

Застосування структурно-параметричних геометричних моделей для раціонального проектування технологічних процесів у машинобудуванні

G. Virchenko, V. Martynov, O. Sergeychuk, V. Usenko

Gennadii Virchenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

E-mail: virchga@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9586-4538>

Viacheslav Martynov

Kyiv National Institute of Building and Architecture

E-mail: arx.martynov@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0822-1970>

Oleg Sergeychuk

Kyiv National Institute of Building and Architecture

E-mail: o.sergeichuk@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0226-3923>

Valery Usenko

Poltava National Technical University

E-mail: valery_usenko@ukr.net

ORCID:

Abstract

Статтю присвячено деяким питанням застосування методології структурно-параметричного геометричного моделювання в сучасному машинобудуванні. Обґрунтовано теоретичну та практичну актуальність зазначеної науково-прикладної теми. Головну мету даної публікації становить опис базових положень запропонованої методики раціонального комп'ютерного конструювання груп технічних об'єктів та проектування технологічних процесів їх виробництва. Наведено та проаналізовано відповідні приклади практичного використання розглянутих прийомів моделювання стосовно механічного виготовлення деталей різанням. Обґрунтовано основні переваги цих прийомів порівняно з існуючими традиційними способами проектування технологічних процесів у машинобудуванні. Визначено основні перспективні напрямки проведення подальших наукових досліджень стосовно окресленої тематики.

Keywords: машинобудування; оптимізація; структурно-параметричні геометричні моделі; проектування технологічних процесів.

1. Introduction

Питання подальшого розвитку теорії та практики ефективного проектування й виготовлення продукції машинобудування завжди є актуальними. Це обумовлено потребами людства в якісній, тобто високопродуктивній, економічній, надійній і т. д., техніці.

Один із прогресивних напрямків успішного досягнення окресленої мети полягає в широкому використанні сучасних комп'ютерних інформаційних технологій для проектування та виготовлення різноманітної промислової продукції. Одержувані при цьому результати значною мірою визначаються не тільки наявними можливостями обчислювальної техніки, а й застосуванням програмним забезпеченням. У розглянутому випадку якість останнього суттєво залежить від відповідних використовуваних математичних моделей для проектування

промислової продукції та технологічних процесів її виготовлення. Особливо важливими для технічних об'єктів є їх геометричні моделі. Це обумовлено тим, що як проектування промислової продукції, так і її виробництво тісно пов'язані з формоутворенням. Тому подальше вдосконалення використовуваних для відтворення технічних об'єктів і процесів їх виготовлення геометричних моделей становить важливу науково-прикладну задачу.

2. Огляд літератури та постановка проблеми

Нині для комп'ютерного проектування різноманітних технічних об'єктів широко застосовуються параметричні геометричні моделі [1-4]. Їх головна перевага полягає в забезпеченні гнучкого та продуктивного комп'ютерного генерування пев-

ної групи схожих технічних об'єктів завдяки варіюванню належних параметрів базової геометричної моделі. При цьому основним недоліком вважаються обмежені можливості даних моделей щодо побудови об'єктів з іншою структурою, тобто складом і взаємозв'язком елементів. Для усунення зазначених вад та подальшого розвитку описаного напрямку розроблено методологію структурно-параметричного геометричного моделювання [5-10]. Загальні її положення викладено в публікації [5]. У цій роботі наведено базові принципи даної методології (*системного підходу, варіантності, оптимальності, відкритості та розвитку, комплексного підходу*). Описано основні етапи створення та використання структурно-параметричних геометричних моделей технічних об'єктів (*аналіз об'єкта та формування складу його елементів; визначення зв'язків між елементами, тобто розробка структури об'єкта або процесу, що моделюється; опрацювання варіантів синтезу об'єкта, розрахунок його інтегральних параметрів і характеристик; проведення оптимального формоутворення об'єкта*). Запропоновано реалізацію даної методології у вигляді математичного апарату теорії множин і графів, який спирається на методи теорії кривих і поверхонь, твердотільного комп'ютерного формоутворення, параметричної та структурної оптимізації і т. д. У статті [6] обґрунтовано інваріантний характер структурно-параметричного геометричного моделювання як складової комп'ютерних інформаційних технологій підтримки життєвого циклу виробів машинобудування. Отримані наукові результати впроваджено, зокрема, під час ескізного проектування літака [7], опрацювання групових технологій оброблення тиском і складальних операцій [8]. Деякі аспекти комбінаторно-варіаційного та варіантного динамічного формоутворення викладено відповідно в публікаціях [9] та [10].

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел засвідчує перспективність у теоретичному і практичному плані напрацювання нових методів, способів і прийомів комп'ютерного структурно-параметричного формоутворення для моделювання технічних об'єктів і процесів машинобудування.

3. Мета та задачі дослідження

Мета досліджень полягає в поданні на прикладі механічного виготовлення машинобудівних деталей різанням основних положень запропонованої методики раціонального комп'ютерного конструювання груп технічних об'єктів та проектування технологічних процесів їх виробництва.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати можливість застосування геометричних методів для поліпшення розв'язування задач параметричної оптимізації в машинобудуванні;
- проілюструвати використання структурно-параметричних геометричних моделей для раціонального комп'ютерного конструювання груп деталей та проектування технологічних процесів їх виготовлення;
- обґрунтувати переваги запропонованої методики порівняно з традиційними підходами.

4. Геометричне моделювання як засіб інтеграції та оптимізації конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва

У праці [11] показано, що загальним підходом до моделювання технічних об'єктів є поділ відповідного предмета або процесу на кілька частин, які легше визначити у формалізованому вигляді, а потім поєднати належним чином. Отже, аналіз полягає у виділенні потрібних елементів і зв'язків між ними, а подальший синтез – у створенні цілісного інтегрального об'єкта. При цьому зазначається, що для повного та багатог-

ранного сприйняття технічної системи необхідно застосовувати кілька її моделей у різних аспектах. У якості загальної основи для таких моделей варто використовувати їх спільні дані, якими для технічних об'єктів доволі часто є геометричні параметри форми, розмірів і положення.

У наш час у машинобудуванні з організаційної точки зору існують три види технологій [12, 13]: *одиночна, типова і групова*. Кожна з них має свої переваги та недоліки. Перспективним є новий модульний підхід, що спирається на кризне вживання відповідного принципу в конструкторсько-технологічній підготовці машинобудівного виробництва.

Згідно зі сформульованими вище завданнями спочатку розглянемо питання застосування геометричних методів для поліпшення розв'язування задач параметричної оптимізації в машинобудуванні.

4.1. Геометричне моделювання як засіб параметричної оптимізації

Проілюструємо запропоновані прийоми на поданому у праці [11] прикладі, який стосується часу обробки t_k однієї деталі токарною операцією. Відповідна математична модель має наступний вигляд

$$t_k = t_1 + t_2 + t_3, \quad (1)$$

де t_1 – об'єднує складові, які не залежать від режимів різання;
 t_2 – основний час різання;
 t_3 – час, пов'язаний зі зміною зношеного інструмента, віднесений до однієї деталі.

Величину t_1 складають втрати часу на підведення інструмента, закріплення деталі, її контроль тощо.

Значення основного часу різання визначається формулою

$$t_2 = \pi DL / (1000VS), \quad (2)$$

де D – діаметр деталі;

L – довжина різання.

З виразу (2) бачимо, що основний час оброблення зменшується при збільшенні швидкості різання V та подачі S .

Час на зміну зношеного інструмента, віднесений до однієї деталі, обчислюється за наступною залежністю

$$t_3 = T_{in}(t_2 / T - 1 / N), \quad (3)$$

де T_{in} – час заміни одного різального інструмента;

T – стійкість інструмента;

N – кількість деталей у виробничій партії.

Стійкість інструмента визначається формулою

$$T = C_v^{1/m} t^{-x/m} S^{-y/m} V^{-1/m}, \quad (4)$$

де C_v , m , x , y – сталі моделі процесу різання;

t – глибина різання.

Аналіз залежностей (3) та (4) показує, що час t_3 зростає зі збільшенням швидкості різання V та подачі S .

Таким чином, подану виразами (1) ... (4) математичну модель оброблення різанням можна розглядати як об'єкт параметричної оптимізації щодо визначення раціональних значень величин швидкості різання V та подачі S , які мінімізують час оброблення t_k .

Тоді завдання оптимізації формулюється наступним чином: знайти такі значення режимів різання V_n і S_n , при яких функція (1) досягає свого мінімального значення. Цей випадок відповідає найвищій продуктивності досліджуваного процесу, тобто виготовленню максимальної кількості деталей за найменший час.

У роботі [1] для $S=const$ аналітичним шляхом, за допомогою прирівнювання похідної dt_k/dV до нуля, визначено формулу

$$V_n = \left[\frac{m}{(1-m) T_{in}} \right] \frac{C_v}{t^x S^y}, \tag{5}$$

яка є доволі зручною для практичного застосування. Згідно з залежністю (5) виконано обчислення обробки сталі 60X різцем із твердосплавною пластинкою T15K6 за умов $S=0,3$ мм/об; $T_{in}=2$ хв; $t=3,5$ мм; $C_v=300$; $m=0,27$; $x=0,12$; $y=0,325$ й одержано значення $V_n=242$ м/хв.

У наведеній праці зазначається, що при визначенні оптимальних режимів різання до уваги беруться лише швидкість V та подача S , оскільки вплив глибини різання t на обробку незначний. Проте, в даному разі, зостається відкритим питання щодо дії на V_n змінного значення величини S . Зазначимо, що для знаходження точки, в якій обидва режими є раціональними, доцільно застосовувати числові методи оптимізації та тривимірні геометричні моделі у вигляді відповідних графіків, що дозволяють суттєвим чином спрощувати виконуваний дослідження з оптимізації та підвищувати їх наочність. На підтвердження цього на рисунку 1 показано залежність

$$F(S, V) = \frac{1 + T_{in} t^{x/m} S^{y/m} V^{1/m}}{SV} / C_v^{1/m}, \tag{6}$$

яку отримано з формули (1) шляхом залишення тільки величин, що впливають на V_n і S_n .

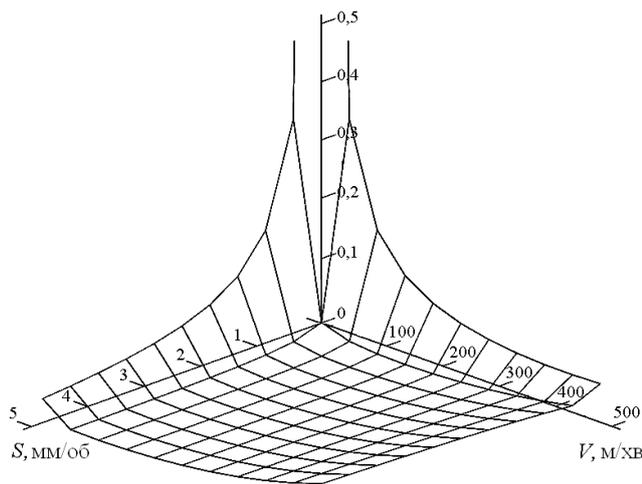


Fig. 1: Тривимірна геометрична модель залежності $F(S, V)$: S – подача, V – швидкість різання.

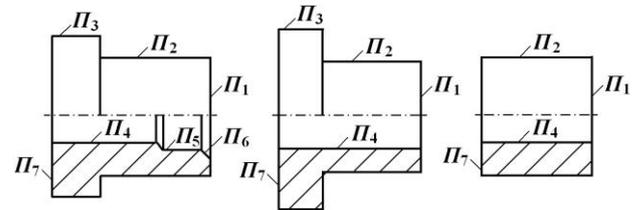
На приведеному вище зображенні значення параметрів T_{in} , t , C_v , m , x , y відповідають попередньо розглянутому прикладу. Застосування для випадку $S=0,3$ мм/об процедур оптимізації з широковідомих програмних пакетів Mathcad та Microsoft Office Excel дає результат, який збігається з проаналізованим значенням $V_n=242$ м/хв. Варіювання в даних системах додатково ще й значенням S (двовимірний пошук) показує, що оптимальна швидкість різання V_n із збільшенням подачі S зменшується. Найвигідніша величина S_n відповідає максимально допустимому значенню S . Наведені факти підтверджуються графікою рисунка 1.

Отже, перевагою обчислювальних методів оптимізації, порівняно з аналітичними, є їх простота та універсальність. Отримані ідеальні результати пояснюються достатньо плавним характером цільової функції (6). Аналогічні дані отримано з використанням підходів, що запропоновані у праці [14], яку присвячено структурно-параметричним методам апроксимації як засобом розв'язування задач оптимізації. Запропонований у ній підхід дозволяє знаходити не тільки локальні екстремуми, а й глобальні у випадку складних цільових функцій.

4.2. Використання структурно-параметричних геометричних моделей для раціонального комп'ютерного конструювання груп деталей та проектування технологічних процесів їх виготовлення

Розглянемо ключові етапи запропонованої методики інтегрованого комп'ютерного конструкторсько-технологічного опрацювання продукції машинобудування, обравши за основу подані в [11] три типові деталі й операційні маршрути їх виготовлення, див. відповідно рисунок 2 та таблицю 1.

У даному випадку за характерні ознаки деталей D_i , $i \in \{1, 2, 3\}$, доцільно прийняти їх оброблювані поверхні Π_j , $j \in \{1, \dots, 7\}$.



$$D_1=(\Pi_1, \dots, \Pi_7) \quad D_2=(\Pi_1, \dots, \Pi_4, \Pi_7) \quad D_3=(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_4, \Pi_7)$$

Fig. 2: Група деталей $D_1 \dots D_3$: $\Pi_1 \dots \Pi_7$ – оброблювані поверхні.

Table 1: Технологічні маршрути виготовлення деталей

| Позн. | Найменування | Поверхні | | | | | | | Деталі | | | | |
|----------|--------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---|-------|-------|-------|
| | | - | Π_1 | Π_2 | Π_3 | Π_4 | Π_5 | Π_6 | Π_7 | - | D_1 | D_2 | D_3 |
| τ_0 | Загівельна | x | | | | | | | | | x | x | x |
| τ_1 | Підрізання | | x | | | | | | | | x | x | x |
| τ_2 | Обточування | | | x | | | | | | | x | x | x |
| τ_3 | Обточування | | | | x | | | | | | x | x | |
| τ_4 | Свердіння | | | | | x | | | | | x | x | x |
| τ_5 | Свердіння | | | | | | x | | | | x | | |
| τ_6 | Розточування | | | | | | | x | | | x | | |
| τ_7 | Відрізка | | | | | | | | x | | x | x | x |
| τ_8 | Контрольна | | | | | | | | | x | x | x | x |

Якщо для екземплярів типової деталі D_i наявні варіанти їх виготовлення $N_{D_i} \in \mathbb{N}$, то створення для кожного з них *одиночної технології* буде нераціональним. Більш ефективним є використання *типових технологічних процесів* згідно з наведеними в таблиці 1 маршрутами. Ще більш прогресивним можна вважати застосування *групового підходу*. Для цього в якості *комплексної деталі*, що охоплює всі елементи (поверхні) оброблення, необхідно взяти D_1 . Відповідну *мережну модель* зображено на рисунку 3.

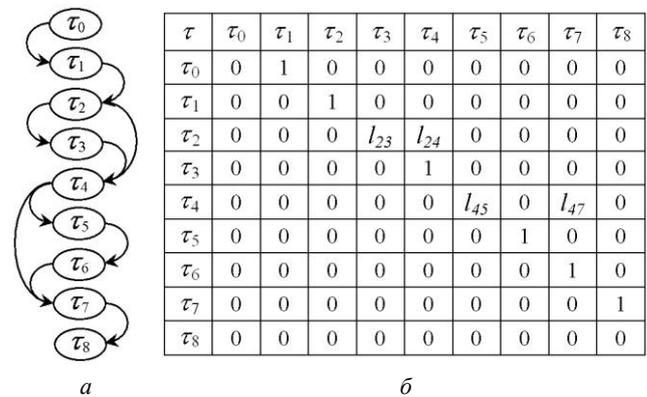


Fig. 3: Модель групової технології: a – граф структури та параметрів, b – матриця суміжності елементів; $\tau_0 \dots \tau_8$ – технологічні операції, 0 – хибність, 1 – істина; $l_{23}, l_{24}, l_{45}, l_{47}$ – логічні вирази.

За допомогою неї з упорядкованої послідовності

$$\tau = (\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_8) = (\tau_i)_{i=1}^{N_\tau}, \quad (7)$$

де $N_\tau=9$, за існуючими в конкретній деталі оброблюваними поверхнями визначається потрібна множина технологічних операцій.

У поданій на рисунку 3, б матриці суміжності крім 0 (хибність) та 1 (істина) вживаються й логічні вирази $l_{m\tau}$, де $m \in 1 \dots N_\tau$, $j \in 1 \dots N_\tau$.

У даному разі

$$\begin{aligned} l_{23} &= \{P_3 \in D_i\}; \quad l_{24} = \{P_3 \notin D_i\}; \\ l_{45} &= \{P_5 \in D_i\}; \quad l_{47} = \{P_5 \notin D_i\}; \quad i \in \{1, 2, 3\}. \end{aligned} \quad (8)$$

У загальному випадку залежності (8) мають більш складний вигляд.

Аналіз побудованої мережної моделі показує, що за допомогою неї виготовляються, зокрема, й деталі $D_4 = (P_1, P_2, P_4, \dots, P_7)$. Для виключення такого факту потрібно до співвідношень (8) внести зміни

$$l_{45} = \{(P_5 \in D_i) \wedge (P_3 \in D_i)\}.$$

За викладеною вище схемою можна створити й *перестановні моделі*, які забезпечують генерування структурно-параметричних проектних варіантів, що різняться не тільки складом, а й порядком своїх елементів. Потрібно лише розглядати ці моделі як сукупності мережних компонентів, що ґрунтуються на послідовностях типу (7).

З наведеного матеріалу видно, що для виготовлення продукції машинобудування широко застосовуються її геометричні параметри. Під час параметричного проектування форма, розміри та положення технічних об'єктів визначаються за допомогою певних змінних, залежностей між ними, декотрих обмежень і т. д. Це дозволяє ефективно автоматизовано перебудувати потрібним чином наявну геометрію. Зазначені прийоми схожі на використання типових технологічних процесів, але використовуються в галузі комп'ютерного конструювання. Більш перспективною є структурно-параметрична методологія геометричного моделювання, яка є аналогією групового підходу до виробництва в машинобудуванні.

Розглянемо далі параметричну комп'ютерну геометричну твердотільну модель комплексної деталі D_1 , яка виготовляється з циліндричної заготовки (рисунок 4). Останню показано штриховою лінією.

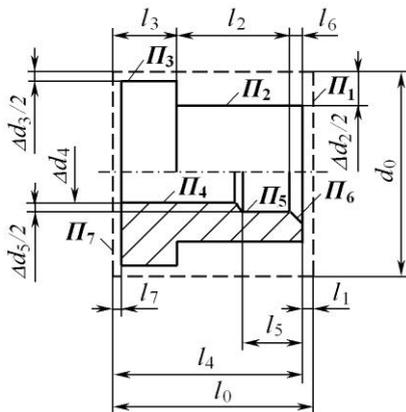


Fig. 4: Параметрична модель комплексної деталі D_1 : $P_1 \dots P_7$ – оброблені поверхні, Δd_j та l_j – зміна діаметра поверхні під час її оброблення та довжина різання, d_0 та l_0 – діаметр і довжина початкового прямого кругового циліндра.

Наведена параметрична геометрична фігура є основним виконавчим формоутворюючим елементом для інтегральної групової моделі, зображеної на рисунку 3. У якості розмірів для поверхонь P_j , $j \in \{1, \dots, 7\}$ використано параметри Δd_j та l_j ,

що містять значення відповідно змінювання діаметра поверхні під час її оброблення та довжини різання. Нульові величини Δd_j не показані. Функціонування проаналізованої комплексної деталі D_1 у складі розглянутої вище інтегральної групової моделі, шляхом застосування булевих операцій віднімання до вихідного тіла, є очевидним.

Зі збільшенням розмірів партій деталей, зокрема D_1 та D_2 , раціональними стають й інші, ніж циліндрична, види заготовок, наприклад, у вигляді штампування, які за формою та розмірами більш наближені до кінцевих виробів. Ці й подібні аспекти також можна врахувати поданими прийомами. Отже, нами викладено базові моменти запропонованої методики використання комп'ютерних структурно-параметричних геометричних моделей для інтегрованого конструювання об'єктів машинобудування та проектування технологічних процесів їх виготовлення.

Зупинимось тепер на деяких питаннях оптимізації машинобудівних виробів.

Групова модель, що зображена на рисунку 3, є мультиграфом, а компоненти її матриці суміжності – багатовимірними масивами у термінах програмування, тобто множинами різноманітних елементів. Дугам, які з'єднують вершини, ставляться у відповідність певні параметричні залежності, що потрібним чином описують операції конструювання та технологічного процесу виготовлення об'єкта. Мультиграф дозволяє мати комплексний опис системи, яка аналізується, в більш широкому плані, наприклад, з урахуванням експлуатаційних, маркетингових вимог тощо. Оптимальним варіантам відповідають екстремальні шляхи в мережній моделі. Для їх визначення застосовується метод індексації вершин. Питання застосування використання структурно-параметричних прийомів для ефективного управління виробничими системами розглянуто в публікації [6].

4.3. Обґрунтування переваг запропонованої методики проектування технологічних процесів у машинобудуванні

Основний науково-прикладний результат запропонованої методики проектування технологічних процесів у машинобудуванні полягає в напрацюванні групи нових ефективних прийомів комп'ютерного моделювання. Розглянутий підхід є подальшим розвитком методології структурно-параметричного формоутворення. Подані матеріали сприяють отриманню раціональних інженерних розв'язків у виробництві.

Порівняно з традиційними способами проектування машинобудівних технологічних процесів викладена методика спрямована на більш тісну автоматизовану інтеграцію етапів конструювання та виготовлення промислової продукції. Важливою та практично корисною властивістю запропонованих прийомів проектування є забезпечення продуктивного здійснення варіантних змін як у конструкції виробів, так і в технології їх виготовлення. Даний момент дозволяє гнучко та успішно адаптуватись до мінливих ринкових умов сучасної економіки. При цьому реалізується можливість проведення структурно-параметричної оптимізації як створюваних технічних об'єктів, так і технологічних процесів їх виготовлення.

Практичне значення розроблених у даній публікації прийомів залучення геометричних моделей до вирішення питань параметричної оптимізації об'єктів машинобудування полягає в одержанні результатів, які сприяють поліпшенню наочності опрацьовуваних процесів і підвищенню ефективності обчислювальних процедур щодо визначення не тільки локальних, а й глобальних екстремумів цільових функцій.

Також зазначимо, що подані вище структурно-параметричні геометричні моделі та проаналізовані засоби оптимізації дозволяють на рівні технологічних переходів та їх складових, наочно, динамічно й реалістично імітувати формоутворення багатьох видів продукції машинобудування. Це становить підґрунтя для проведення успішних комп'ютерних експери-

ментів замість більш дорогих та тривалих натурних досліджень, що суттєво сприяє не тільки зменшенню собівартості промислової продукції, а також підвищенню її якості.

Отже, головними перевагами викладеної в даній статті методики застосування комп'ютерних структурно-параметричних геометричних моделей для раціонального проектування виробів машинобудування та технологічних процесів їх виготовлення є системний підхід до опрацюваних об'єктів, гнучкість і продуктивність запропонованих прийомів моделювання, їх універсальність, отримання комплексних раціональних розв'язків поставлених інженерних задач, наочність одержаних їх розв'язків і т. д.

5. Conclusions

Створення сучасної якісної техніки, з мінімальними витратами для цього всіляких ресурсів, вимагає інтенсивного розвитку різних наукових напрямків та їх плідного впровадження у практику. У даній статті показано, що одним із таких засобів є структурно-параметричне геометричне моделювання.

Зазначено, що технологічні процеси становлять основу виробництва в машинобудуванні. Ефективність останніх у багатьох випадках визначає не тільки якість промислової продукції, а й її собівартість, терміни виготовлення тощо. Сучасні досягнення обчислювальної техніки та відповідні здобутки математичного та програмного забезпечення сприяють опрацюванню багатьох технічних об'єктів на принципово новому рівні, для чого широко використовуються різні комп'ютерні моделі. Ефективним напрямком зменшення витрат на розробку програмних засобів є уніфікація методичного та інформаційного забезпечення застосовуваних систем автоматизованого проектування. У якості одного з продуктивних шляхів вирішення наведених задач даною публікацією пропонується використання структурно-параметричних геометричних моделей.

Показано, що створення досконалих математичних і комп'ютерних моделей та продуктивне їх застосування на практиці сприяє підвищенню ефективності багатьох процесів у машинобудуванні. Це стосується як конструювання промислової продукції, так і технологічних процесів її виготовлення. Перспективними напрямками проведення подальших наукових досліджень стосовно розглянутої у даній статті тематики можна вважати подальшу наскрізну інтеграцію всіх етапів життєвого циклу складної технічної продукції (тобто проектування, виробництва та експлуатації) з метою її комплексної оптимізації. Під останнім терміном розуміється багатокритеріальна оптимізація одночасно в аспекті декількох технічних дисциплін, наприклад, конструкції, міцності, технології, експлуатації, ергономічності, екологічності і т. д.

Ще одним цікавим напрямком подальших досліджень стосовно використання структурно-параметричних геометричних моделей для раціонального проектування технологічних процесів у машинобудуванні можна вважати забезпечення їх реалістичного відтворення в динамічному плані. Деякі аспекти зазначених задач проаналізовано та викладено підходи до їх розв'язання в публікації [10]. Дана стаття на прикладі крила літака охоплює такі етапи його життєвого циклу як ескізне проектування та виготовлення за допомогою складальних технологічних операцій у вигляді клепаання. У роботі [15] в динамічному ключі досліджуються із застосуванням структурно-параметричних геометричних моделей процеси фрезерування деталей. Таким чином, праці [10, 15] разом із даною статтею засвідчують універсальність та перспективність використання в машинобудуванні методології структурно-параметричного геометричного моделювання.

Проаналізовані вище перспективні напрямки проведення подальших наукових досліджень потребують свого всебічного теоретичного та практичного опрацювання.

References

- [1] B. Ketul, M. Dipal, K. Nirmal, "Parametric modeling of Oldham coupling", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol.3, No.2, (2014), pp.9120-9125.
- [2] D. Popescu, L. Chioltean, "Design Configuration under Parametric Control", *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics*, Vol.58, No.72, (2013), pp. 67-70.
- [3] W. Sun, H. Ma, C. Li, B. Wen, "Study on Parametric Modeling Based on Visual Optimization Design of Mechanical Product", *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, (2009), DOI: 10.1109/icitcta.2009.304
- [4] V. Pomazan, "Assembly Top Down Design in Parametric CAD", *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics*, Vol.58, No.72, (2013), pp.153-156.
- [5] V. Vanin, G. Virchenko, "Definition and basic positions of structural-parametric geometric modeling" (in Ukrainian), *Geometric and computer modeling*, Vol.23, (2009), pp.42-48.
- [6] V. Vanin, G. Virchenko, V. Vanin, "Structural-parametric geometric models as an invariant component of computer information technologies supporting the life cycle of machine-building products" (in Ukrainian), *Proceedings of the Tavria State Agrotechnological Academy*, Vol.4, No.36, (2007), pp.16-21.
- [7] V. Vanin, G. Virchenko, I. Vanin, "Structural-parametric geometric models as a basis for the coordinated elaboration of the airplane at the stage of sketch design" (in Ukrainian), *Scientific news of the NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, Vol.4, (2006), pp.35-41.
- [8] V. Vanin, G. Virchenko, V. Vanin, "Structural-parametric geometric modeling as a means of increasing the efficiency of group technologies in machine building" (in Ukrainian), *Proceedings of the Tavria State Agrotechnological Academy*, Vol.4, No.39, (2008), pp.9-21.
- [9] I. Taras, V. Virchenko, "Computer combinatorial-variation geometric modeling of engineering objects", *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics*, Vol.58, No.72, (2013), pp.173-176.
- [10] V. Vanin, G. Virchenko, S. Virchenko, A. Nezenko, "Computer variant dynamic forming of technical objects on the example of the aircraft wing", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol.6, No.7, (2017), pp. 67-73, DOI: 10.15587/1729-4061.2017.117664
- [11] B. Palchevskyy, Research of technological systems (modeling, designing, optimization) (in Ukrainian), World, Lviv, (2011), 232 p.
- [12] A. Dalsky, A. Suslov, Yu. Nazarov, Mechanical engineering. Encyclopedia, Vol.III-3. The technology of manufacturing machine parts (in Russian), Mechanical Engineering, Moscow, (2010), 840 p.
- [13] B. Bazrov, Fundamentals of engineering technology (in Russian), Mechanical Engineering, Moscow, (2005), 736 p.
- [14] G. Virchenko, "Structural-parametric methods of approximation as a means of solving optimization problems" (in Ukrainian), *Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*, Vol.4, No.47, (2010), pp.61-66.
- [15] S. Virchenko, "Some aspects of computer dynamic geometric modeling of milling processes" (in Ukrainian), *Modern modeling problems*, Vol.10, (2017), pp.31-35.