

Рихальський О.Ю.

ПВНЗ «Європейський університет»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕМАНТИЧНОЇ СУМІСНОСТІ ПАРАМЕТРИЧНИХ КОНФІГУРАЦІЙ У CAD-СИСТЕМАХ

У статті досліджено проблему забезпечення семантичної сумісності параметричних конфігурацій у CAD-середовищах, що має основне значення для підвищення рівня автоматизації, структурної узгодженості й адаптивності сучасного інженерного проектування. Актуальність теми зумовлено необхідністю інтеграції гетерогенних моделей із різною логікою побудови в межах єдиного інформаційного простору, що ускладнюється фрагментарністю структур, неоднорідністю форматів і відсутністю загального семантичного підґрунтя. Метою статті є узагальнення та формалізація методологічних підходів до математичного моделювання семантичної сумісності параметричних конфігурацій у CAD-системах на основі принципів $\langle M, P \rangle$ -простору, що дає змогу підвищити коректність опису, логічну цілісність і рівень автоматизованої інтеграції складних технічних моделей.

Методологія дослідження спирається на інструментарій модельно-параметричного підходу, логіко-алгебраїчного опису залежностей, формальних контекстів, продукційних правил і механізмів онтологічної нормалізації. Проведено аналіз наявних формалізованих засобів подання знань, побудовано модель узгодження параметричних конфігурацій через виявлення сумісних околиць у $\langle M, P \rangle$ -просторі, оцінювання семантичної відстані та застосування оператора інтеграції моделей.

Наукову новизну становить запропонована структура формалізованої інтеграції гетерогенних моделей з урахуванням контекстної сумісності та семантичного зіставлення, що забезпечує функціональну цілісність проєктного простору. Встановлено, що головними перешкодами автоматизованої перевірки є семантична фрагментація, відсутність міжпідсистемної взаємодії та недостатній рівень підтримки адаптивної перевірки змін. У висновках доведено ефективність запропонованої моделі для створення адаптивних, логічно узгоджених і масштабованих параметричних конфігурацій. Перспективи подальших досліджень пов'язані з упровадженням елементів когнітивного проектування, інтелектуального трасування залежностей і засобів машинного навчання для поглибленого аналізу семантичної відповідності в CAD-середовищах нового покоління.

Ключові слова: модельно-параметричний підхід, логіко-онтологічна узгодженість, контекстне проектування, формалізація знань, інженерна інтероперабельність, інформаційні технології, семантична сумісність.

Постановка проблеми. У контексті сучасного розвитку комп'ютерного інжинірингу й автоматизованих систем проектування особливої актуальності набуває проблема забезпечення семантичної сумісності параметричних конфігурацій у CAD-середовищах. Умови стрімкої адаптації до індивідуалізованого й високоточного виробництва потребують не лише геометричної відповідності елементів моделі, а і їхньої логічної та функціональної узгодженості на рівні внутрішніх зв'язків та атрибутів. Семантична сумісність визначає можливість автоматизованого поєднання окремих компонентів проєкту без втрати функціональної цілісності системи, що особливо критично для складних технічних об'єктів з ієрархічною структурою, модульною побудовою або змінними параметрами конфігурацій. Водночас традиційні підходи до формування

параметричних моделей у CAD-системах не враховують повною мірою логіко-семантичних взаємозв'язків між об'єктами, що обмежує можливість гнучкої адаптації проєктів, автоматизованої валідації моделей і перевірки їхньої коректності на ранніх етапах проектування. У зв'язку з цим виникає потреба у побудові формалізованих математичних моделей, які б давали можливість здійснювати оцінювання та забезпечення семантичної сумісності параметричних конфігурацій на основі чітко визначених логічних правил, онтологічних залежностей і структур даних. Розв'язання цієї проблеми має не лише наукову, а й прикладну цінність для оптимізації процесів автоматизованого проектування, зменшення помилок у конфігураціях, прискорення циклів розроблення та підвищення надійності результатів CAD-моделювання в інженерній практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз наукових досліджень математичного моделювання семантичної сумісності параметричних конфігурацій у CAD-системах дозволяє виокремити чотири змістовні напрями, що формують основу сучасної наукової парадигми розвитку CAD-технологій в аспекті семантичної інтеграції параметричних моделей.

Перший напрям пов'язаний із розвитком концептуальних підходів до поєднання параметричного та прямого моделювання як підґрунтя для забезпечення семантичної сумісності моделей. Цей аспект розкривають дослідження Цзоу Цюань (Q. Zou), Фен Хунь-Янь (H.-Y. Feng), Гао Сін (S. Gao), які запропонували концепцію *variational direct modeling*, що поєднує варіаційні методи з прямим редагуванням, зберігаючи логічні зв'язки між параметрами в умовах змін геометрії [1]. Аранбуру Андер (A. Aranburu), Хустель Д. (D. Justel), Контеро М. (M. Contero), Камба Х. Д. (J.D. Camba) досліджують геометричну варіативність параметричних моделей у контексті інженерного проєктування, акцентуючи увагу на потребі контролю над семантичними змінами при модифікаціях [2]. Кіратзі С. (S. Kyratzi), Азаріадіс П. (P. Azariadis) розвивають концепцію інтегрованого проєктного задуму в параметричному моделюванні, що дозволяє зберігати логіку залежностей навіть при редизайні моделі [3]. Для подальшого розвитку цього напрямку доцільно розробити формалізовані мови опису семантичних обмежень та алгоритми валідації таких обмежень при редагуванні CAD-моделей.

Другий напрям орієнтований на адаптацію параметричного моделювання до інженерних завдань шляхом використання знань і логічних правил. Редді Е. Дж. (E.J. Reddy), Редді К. С. (K.S. Reddy), Редді П. Н. (P.N. Reddy) аналізують останні досягнення *knowledge-based modeling*, яке дозволяє формувати параметричні конфігурації на основі предметно-орієнтованих правил і логіки взаємозв'язків [4]. Тан Чжен (Z. Tang), Цзоу Цюань (Q. Zou), Гао Сін (S. Gao) визначають математичні межі припустимих змін параметрів при багатопараметричному редагуванні, зберігаючи структуру моделі [5]. Тейлор Н. Дж. (N.J. Taylor), Гаймс Р. (R. Haines) підкреслюють важливість коректного геометричного моделювання для подальшої інженерної симуляції, яка також передбачає логічну цілісність параметричних конфігурацій [6]. Розширення цього напрямку можливе шляхом створення універсальних онто-

логій інженерних об'єктів для перевірки семантичної сумісності.

Третій напрям охоплює математичне моделювання параметричних залежностей для задач оптимізації геометрії. Гарріс С. (S. Harries), Абт К. (C. Abt), Бреннер М. (M. Brenner) аналізують підходи *upfront CAD*, що передбачають заздалегідь визначену параметричну структуру як основу для подальшої оптимізації [7]. Вукашинович Н. (N. Vukašinović), Духовник Й. (J. Duhovnik) представляють у монографії різні стилі CAD-моделювання – явне, параметричне, вільноформне – та аналізують їхнє поєднання для забезпечення точності й адаптивності [8]. Мачадо Ф. (F. Machado), Малпіка Н. (N. Malpica), Борромео С. (S. Borromeo) порівнюють OpenSCAD і FreeCAD у створенні відкритих параметричних моделей, акцентуючи увагу на структурному підході до опису параметрів [9]. Для подальшого розвитку цього напрямку доцільно зосередитися на побудові моделей оберненого перетворення геометрії на параметри з урахуванням семантики конструкції.

Четвертий напрям відображає інтеграцію математичного параметричного моделювання з задачами симуляції, швидкодії та багатоплатформної інтеграції. Агарвал Д. (D. Agarwal), Робінсон Т. Т. (T.T. Robinson), Армстронг К. Г. (C.G. Armstrong) пропонують метод обчислення швидкості зміни параметрів через *adjoint methods*, який забезпечує точність і стабільність у проєктній оптимізації [10]. Севілья Р. (R. Sevilla), Злотнік С. (S. Zlotnik), Уерта А. (A. Huerta) розглядають спосіб вирішення геометрично параметризованих задач у CAD-середовищі за допомогою методів редукції порядку, які дозволяють зберігати важливі семантичні ознаки при спрощенні моделі [11]. Редді Е. Дж. (E.J. Reddy), Рангаду В. П. (V.P. Rangadu) демонструють створення параметричних моделей шестерень із урахуванням конструктивних залежностей і обмежень у межах знання-орієнтованого підходу [12]. Мохаммед А. С. Б. (A.S.B. Mohammed) та ін. використовують математичне моделювання для визначення впливу товщини провідника на центральну частоту антени, показуючи ефективність параметричного підходу у задачах високо-частотної інженерії [13].

Дослідження Чжоу Т. (Zhou, T.), Лі Х. (Li, H.), Лі С. (Li, X.), Ланге К.Ф. (Lange, C.F.), Ма Й. (Ma, Y.) [14] акцентує увагу на інтеграції змінних фрактальних геометрій у параметричні

CAD-системи для покращення адаптивності моделей. Паралельно, Патіл К.Р. (Patil, K.R.), Дешпанде С. (Deshpande, S.), Джоші С. (Joshi, S.) [15] пропонують використання Python-скриптів для автоматизації процесу параметричного моделювання складових елементів механічних конструкцій, зокрема фланцевих з'єднань. Розширення цього напрямку доцільно спрямувати на створення гібридних CAD-систем, які поєднують логічне програмування, графову семантику та адаптивну параметризацію для забезпечення цілісності та узгодженості інженерних моделей.

Попри розвиток CAD-систем, проблема семантичної сумісності параметричних конфігурацій залишається недостатньо вирішеною. Наявні підходи здебільшого зосереджуються на геометричному узгодженні моделей, тоді як логіко-семантичні зв'язки між параметрами, їхніми контекстами та функціональним призначенням уніфіковано не формалізовані. Недостатньо досліджено доцільність застосування модельно-параметричного підходу для опису семантичної структури моделей, а також обмежено проаналізовано ефективність наявних засобів подання знань у різних типах CAD-середовищ.

Невирішеними залишаються питання інтеграції гетерогенних моделей із різними контекстами, автоматизованого виявлення конфліктів між параметрами та міжсистемної взаємодії. Автоматизована перевірка в більшості систем обмежується синтаксичним рівнем без урахування семантичної сумісності. Запропоноване дослідження спрямоване на усунення цих прогалин через побудову формальної моделі узгодження параметричних контекстів у $\langle M, P \rangle$ -просторі, що забезпечить новий рівень логічної інтеграції, адаптивності й узгодженості конфігурацій у складних інженерних проєктах.

Постановка завдання. Мета статті: Мета статті – формалізація методологічних підходів до математичного моделювання семантичної сумісності параметричних конфігурацій у CAD-системах із використанням інструментів $\langle M, P \rangle$ -простору з метою підвищення коректності, узгодженості й автоматизованої інтеграції складних технічних моделей.

Для досягнення цієї мети були визначені такі завдання:

1. Обґрунтувати доцільність застосування модельно-параметричного підходу для формалізації семантичної структури параметричних конфігурацій у CAD-системах, а також проаналізу-

вати наявні формалізовані засоби опису моделей і методи подання знань, що можуть бути адаптовані для створення семантично узгодженого проєктного простору.

2. Розробити формальну модель інтеграції гетерогенних параметричних моделей у CAD-середовищах на основі узгодження контекстів і принципів $\langle M, P \rangle$ -простору, що забезпечує семантичну цілісність конфігурацій.

3. Виявити основні проблеми автоматизованої перевірки семантичної сумісності моделей у CAD-системах і запропонувати рекомендації щодо впровадження уніфікованих підходів до керування конфігураціями, орієнтованих на підвищення узгодженості, адаптивності й ефективності проєктування.

Виклад основного матеріалу. У контексті інтелектуалізації інженерних процесів та ускладнення проєктних завдань у CAD-системах особливої актуальності набуває проблема забезпечення логічної та семантичної узгодженості параметричних моделей. Традиційні підходи зосереджуються переважно на геометричних аспектах, залишаючи поза увагою семантичні залежності між параметрами, що ускладнює інтеграцію гетерогенних моделей і підтримку цілісного інформаційного простору. Модельно-параметричний підхід, запропонований у наукових дослідженнях як інструмент уніфікованого подання знань, дає можливість структурувати інформацію на основі зв'язків між параметрами та моделями, формалізувати залежності між об'єктами проєктування, а також забезпечити обчислюваність контекстів, потрібних для автоматизованої перевірки сумісності. У наведеній таблиці подано основні елементи цього підходу у прикладному контексті параметричного моделювання в CAD-системах (табл. 1).

У таблиці 1 відображено функціональні та формальні аспекти застосування модельно-параметричного підходу, який структурує простір знань у CAD-системах через системну взаємодію моделей, параметрів і контекстів. Наприклад, параметром (P) у середовищі проєктування корпусу судна може бути товщина обшивки, яка в конкретній моделі (M) описується залежністю від типу сталі, навантаження та геометричних характеристик. Текст моделі (MT) відображає цю залежність у вигляді рівняння або логічної конструкції, що включається у правила перевірки. Контекст моделі (МК), наприклад, обмежує дію моделі лише до суден водотоннажністю понад 5000 тонн, що дає можливість автоматично вияв-

Основні компоненти модельно-параметричного підходу для формалізації семантичної структури параметричних конфігурацій у CAD-середовищах

Елемент модельно-параметричного підходу	Формалізований опис	Роль у формуванні семантичної структури
Параметр (P)	Формальна характеристика властивості об'єкта, що моделюється	Визначає атрибутивну сутність конфігурації моделі
Моделі (M)	Відношення між параметрами: $M_j = R(P_{1j}, P_{2j}, \dots, P_{ij})$	Встановлює логічні зв'язки між параметрами об'єкта
Текст моделі (MT)	Формальний запис внутрішньої структури моделі	Відображає структуру обчислень і залежностей
Контекст моделі (МК)	Формалізовані умови коректності й застосування моделі	Зумовлює межі застосовності параметричної моделі
<M,P>-простір	Сукупність параметрів, моделей і зв'язків між ними	Формує інформаційне середовище перевірки сумісності
Околиця <M,P>	Підмножина пов'язаних параметрів і моделей для об'єкта	Локалізує простір знань навколо основного параметра або моделі
Відстань у <M,P>-просторі	Числова метрика семантичної близькості між моделями або параметрами	Дає можливість оцінити узгодженість і семантичну сумісність моделей

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 3; 4; 6; 7; 11]

ляти некоректне застосування під час порівняння з іншими об'єктами.

<M,P>-простір у такому випадку містить усі пов'язані параметри (наприклад, товщина, матеріал, довжина секції) та моделі, що встановлюють відношення між ними. Якщо дослідник змінює значення параметра, наприклад, зменшує товщину на 20%, околиця <M,P> дає можливість виявити пов'язані параметри, які автоматично підлягають перерахунку або валідації. Семантична відстань між новою моделлю та базовими шаблонами може бути використана для визначення її сумісності з наявними проєктними стандартами. Наприклад, якщо два параметри мають однакові значення, але різний контекст (наприклад, довжина секції для пасажирського і вантажного судна), то рівень семантичної сумісності буде низьким, що сигналізує про потенційну конфліктність.

На практиці цей підхід реалізується в інженерних середовищах типу Siemens NX, де користувачі формують правила залежності між параметрами та структурують модель як набір взаємопов'язаних логічних об'єктів [16]. У системі CATIA від Dassault Systèmes упроваджено підхід Product Knowledge Template, який дає можливість описувати параметричні моделі за допомогою контекстних обмежень і правил семантичного типу [17]. Крім того, використання підходу knowledge-based engineering забезпечує автоматизовану перевірку сумісності компонентів і полегшує керування залежностями під час створення складних конфігурацій на основі параметрів та їхніх взаємозв'язків [18].

Забезпечення семантичної узгодженості в параметричних CAD-моделях потребує інтеграції засобів, що дають змогу не лише формально описувати геометрію і властивості об'єктів, а й кодувати знання про їхню взаємодію, обмеження та контекст застосування. У сучасних системах проєктування дедалі ширше використовуються методи подання знань, що базуються на формальних структурах: фреймах, онтологіях, продукційних правилах, логіко-алгебраїчних моделях і схемах даних. Ці засоби дають можливість моделювати поведінку об'єктів, задавати причинно-наслідкові залежності між параметрами, автоматизувати перевірку коректності рішень і забезпечувати адаптивність до змін умов. Особливу увагу в контексті CAD потрібно звернути на підходи, які поєднують параметризацію з формальним контролем структурної та функціональної сумісності, зокрема через онтологічне подання знань або логічне узагальнення залежностей [3]. У таблиці 2 представлено порівняння основних формалізованих засобів, що застосовуються або можуть бути адаптовані до потреб семантичного проєктного простору (табл. 2).

У таблиці 2 узагальнено різні формалізовані засоби, які можуть бути використані або адаптовані для створення семантично зв'язного проєктного простору в CAD-системах. Ці інструменти мають різну обчислювальну природу, але однаково важливі для опису залежностей між параметрами, логічних умов функціонування об'єктів і контролю структурної узгодженості

Порівняльна характеристика формалізованих засобів подання знань для семантичного узгодження параметричних моделей у CAD-середовищах

Формалізований засіб подання знань	Основні характеристики	Потенціал адаптації для CAD
Продукційні правила	Структура: «якщо, то», логічні висновки за умовами	Підходить для автоматизації обмежень у параметричних моделях, ефективний у rule-based design
Фреймова структура	Ієрархічне подання об'єктів з атрибутами та слотами	Застосовується для моделювання типових компонентів із варіативними властивостями
Онтології	Формалізована множина понять і зв'язків між ними	Дає змогу створити семантично зв'язане середовище CAD-моделей та узгодити терміни між підсистемами
Логічні формули та логіко-алгебраїчні структури	Використання логіки предикатів або булевих виразів	Дає можливість перевіряти відповідність моделей умовам функціонування та забезпечувати несуперечність
XML-схеми та структуровані бази знань	Форматована структурна інформація з тегами й типами даних	Важливий інструмент для передавання параметричних моделей між системами (interoperability)

Джерело: сформовано автором на підставі [2; 4; 6; 7; 8; 13; 14]

моделей [10]. Продукційні правила є ефективними у випадках, коли модель має реагувати на конкретні значення параметрів через активацію відповідних сценаріїв модифікації, наприклад, у середовищі Autodesk Inventor iLogic, де користувачі задають умови для автоматичної зміни розмірів або конфігурацій [19]. Фреймові структури активно використовуються у PTC Creo, де створення сімейств моделей базується на змінних атрибутах, що зберігаються у вигляді шаблонів із внутрішніми слотами [20].

Онтології дедалі частіше застосовуються в системах міждисциплінарного проєктування, зокрема в галузі Smart Manufacturing і цифрових двійників, де використовується платформа OntoCAD, орієнтована на створення єдиного семантичного простору для архітектурних, механічних та електронних моделей [21]. XML-схеми реалізуються в більшості сучасних CAD/CAM/CAE-систем, наприклад, у Solid Edge для організації параметричних шаблонів і конфігурацій із подальшою інтеграцією у PLM-середовище [22]. Логіко-алгебраїчні моделі застосовуються у спеціалізованих інженерних експертних системах, таких як Dymola або Simcenter Amesim, де складні технічні системи перевіряються на функціональну та логічну узгодженість перед запуском симуляцій [23].

Адаптація формалізованих засобів подання знань до середовищ CAD дає можливість транс-

формувати системи із геометрично орієнтованих інструментів у повноцінній платформі інженерного мислення, де кожен параметр – не просто змінна, а носій контексту, логіки та функції в межах інтегрованої семантичної системи.

У сучасних CAD-середовищах спостерігається зростання потреби в інтеграції гетерогенних моделей, які походять із різних джерел, створені за допомогою різних програмних інструментів і мають відмінну логіку побудови, структуру параметрів і формати даних. Це особливо характерно для проєктів зі складною міждисциплінарною природою, де в єдиному інформаційному просторі мають співіснувати механічні, електронні, архітектурні та логістичні моделі. У таких умовах інтеграція моделей потребує не лише уніфікації форматів або синхронізації геометрії, а й узгодження семантичного рівня, тобто значень параметрів, їхніх взаємозв'язків, контексту застосування та цільового функціонального призначення.

Запропонована формальна модель інтеграції гетерогенних CAD-моделей ґрунтується на принципах $\langle M, P \rangle$ -простору, в межах якого кожна модель описується як відношення між параметрами (P), контекстами (МК) і текстами моделей (MT). Інтеграція досягається через формальне виявлення сумісних околиць у $\langle M, P \rangle$ -просторі, порівняння відстаней між моделями, нормалізацію контекстів і побудову

оператора узгодження. Це актуально тим, що дає можливість здійснювати автоматизовану семантичну інтеграцію навіть для моделей із різною структурою за умови формалізації їхніх контекстів. Її відмінність від класичних PLM- або PDM-систем полягає в опорі не на метадані, а на структурну та логічну подібність моделей у межах формалізованого параметричного простору. Модель побудована на основі апарату логічної метрики, семантичної нормалізації й теорії інформаційної сумісності. Вона передбачає виявлення конфліктів між контекстами моделей, побудову онтологічно узгоджених описів і формування синтезованих моделей в уніфікованому середовищі (табл. 3).

Практична реалізація цієї формальної моделі в умовах сучасних CAD-процесів дає змогу значно скоротити час інтеграції різнорідних проєктних рішень, зменшити кількість помилок під час імпорту або поєднання моделей, а також підвищити якість технічного рішення завдяки формальній перевірці на етапі об'єднання. Наприклад, під час проєктування комплексної транспортної системи модель кузова (створена в SolidWorks), модель системи керування (створена в MATLAB/Simulink) і модель логістичного розташування (створена в ArchiCAD або Revit) можуть бути інтегровані на рівні опису параметричних контекстів через оператор Ω після попередньої нормалізації понятійного апарату й оцінювання семантичної відстані. У результаті формується

логічно узгоджене середовище, в якому можливо проводити симуляції, оптимізацію та автоматизоване переналаштування моделей на основі змін у вихідних параметрах. Такий підхід також дає можливість адаптувати систему до майбутніх оновлень моделей без потреби повної реконструкції проєкту, оскільки вся інтеграція ґрунтується на формальних залежностях, а не лише на структурній ієрархії або зовнішніх посиланнях. У довгостроковій перспективі це забезпечує підвищення стійкості та гнучкості CAD-архітектури, що особливо важливо в умовах індустрії 4.0 і динамічно змінного виробничого середовища.

Процес автоматизованої перевірки семантичної сумісності в CAD-середовищах стикається з низкою системних обмежень, що ускладнюють інтеграцію моделей та перевірку їхньої коректності на рівні значень, логіки й взаємодії параметрів [14]. Однією з найглибших проблем є фрагментарність самих моделей, коли проєктні рішення формуються в межах окремих модулів або дисциплін, що не мають спільного семантичного підґрунтя. Наприклад, модель компонента, побудована в електронному модулі, може мати іншу структуру параметрів й інтерпретацію одиниць виміру порівняно з механічним модулем, навіть якщо описує той самий об'єкт [6]. Це призводить до розриву в логіці перевірки й до ситуацій, коли CAD-система не здатна автоматично виявити конфлікти або неприпустимі конфігурації.

Таблиця 3

**Формалізовані компоненти моделі інтеграції гетерогенних CAD-моделей
на основі узгодження параметричних контекстів у <M,P>-просторі**

Компонент формальної моделі	Формалізоване визначення	Функція в інтеграції гетерогенних моделей
Параметричний контекст (МК)	Множина умов та обмежень для моделі: $MK_i = \{Ci_1, Ci_2, \dots, Ci_n\}$	Визначає область допустимих значень параметрів і сценаріїв їхнього використання
Відстань у <M,P>-просторі	$D(M_1, M_2) = f(\Delta P, \Delta MK)$	Оцінює рівень семантичної подібності між моделями для подальшого узгодження
Узгоджена околиця	$\partial < M, P > = \{M_i, M_j, \dots, M_k\}$ при $D < \epsilon$	Множина моделей, що можуть бути інтегровані без втрати логіки або змісту
Оператор узгодження моделей	$\Omega(M_1, M_2) \rightarrow M_\Sigma$	Формалізує процес злиття моделей з урахуванням контекстної сумісності
Онтологічна нормалізація	$N(M_i) = M'_i$ з єдиним понятійним описом	Забезпечує узгодженість термінології та структур параметрів перед інтеграцією
Результівна модель	$M_\Sigma = \Omega(N(M_1), N(M_2), \dots, N(M_n))$	Створена на основі формалізованого об'єднання моделей у спільному середовищі

Джерело: власна розробка автора

Неоднорідність способів подання даних виявляється як у синтаксичному, так і в семантичному плані. Дані можуть зберігатися у вигляді формул, таблиць, структурованих записів, тегованих XML-файлів або внутрішніх об'єктів моделі, що не підлягають безпосередньому аналізу без попередньої нормалізації. Це знижує ефективність вбудованих механізмів перевірки, які зазвичай працюють на рівні простих обмежень (наприклад, перевірка типів або діапазонів), але не здатні забезпечити глибокий аналіз логічних зв'язків між об'єктами. Крім того, розрізненість системних підсистем, наприклад, між модулем тривимірного моделювання, розрахунковим ядром, засобами параметризації та базами знань, створює додаткові бар'єри для формування єдиного контексту моделі. Внаслідок цього перевірка обмежується окремими ділянками, не охоплюючи повного простору взаємозалежностей, і не може виявити семантичних суперечностей, які виникають лише на стиках між підсистемами.

Також потрібно зазначити про обмежену підтримку механізмів адаптивного аналізу, коли параметри або умови моделі змінюються динамічно залежно від попередніх рішень. Поточні інструменти автоматизованої перевірки зазвичай не мають механізмів відстеження історії змін параметрів, причинно-наслідкових залежностей між моделями або можливості масштабованого онтологічного узгодження. Відсутність системної підтримки логіко-онтологічних структур у межах CAD-систем обмежує не лише виявлення помилок, а й можливість попередження помилкових конфігурацій ще на етапі моделювання [24]. Як наслідок, значна частина помилок виявляється лише під час тестування або експлуатації моделей, що призводить до втрати часу, ресурсів і потреби повторного моделювання [25]. Загалом проблема автоматизованої перевірки семантичної сумісності потребує не лише алгоритмічних рішень, а й перегляду архітектури CAD-систем із позиції семантичної цілісності та взаємодії підсистем через єдиний логіко-параметричний простір.

Удосконалення керування параметричними конфігураціями в CAD-системах потребує впровадження уніфікованих підходів, що поєднують формальну структуру подання даних із механізмами логіко-семантичної узгодженості. Насамперед доцільно запровадити єдиний формат опису параметрів і моделей із чітко визначеними контекстами, які передбачають обмеження, допус-

тимі області значень і логічні зв'язки з іншими параметрами. Це дасть можливість створити стабільну основу для валідації моделей не лише на рівні синтаксису, а й за змістовними залежностями, які мають вирішальне значення в мультидисциплінарних проєктах.

Універсальна конфігурація також потребує інтеграції механізмів автоматизованої нормалізації параметрів у межах $\langle M, P \rangle$ -простору, що забезпечить узгодження гетерогенних моделей через зіставлення їхніх семантичних структур, а не лише геометричних чи ієрархічних зв'язків. Важливим кроком є і побудова адаптивних правил зв'язування моделей, які можуть автоматично оновлюватися під час зміни основних параметрів або контекстів, реалізуючи концепцію динамічної конфігурації.

Доцільно також реалізувати підтримку онтологічного рівня опису моделей із застосуванням словників понять, ієрархій об'єктів і семантичних шаблонів, що дають можливість забезпечити спільне розуміння між підсистемами CAD-середовища. Таке впровадження сприятиме не лише зменшенню кількості помилок на етапі проєктування, а й значному скороченню часу повторної адаптації моделей у разі зміни умов або вимог.

Розширення засобів керування параметричними конфігураціями має передбачати модулі з візуалізації логіко-семантичних зв'язків, які дають змогу інженеру бачити не лише структуру моделі, а і її змістовні залежності. У поєднанні із системами трасування змін це дасть можливість сформулювати адаптивні моделі, здатні до самоперевірки й автоматичного реагування на зміни. Таким чином, уніфіковані методи керування конфігураціями, засновані на формальних принципах $\langle M, P \rangle$ -структури, відкривають можливість для створення високонадійних, адаптивних і логічно узгоджених CAD-рішень, що відповідають вимогам сучасного інженерного проєктування в умовах складності та динаміки виробничих середовищ.

Висновки. У дослідженні обґрунтовано, що забезпечення семантичної сумісності параметричних конфігурацій є основним чинником підвищення надійності й автоматизованості CAD-проєктування. Запропоновано модельно-параметричний підхід, заснований на принципах $\langle M, P \rangle$ -простору, який дає можливість формалізувати логічні зв'язки між параметрами, контекстами та моделями, забезпечуючи узгоджене функціонування гетерогенних конфігурацій.

Аналіз формалізованих засобів подання знань засвідчив ефективність комбінованого використання продукційних правил, онтологій, фреймів і XML-схем для організації семантичного середовища CAD-систем. Виявлено основні проблеми: фрагментарність моделей, семантичну неоднорідність і слабку взаємодію між підсистемами, що знижують ефективність автоматизованої перевірки.

Запропонована формальна модель інтеграції моделей через узгодження контекстів

у <M,P>-просторі забезпечує семантичну цілісність проектного простору, можливість адаптивного оновлення конфігурацій і зменшення проєктних помилок.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на поєднання принципів <M,P>-моделювання з когнітивними методами й машинним навчанням для створення інтелектуальних систем автоматизованого контролю та семантичної оптимізації в CAD-середовищах.

Список літератури:

1. Zou Q., Feng H.-Y., Gao S. Variational direct modeling: A framework towards integration of parametric modeling and direct modeling in CAD. *Computer-Aided Design*. 2023. Vol. 157, № 103465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103465> (date of access: 10.04.2025).
2. Aranburu A., Justel D., Contero M., Camba J.D. Geometric variability in parametric 3D models: Implications for engineering design. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 109, № 1. P. 383–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.266> (date of access: 10.04.2025).
3. Kyratzi S., Azariadis P. Integrated design intent of 3D parametric models. *Computer-Aided Design*. 2022. Vol. 146, № 103198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103198> (date of access: 10.04.2025).
4. Reddy E.J., Reddy K.S., Reddy P.N. Recent Advancements in Knowledge-Based Parametric Modeling of Mechanical Components. In: Yadav S., Arora P.K., Sharma A.K., Kumar H. (eds) *Proceedings of Third International Conference in Mechanical and Energy Technology. ICMET 2023*. Singapore: Springer. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2024. Vol. 390. P. 389–398. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-2716-2_35 (date of access: 10.04.2025).
5. Tang Z., Zou Q., Gao S. Determining valid parameter ranges for multi-parameter editing of 3D parametric CAD models. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2025. Vol. 25, № 1. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4068115> (date of access: 10.04.2025).
6. Taylor N.J., Haimes R. Geometry modelling: Underlying concepts and requirements for computational simulation. In: *2018 Fluid Dynamics Conference*. 2018. Article 3402. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-3402> (date of access: 10.04.2025).
7. Harries S., Abt C., Brenner M. Upfront CAD—Parametric Modeling Techniques for Shape Optimization. In: Minisci E., Vasile M., Periaux J., Gauger N., Giannakoglou K., Quagliarella D. (eds) *Advances in Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control in Engineering and Sciences*. Cham: Springer. *Computational Methods in Applied Sciences*. 2019. Vol. 48. P. 115–127. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-89988-6_12 (date of access: 10.04.2025).
8. Vukašinović N., Duhovnik J. *Advanced CAD modeling. Explicit, parametric, free-form CAD and Re-engineering*. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. 254 p. DOI: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-02399-7.pdf> (date of access: 10.04.2025).
9. Machado F., Malpica N., Borromeo S. Parametric CAD modeling for open source scientific hardware: Comparing OpenSCAD and FreeCAD Python scripts. *Plos One*. 2019. Vol. 14, № 12. Article e0225795. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225795> (date of access: 10.04.2025).
10. Agarwal D., Robinson T.T., Armstrong C.G., et al. Parametric design velocity computation for CAD-based design optimization using adjoint methods. *Engineering with Computers*. 2018. Vol. 34, № 2. P. 225–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00366-017-0534-x> (date of access: 10.04.2025).
11. Sevilla R., Zlotnik S., Huerta A. Solution of geometrically parametrised problems within a CAD environment via model order reduction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 358, № 1. Article 112631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.112631> (date of access: 10.04.2025).
12. Reddy E.J., Rangadu V.P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach. *Alexandria Engineering Journal*. 2018. Vol. 57, № 4. P. 3139–3149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.010> (date of access: 10.04.2025).
13. Mohammed A.S.B., Kamal S., Ain M.F.B., Hussin R., Najmi F., Sundi S.A., Ahmad Z.A., Ullah U., Omar M.F.B.M., Othman M. Mathematical model on the effects of conductor thickness on the centre frequency at 28 GHz for the performance of microstrip patch antenna using air substrate for 5G application. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60, № 6. P. 5265–5273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.050> (date of access: 10.04.2025).

14. Zhou T., Li H., Li X., Lange C. F., Ma Y. Feature-based modeling for variable fractal geometry design integrated into CAD system. *Advanced Engineering Informatics*. 2023. Vol. 57. Article 102006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102006> (date of access: 10.04.2025).
15. Patil K.R., Deshpande S., Joshi S., et al. Developing an integrated design framework using Python scripting for parametric CAD modelling of flange coupling. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*. 2024. Vol. 18. P. 4451–4462. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01694-x> (date of access: 10.04.2025).
16. Siemens NX: website. 2025. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/> (date of access: 04.04.2025).
17. CATIA by Dassault Systèmes: website. 2025. URL: <https://www.3ds.com/products-services/catia/> (date of access: 04.04.2025).
18. Knowledge-Based Engineering (KBE) in CAD systems: website. 2025. URL: <https://www.engineering.com/story/knowledge-based-engineering-in-cad> (date of access: 04.04.2025).
19. Autodesk Inventor iLogic: website. 2025. URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/illogic> (date of access: 04.04.2025).
20. PTC Creo Parametric: website. 2025. URL: <https://www.ptc.com/en/products/creo> (date of access: 04.04.2025).
21. OntoCAD Project – Semantic Engineering: website. 2025. URL: <https://ontocad.net> (date of access: 04.04.2025).
22. Solid Edge – Siemens Software: website. 2025. URL: <https://solidedge.siemens.com> (date of access: 04.04.2025).
23. Dymola by Dassault Systèmes: website. 2025. URL: <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola> (date of access: 04.04.2025).

Rykhalskyi O.Yu. MATHEMATICAL MODELING OF SEMANTIC COMPATIBILITY OF PARAMETRIC CONFIGURATIONS IN CAD SYSTEMS

The article investigates the problem of ensuring the semantic compatibility of parametric configurations in CAD environments, which is essential for increasing the level of automation, structural consistency, and adaptability of modern engineering design. The relevance of the topic is due to the need to integrate heterogeneous models with different construction logics within a single information space, which is complicated by the fragmentation of structures, heterogeneity of formats, and the lack of an everyday semantic basis. The purpose of the article is to generalize and formalize methodological approaches to mathematical modeling of semantic compatibility of parametric configurations in CAD systems based on the principles of $\langle M, P \rangle$ -space, which allows to improve the correctness of description, logical integrity and level of automated integration of complex technical models.

The research methodology is based on the tools of the model-parametric approach, logical and algebraic description of dependencies, formal contexts, product rules and mechanisms of ontological normalization. An analysis of the existing formalized means of knowledge representation is carried out, and a model for matching parametric configurations is built by identifying compatible neighborhoods in $\langle M, P \rangle$ -space, estimating the semantic distance and applying the model integration operator.

The scientific novelty is the proposed structure of formalized integration of heterogeneous models, taking into account contextual compatibility and semantic mapping, which ensures the functional integrity of the design space. It has been established that the main obstacles to automated verification are semantic fragmentation, lack of inter-system interaction, and insufficient support for adaptive change verification. The conclusions prove the effectiveness of the proposed model for creating adaptive, logically consistent and scalable parametric configurations. Prospects for further research are related to the introduction of elements of cognitive design, intelligent dependency tracing, and machine learning tools for in-depth analysis of semantic conformance in next-generation CAD environments.

Key words: *model-parametric approach, logical and ontological consistency, contextual design, knowledge formalization, engineering interoperability, information technologies, semantic compatibility.*