

ДЕЯКІ ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ВИРОБІВ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ ІНЕРЦІАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті здійснено огляд засобів геометричного моделювання, що використовуються при створенні складних виробів приладобудування. Виконаний аналіз спрямований на покращення існуючих підходів до автоматизованого проектування з метою підвищення якості зазначених технічних об'єктів.

Висвітлено базові положення методології структурно-параметричного формоутворення, напрацьованої науковою школою прикладної геометрії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Показано можливість поширення розроблених методів на сферу приладобудування, однак зауважено, що це потребує проведення додаткових розвідок для врахування особливостей даної галузі. Зокрема, складності багатьох пристроїв, обумовленої поєднанням у їх конструкції фізично різнорідних частин, таких як механічні, електронні, оптичні тощо, великого числа відповідних елементів і т. д.

Акцентовано, що у приладобудуванні під час проектування використовується спадне, висхідне та змішане розроблення пристроїв. Описано застосовуваний системно-ієрархічний підхід, можливість його успішної реалізації засобами структурно-параметричної методології. Удосконалено її теоретичні засади запропонованим принципом узагальнених геометричних моделей. Обґрунтовано актуальність останнього для створення складних технічних об'єктів. Подано такі типи для приладобудування гілки проектування як функціональне, конструкторське та технологічне, зазначено їх особливості. Викладено концептуальні засади математичного моделювання довільних приладів, розглянуто проектні процедури синтезу, аналізу, оптимізації. Наведено належні приклади з розроблення пристроїв інерціальних навігаційних систем. Визначено перспективи подальших наукових досліджень з опрацювання висвітлених вище питань.

Ключові слова: автоматизоване проектування; геометричне моделювання; інерціальні навігаційні системи; приладобудування; складні технічні вироби.

Постановка проблеми. Приладобудування відноситься до точного машинобудування. Дана галузь забезпечує виготовлення засобів вимірювання, оброблення, представлення тощо різних параметрів і характеристик певних об'єктів, створення регулюючих пристроїв, систем автоматизованого та автоматичного управління, багатоманітних приладів для промисловості, медицини, торгівлі, транспорту, побуту і т. д. Життя сучасної людини важко уявити без цієї техніки, яка суттєво поліпшує комфорт та безпеку оточуючого навколишнього середовища.

Удосконалення розглянутої продукції становить важливу науково-прикладну проблему. Один із шляхів її успішного вирішення полягає в широкому використанні у приладобудуванні автоматизованого проектування. Базовою складовою останнього є комп'ютерне геометричне моделювання. Тому покращення методів, способів, прийомів та алгоритмів формоутворення являє собою актуальну задачу. Деякі перспективи її розв'язання на прикладі інерціальних навігаційних систем подано в даній статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогресивним сучасним напрямком автоматизованого проектування складних технічних виробів і процесів їх виготовлення та експлуатації є методологія структурно-параметричного формоутворення, визначення її основні положення якої наведено у виданні [1]. Головна перевага зазначеного підходу, порівняно з параметричним комп'ютерним геометричним моделюванням, полягає в більш узагальненому математичному апараті. Це обумовлено тим, що структурно-параметрична геометрична модель являє собою комбінаторне поєднання кількох належних параметричних. Дисертацію [2] присвячено питанням машинобудування, які проілюстровані проектуванням та виготовленням літаків. Працею [3] структурно-параметричну методологію формоутворення поширено на процеси й обладнання для одержання композиційно-волокнистих матеріалів. Дослідженням [4] розроблено необхідні засоби динамічних побудов. Публікацією [5] доповнено теоретичні засади структурно-параметричного геометричного моделювання принципом інтеграції, що полягає в поєднанні етапів життєвого циклу технічних об'єктів та належних засобів комп'ютерного формоутворення у вигляді певного математичного апарату. Статті [6–9] розкривають особливості розроблення навігаційного обладнання, зокрема волоконно-оптичних гіроскопів. Видання [10] із системних позицій описує процеси автоматизованого проектування у приладобудуванні.

Цілі та завдання статті. Головною метою даної праці є визначення, шляхом аналізу літературних джерел, деяких перспектив розвитку геометричного моделювання у приладобудуванні на прикладі інерціальних навігаційних систем.

Основна частина. Для створення пристроїв різного призначення характерна багатоваріантність проектних рішень та важливість обрання найкращого з них. Складність приладів обумовлена поєднанням у їх

конструкції фізично різнорідних частин, таких як механічні, електронні, оптичні тощо, великим числом відповідних елементів. Одним із засобів розв'язання даної задачі є *системно-ієрархічний підхід* [10]. Поданий у цій публікації графічний варіант структури приладу Π з трьох рівнів декомпозиції та кількістю по три складові для кожної частини можна визначити в загальному вигляді впорядкованими множинами

$$\Pi_0 = (\Pi), \Pi_1 = (\Pi_{1,i})_{i=1}^{k_1}, \dots, \Pi_l = (\Pi_{l,i})_{i=1}^{k_l}, \quad (1)$$

де l – кількість рівнів декомпозиції приладу; нульовий ієрархічний рівень Π_0 відтворює весь прилад Π , та записом вигляду

$$n_{11}, \dots, n_{1k_1}; n_{21}, \dots, n_{2k_2}; \dots; n_{l1}, \dots, n_{lk_l} \quad (2)$$

де крапкою з комою відокремлено рівні декомпозиції, а наведені величини вказують число нащадків належних частин.

Графічною ілюстрацією виразів (1) та (2) є рис. 1.

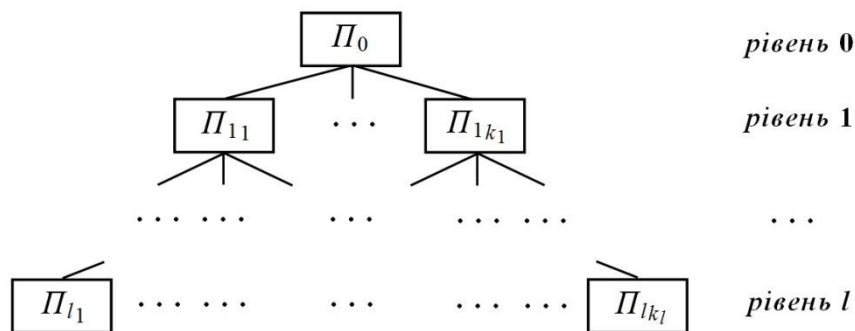


Рис. 1. Блочно-ієрархічна структура приладу Π

Із співвідношень (1) видно, що кількість ієрархічних рівнів L представлення приладу Π на одиницю більша ніж число l рівнів його декомпозиції, тобто

$$L = l + 1. \quad (3)$$

Для розроблення пристроїв, як зазначалось вище, характерна багатоваріантність проектних рішень і важливість дефініції найкращого з них. На засадах структурно-параметричної методології [2] для створюваного приладу Π маємо

$$\Pi = (\Pi_i)_1^{N_{\Pi}}, \quad (4)$$

де Π_i – його частини; N_{Π} – їх кількість.

Проектні варіанти складової Π_i визначаються множинами

$$\Pi_i = (\Pi_{ij})_1^{N_{\Pi_i}}, \quad (5)$$

де N_{Π_i} – число різновидів, та кортежами параметрів

$$P_{ij} = (p_{ijk})_1^{Np_{ij}}, \quad (6)$$

де Np_{ij} – кількість параметрів j -го варіанта i -ї складової.

Структурний взаємозв'язок між варіантами n -го та m -го компонента приладу Π відображають матриці суміжності

$$C_{nm} = \|c_{nr}c_{ms}\|, \quad (7)$$

де r, s – натуральні числа; $r \in (1, \dots, N_n)$, $s \in (1, \dots, N_m)$; N_n, N_m – число варіантів n -ї та m -ї складової; $c_{nr}c_{ms} \neq 0$ при взаємодії різновидів Π_{nr} та Π_{ms} , $c_{nr}c_{ms} = 0$ – у протилежному випадку.

На підставі формул (1) ... (7) далі здійснюється синтез проєктованого приладу Π відповідно до обраної послідовності формоутворення, виконуються обчислення інтегральних характеристик даного пристрою. На рис. 2 показано графову модель, що обумовлює належний порядок синтезу, де вершинами є певні елементи (1), а ребрами – моделі (5) з величинами параметрів (6). Опрацьований об'єкт Π , з урахуванням матриць (7), має множину варіантів

$$\Pi = (\Pi_j)_1^{N_{B\Pi}}, \quad (8)$$

де кортежу (8) відповідає рис. 2, б.

Подані графи мають кратні ребра, довжини яких дорівнюють значенням різних параметрів і характеристик, величинам цільової функції оптимізації і т. д. Видно, що можливе як додавання об'єктів (8) до проєктованих систем вищого рівня, так і більш докладна їх дефініція.

Особливість приладобудування полягає в тому, що під час розроблення продукції мають місце різні напрямки руху вздовж блочно-ієрархічного дерева, зображеного на рис. 1. У залежності від цього розрізняють *спадне* (зверху вниз), *висхідне* (знизу вверх) та *змішане проєктування*. Для першого характерний розгляд пристрою як цілого технічного об'єкта, а потім поступовий перехід до наступних рівнів декомпозиції, де визначається необхідний склад елементів, їх взаємодія та параметри. Останні є характеристиками елементів нижчих ієрархічних рівнів. Головну перевагу спадного проєктування становить дотримання вимог початкового технічного завдання на створюваний прилад на всіх подальших етапах його розроблення, а недоліком – відсутність гарантій їх практичної реалізації. Навпаки, висхідне проєктування забезпечує останню, але не гарантує виконання вимог технічного завдання. Акцентовані особливості обумовлюють доцільність змішаного підходу. Тому у приладобудуванні варто використовувати кілька моделей показаного на рис. 2 вигляду, наприклад, одночасно для спадного, висхідного і змішаного проєктування.

Наявні принципи структурно-параметричної методології [2, 4, 5] (*системного підходу, варіантності, універсальності й уніфікації*,

оптимальності, відкритості та розвитку, комплексного підходу, динамічного формоутворення, інтеграції) пропонується доповнити новим принципом узагальнення. Він полягає в широкому застосуванні узагальнених постановок геометричних задач, відповідних їх розв'язків, належних моделей і комп'ютерних засобів. Більш конкретно це описано далі на прикладі проектування приладів інерціальних навігаційних систем.

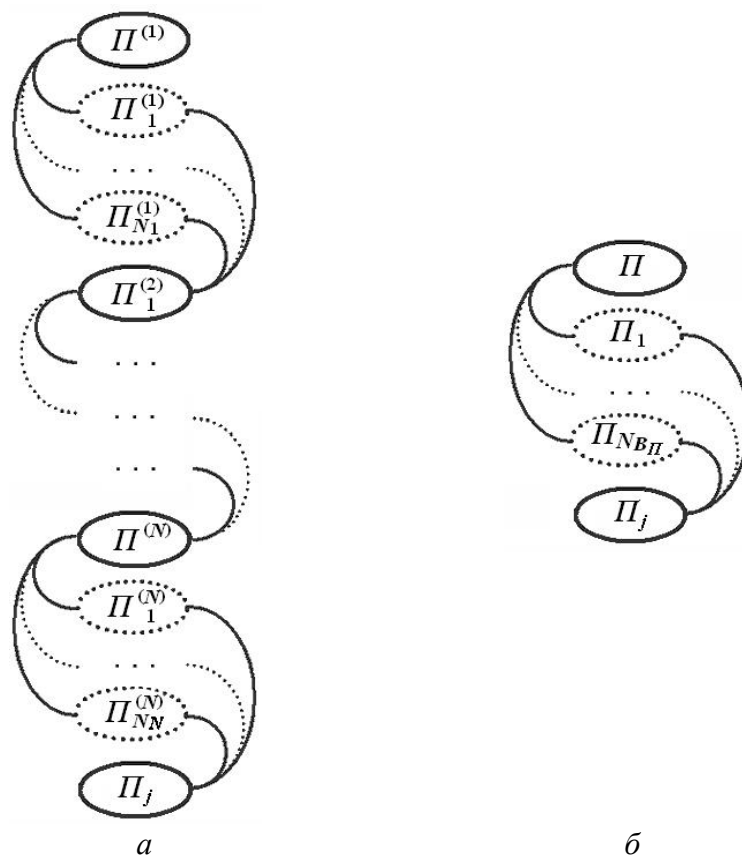


Рис. 2. Структурно-параметрична геометрична модель приладу P :
 а – граф синтезу; б – граф варіантів

У приладобудуванні розрізняють [10] наступні гілки проектування: *функціональне, конструкторське, технологічне*.

Функціональне (схемне) проектування до свого складу включає *інформаційно-логічний, системотехнічний та елементний рівень*. На вищому інформаційно-логічному рівні прилад подається як сукупність *функціональних пристроїв*, між якими здійснюється обмін інформацією. Метою проектування є дефініція оптимальної структури та параметрів приладу. Наступний системотехнічний рівень містить *функціональні вузли і блоки*. Для кожного функціонального пристрою визначається раціональний склад вузлів та блоків, належні їх характеристики. При цьому для вузлів блоки розглядаються як перетворювачі сигналів, тобто без урахування фізичної природи, а далі на елементному рівні вже розкривається їх внутрішня будова. Зауважимо, що для простих приладів склад рівнів функціонального проектування може зменшуватися, а для складних технічних виробів – збільшуватися шляхом використання підрівнів.

Під час конструкторського проектування визначається форма, розміри, матеріал окремих деталей, їх місце у складальних одиницях (вузлах), останніх у всьому виробі тощо. При цьому також має місце поділ на певні ієрархічні рівні. На верхньому, *компонувальному*, опрацьовується взаємне розташування вузлів приладу. Далі, в залежності від складності проєктованого об'єкта, може бути кілька рівнів складальних одиниць та рівень деталей.

Завданням технологічного проектування є розроблення процесів виготовлення приладу. На нижчих його ієрархічних рівнях створюються технології для окремих деталей, а на верхніх – вирішуються питання складання, налаштування та випробування.

Наведені вище рівні функціонального, конструкторського й технологічного проектування у приладобудуванні та взаємодію їх компонентів можна відтворити в зображеному на рис. 1 вигляді за допомогою виразів (1) та (2). Перш ніж перейти до ілюстрацій геометричними моделями конкретного змісту цих рівнів на прикладі інерціальних навігаційних систем, коротко зупинимось на концептуальних засадах математичного моделювання довільних приладів [10].

Незважаючи на складність пристрою, його конструкція та технологія виготовлення подаються скінченим числом параметрів, які описують виріб у числовий спосіб. Тому з математичної точки зору прилад визначається n -вимірним вектором

$$X = (x_i)_1^n. \quad (9)$$

З позицій проектування модифікація значень (9) призводить до змінювання даного технічного об'єкта. За аналогією, всі його характеристики представляються m -вимірним вектором

$$F = (f_i)_1^m. \quad (10)$$

Кортеж (10) формується відповідно до технічного завдання на розроблення приладу та є деякою функцією вектора X , тобто

$$F = f(X). \quad (11)$$

У межах технічних допусків залежність (11) однозначна, на практиці реалізується виготовленням та експлуатацією, по відношенню до яких становить пряму математичну задачу. Проектування полягає в дефініції параметрів X , що забезпечують потрібні характеристики F . З точки зору математики є оберненою неоднозначною задачею.

Розглянута пряма задача (виготовлення та експлуатація приладу з певними параметрами X) обов'язково має розв'язок, який, однак, не завжди задовольняє наявному технічному завданню. Обернена ж задача, іншими словами процес проектування з дотриманням характеристик F , може й не мати розв'язків взагалі або вимагатиме обрання найкращого з цілої множини останніх.

У приладобудуванні серед проектних процедур особливо важливі *синтез*, *аналіз* та *оптимізація*, формальне графічне зображення яких наведено на рис. 3.

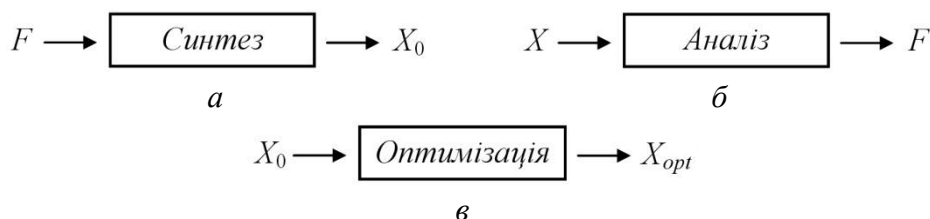


Рис. 3. Деякі проектні процедури:
а – синтез; б – аналіз; в – оптимізація

Синтез полягає в отриманні початкового наближеного вектора X_0 параметрів проєктованого об'єкта згідно з вектором F його характеристик у технічному завданні. Останні, зазвичай, при цьому не забезпечуються в повному обсязі, але гарантується практична реалізація обраного рішення, яке приймається за вихідне для подальшої оптимізації. Розрізняють етапи *структурного* та *параметричного синтезу*. На першому визначають склад елементів приладу і взаємодію між ними, а під час другого – величини параметрів даної системи.

Аналіз являє собою відтворення процесу функціонування приладу для дефініції його характеристик F . Нині, як правило, здійснюється засобами математичного та комп'ютерного моделювання, виконується кількома рівнями наближення, починаючи з найбільш простого. Застосовується *одноваріантний*, *поліваріантний* і *технологічний аналіз*. При першому характеристики F обчислюються тільки для одного конкретного набору параметрів X , а при другому – для декількох, що дозволяє оцінити їх дію на досліджувані характеристики F . Технологічний аналіз дає відомості стосовно впливу на останні відхилень параметрів виробу від їх номінальних значень.

Оптимізація спрямована на змінювання структури та параметрів проєктованого об'єкта з метою покращення його характеристик, починаючи з вихідної точки X_0 . При цьому формуються параметри та критерії оптимізації, цільова функція, обмеження тощо. Недоліком видання [10] в розглянутому аспекті є подання тільки параметричної оптимізації. На відміну від цього в дисертації [2] вкладено методи структурно-параметричної оптимізації на графових моделях вигляду (4) ... (8).

Таким чином, розглянутим вище матеріалом викладено деякі загальні теоретичні основи для подальшого розвитку геометричного моделювання складних технічних виробів приладобудування. Проілюструємо їх кількома конкретними прикладами з опрацювання інерціальних навігаційних систем.

На рис. 4 показано функціональну схему волоконно-оптичного

гіроскопа (ВОГ) відповідно до публікації [7], де SLD – суперлюмінісцентний діод, PINFET – спектрально та поляризаційно нечутливий квадратичний фотоприймач. У цій праці описано також відповідні аналітичні й алгоритмічні моделі.

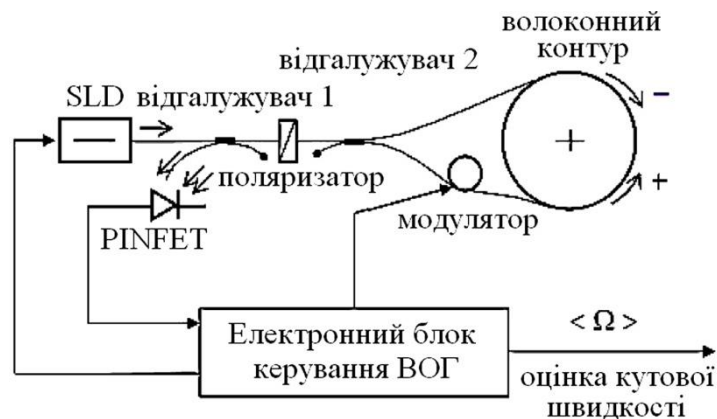


Рис. 4. ВОГ з відкритою петлею зворотного зв'язку

Уявлення про конструкторське проектування котушки ВОГ за даними роботи [8] дає рис. 5.

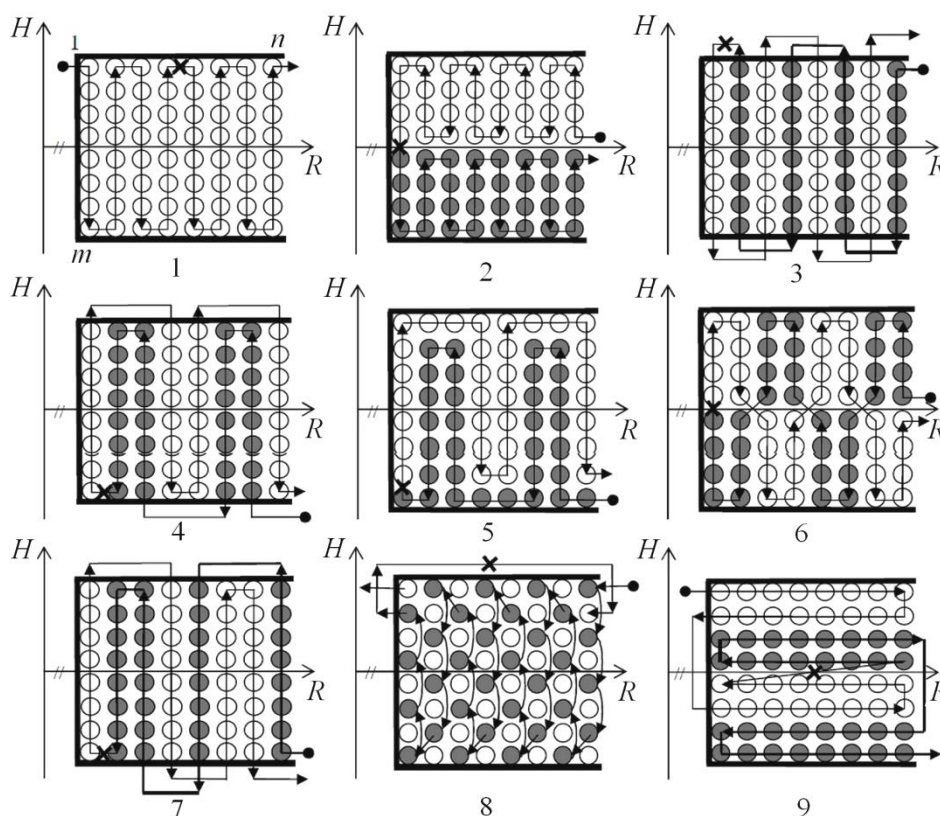


Рис. 5. Структурно-параметричні варіанти намотки котушки ВОГ

Прикладом проведення аналізу математичними та комп'ютерними засобами функціонування створюваного виробу, тобто отримуваних його характеристик залежно від впливу певних параметрів, є рис. 6 [7].

Отже, геометричне моделювання присутнє на всіх рівнях автоматизованого проектування у приладобудуванні, поєднує в одне

узгоджене ціле весь процес опрацювання складних технічних виробів.

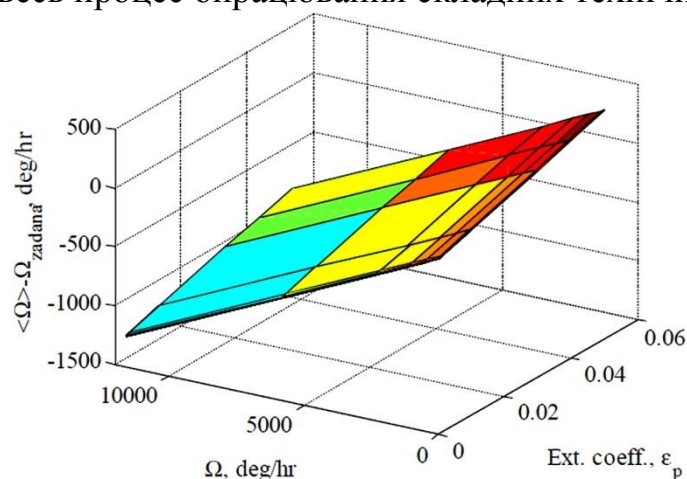


Рис. 6. Залежність абсолютної похибки кутової швидкості Ω від коефіцієнта ϵ_p екстинкції поляризатора

Запропонований вище підхід свідчить, що для отримання кращих результатів необхідне застосування узагальнених геометричних моделей.

Висновки та перспективи досліджень. Визначено деякі напрямки розвитку геометричного моделювання у приладобудуванні, акцентовано потребу проведення подальших наукових досліджень для належного врахування існуючих його особливостей.

Література

1. Ванін В.В., Вірченко Г.А. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання. *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. 2009. Вип. 23. С. 42–48.
2. Вірченко Г.А. Узагальнення структурно-параметричного підходу до геометричного моделювання об'єктів машинобудування: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ, 2011. 367 с.
3. Колосова О.П. Геометричне моделювання процесів та обладнання для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ, 2016. 25 с.
4. Вірченко С.Г. Динамічне формоутворення технічних об'єктів засобами структурно-параметричного моделювання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ, 2018. 24 с.
5. Яблонський П.М. Деякі питання узагальнення засобів геометричного моделювання для проектування технічних об'єктів. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2018. Вип. 13. С. 192–198.
6. Філатов Ю.В. Волоконно-оптичний гіроскоп. СПб.: ЛЭТИ, 2003. 52 с.
7. Іванов С.В. Вплив параметрів елементів волоконно-оптичного гіроскопа з відкритою петлею зворотного зв'язку на точність вимірювання. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2016. №1/9 (79). С. 16–24.

8. *Іванов С.В.* Порівняльний аналіз ефективності видів намотки волокна чутливого елемента волоконно-оптичного гіроскопа в умовах зміни температури. *Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2016. № 1. С. 99–106.
9. *Вірченко Г.А., Іванов С.В.* Деякі аспекти геометричного моделювання навігаційних приладів на прикладі волоконно-оптичних гіроскопів. *Збірник доповідей XI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2022. С. 11–14.
10. *Костюченко Т.Г.* САПР в приборостроении. Томск: ТПУ, 2009. 207 с.

References

1. *Vanin V.V., Virchenko G.A.* Vyznachennia ta osnovni polozhennia strukturno-parametrychnoho heometrychnoho modeliuвання. *Heometrychne ta kompiuterne modeliuвання*. 2009. Vyp. 23. S. 42–48. {in Ukrainian}
2. *Virchenko G.A.* Uzahalnennia strukturno-parametrychnoho pidkhodu do heometrychnoho modeliuвання obiektiv mashynobuduvannia: dys. ... dokt. tekhn. nauk: 05.01.01. Kyiv, 2011. 367 s. {in Ukrainian}
3. *Kolosova O.P.* Heometrychne modeliuвання protsesiv ta obladnannia dlia oderzhannia reaktoplastychnykh kompozytsiino-voLNynstykh materialiv: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.01.01. Kyiv, 2016. 25 s. {in Ukrainian}
4. *Virchenko S.G.* Dynamichne formoutvorennia tekhnichnykh obiektiv zasobamy strukturno-parametrychnoho modeliuвання: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.01.01. Kyiv, 2018. 24 s. {in Ukrainian}
5. *Yablonskyi P.M.* Deiaki pytannia uzahalnennia zasobiv heometrychnoho modeliuвання dlia proektuvannia tekhnichnykh obiektiv. *Suchasni problemy modeliuвання*. Melitopol: MDPU, 2018. Vyp. 13. S. 192–198. {in Ukrainian}
6. *Filatov Yu.V.* Volokonno-opticheskiy giroskop. SPb.: LETI, 2003. 52 s. {in Russian}
7. *Ivanov S.V.* Vplyv parametriv elementiv volokonno-optychnoho hiroskopa z vidkrytoi petlei u zvorotnoho zviazku na tochnist vymiriuvannia. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. 2016. №1/9 (79). S. 16–24. {in Ukrainian}
8. *Ivanov S.V.* Porivnialnyi analiz efektyvnosti vydiv namotky volokna chutlyvoho elementa volokonno-optychnoho hiroskopa v umovakh zminy temperatury. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut"*. 2016. № 1. S. 99–106. {in Ukrainian}
9. *Virchenko G.A., Ivanov S.V.* Deiaki aspekty heometrychnoho modeliuвання navihatsiinykh prykladiv na prykladi volokonno-optychnykh hiroskopiv. *Zbirnyk dopovidei XI Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Prykladna heometriia, inzhenerna hrafika ta obiekty intelektualnoi vlasnosti»*. Kyiv: KPI im. I. Sikorskoho, 2022. S. 11–14. {in Ukrainian}
10. *Kostyuchenko T.G.* SAPR v priborostroenii. Tomsk: TPU, 2009. 207 s. {in Russian}

Doctor of Philosophy, Associate Professor **Sergiy Ivanov**,
ivanov.sergiy@ill.kpi.ua, ORCID:000-0003-3001-2451
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SOME PERSPECTIVES FOR THE DEVELOPMENT OF GEOMETRIC MODELING OF COMPLEX INSTRUMENTATION ENGINEERING PRODUCTS ON THE EXAMPLE OF INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

The article reviews the means of geometric modeling used in the creation of complex instrument-making products. The performed analysis is aimed at improving the existing approaches to computer-aided design in order to improve the quality of the specified technical objects.

The basic provisions of the methodology of structural-parametric shaping developed by the scientific school of applied geometry of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» are highlighted. The possibility of extending the developed methods to the field of instrumentation engineering is shown. However, it is noted that this requires additional research to take into account the specifics of this industry. In particular, the complexity of many devices due to the combination in their design of physically disparate parts, such as mechanical, electronic, optical, a large number of corresponding elements, etc.

It is emphasized that in instrumentation engineering during designing, descending, ascending and mixed development of devices is used. The applied system-hierarchical approach is described. The possibility of its successful implementation by means of structural-parametric methodology is shown. Its theoretical foundations have been improved by the proposed principle of generalized geometric models. The relevance of the latter for the creation of complex technical objects is substantiated. Such stages of design as functional, constructional and technological, typical for instrumentation engineering, are presented. Their features are indicated. The conceptual foundations of mathematical modeling of arbitrary devices are outlined, the design procedures for synthesis, analysis, and optimization are considered. Appropriate examples for the development of devices for inertial navigation systems are given. The prospects for further scientific research on solving the above issues have been determined.

Key Words: automated design; geometric modeling; inertial navigation systems; instrumentation engineering; complex technical products.