-інтегрованому проектуванні та дизайні. Оцінені можливості автоматизації побудов тривимірних моделей та геометричних операцій, методи та засоби геометричних побудов. Визначено важливість параметризації геометричних моделей, як такої, що забезпечує варіантність моделей. Результати досліджень можуть бути використані при створенні систем автоматизованого навчання проектуванню та дизайну, зокрема створенню баз геометричних моделей для практичних занять.

**Ключові слова:** автоматизоване навчання проектуванню, навчальний процес, інженерний дизайн, геометричні та графічні моделі.

**Вступ.** Сучасне виробництво потребує висококваліфікованих інженерів та конструкторів, внаслідок чого постійно зростають вимоги до випускників ВНЗ. Про необхідність постійного підвищення професійного та загальнокультурного рівня випускників наголошується у Законах України «Про освіту», «Про вищу освіту», Національній доктрині розвитку освіти України та ін. Головними напрямками реорганізації освіти визначені: підвищення якості підготовки фахівця; оновлення змісту освіти, форм організації навчального процесу; інтеграція вітчизняної освіти до європейського та світового освітніх просторів [1].

Сучасна система вищої освіти повинна, зокрема, забезпечити підготовку фахівця інженерного профілю із відповідним рівнем професійної компетентності, розвитком творчих здібностей. Професійна компетентність інженера у значній мірі визначається знанням, вмінням та навичками, які формуються під час ви-

чення дисциплін із використанням комп'ютерних графічних пакетів. Проблеми підготовки майбутніх інженерів в області комп'ютерного моделювання також актуалізуються у зв'язку із розгортанням ефективних інтелектуальних комунікацій у світовій спільноті, адже графічні зображення є універсальним засобом передачі та об'єктивізації знання, не обмеженим мовним бар'єром.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Графічна підготовка є одним із головних чинників, що формує професіоналізм фахівця – інженера, конструктора, технолога. Тому, для вдосконалення професійної підготовки фахівців, необхідно, з одного боку, проаналізувати існуючий стан графічної підготовки у технічних навчальних закладах, виявити причини недоліків, з іншого – визначити та застосувати ефективні шляхи їх усунення [2].

До організаційних форм навчання, які одночасно

© I. В. Хоменко. 2015