

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет архітектури, будівництва та дизайну

(повне найменування факультету)

Кафедра архітектури та дизайну

(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

ДИСКРЕТНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ ДИЗАЙН, ЯК
ІННОВАЦІЙНИЙ НАПРЯМ ПРОЄКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ
СЕРЕДОВИЩА

спеціальність 022 Дизайн
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Дизайн»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
Групи Дмз-21
Самчук Володимир Петрович

(підпис)

Керівник:
Д.т.н., професор
Пустюльга Сергій Іванович

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«15» травня 2023 р.
Гарант освітньої програми:
кандидат мистецтвознавства, доцент
Бондарчук Юлія Сергіївна

Луцьк – 2023 року

Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет архітектури, будівництва та дизайну
Кафедра архітектури та дизайну
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 02 «Культура та мистецтво»
Спеціальність: 022 «Дизайн»
Освітня програма: «Дизайн»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри архітектури та дизайну

Оксана ПАСІЧНИК

«...» грудня 2023 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти**

САМЧУК Володимир Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «**Дискретно-параметричний дизайн як інноваційний напрям проектування об'єктів середовища**», керівник кваліфікаційної роботи **Пустюльга Сергій Іванович, д.т.н., професор**, (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання) затверджені наказом вищого навчального закладу від «4» січня 2023 року №040/01-02
2. Строк подання кваліфікаційної роботи 01 грудня 2023 року
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: *Аналіз та дослідження дискретно-параметричного напрямку проектування об'єктів середовища, як окремої складової параметричного дизайну.*
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
У 1 розділі дослідити історію становлення та розвитку параметричного напрямку проектування. 2 розділ – класифікувати та систематизувати методи параметричного дизайну при розробці сучасних варіантів об'єктів середовища. 3 розділ – розробити основні методи та підходи застосування дискретно-параметричного дизайну для варіативного проектування об'єктів середовища. У проєктному розділі – розробити єдину дизайн-концепцію дискретного параметричного моделювання садово-паркових меблів та споруд, з єдиним підходом до композиційних рішень.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Ілюстрації історії становлення та розвитку параметричного дизайну, приклади використання об'єктів середовища в різних дизайн-проєктах. Типологічні схеми класифікацій дискретно-параметричного напрямку проектування. Ілюстрації варіантів застосування садово-паркових меблів та споруд для сучасного просторового оформлення рекреаційних зон. Концептуальні втілення проєкту об'єктів середовища на основі запропонованих композиційних рішень методами

дискретно-параметричного дизайну.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання вилави	Завдання
Розділ 1	Пустюльга С.І., доктор технічних наук, професор		
Розділ 2	Пустюльга С.І., доктор технічних наук, професор		
Розділ 3	Пустюльга С.І., доктор технічних наук, професор		
Розділ 4	Пустюльга С.І., доктор технічних наук, професор		

7. Дата видачі завдання 10 серпня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

N з/п	Назва етапів науково-проектної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1.	10.09. 2023	
2.	Розділ 2.	20.09. 2023	
3.	Розділ 3.	10.10. 2023	
4.	Розділ 4.	20.10. 2023	
5	Формування висновків та додатків	15.11. 2023	
6	Розробка проектної частини	20.10.2023	
7	Формування реферату	20.11.2023	
8	Подання пояснювальної записки на перевірку	01.12.2023	
9	Подання виконаної КР з відгуком	06.12.2023	
10	Подання виконаної КР на підпис декану та відповідальному секретарю ЕК	07.12.2023	
11	Захист кваліфікаційної роботи	15.12.2023	

Магістрант

**Керівник кваліфікаційної
роботи**

САМЧУК В. П.

(прізвище та ініціали)

ПУСТЮЛЬГА С.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Самчук В.П. Дискретно-параметричний дизайн, як інноваційний напрям проєктування об'єктів середовища. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Дизайн» спеціальності 022 Дизайн. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2023.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, 4-х розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел, додатків.

У роботі досліджено наукові основи дискретно-параметричного дизайну як інноваційного підходу до проєктування об'єктів середовища.

Розв'язано наступні завдання:

1 – розглянуто історичний контекст та еволюцію параметричного дизайну з метою з'ясування коренів та важливості цього напрямку;

2 – проведено класифікацію та систематизацію параметричного підходу в дизайні з урахуванням різних критеріїв та основних сфер його впровадження;

3 – розроблено нові та оптимізовано існуючі алгоритми для формування дискретно-параметричних об'єктів середовища з урахуванням сучасних вимог до ефективності, екологічності та доступності технології їх виготовлення;

4 – застосовано отримані знання та розроблені алгоритми для створення дизайну об'єктів середовища, включаючи альтанки та окремі елементи, що сприяють зручності та комфорту користувачів.

Отримані результати сприяють науковому розумінню та розвитку дискретно-параметричного дизайну, а також створюють нові можливості для практичного застосування цього напрямку в проєктуванні об'єктів середовища.

Ключові слова: параметричний дизайн, воксельна модель, дискретно-воксельне представлення, дизайн-розробка об'єктів середовища.

SUMMARY

Samchuk V.P. Discrete-parametric design as an innovative direction of designing environmental objects. Manuscript.

Qualification work for master's degree in Design, specialty 022 Design. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2023.

The master's qualification work consists of an introduction, 4 chapters, conclusions and suggestions, a list of references, and appendices.

The study explores the scientific underpinnings of discrete-parametric design as a novel method for designing environmental objects.

It addresses main objectives:

1 – Examining the historical context and progression of parametric design to discern its origins and significance.

2 – Categorising and organising the application of the parametric approach in design, taking into account various criteria and its principal areas of application.

3 – New algorithms have been developed for the formation of discrete-parametric environmental objects and optimization of existing ones, considering modern requirements for efficiency, environmental friendliness, and availability of their manufacturing technology.

4 – The acquired knowledge and developed algorithms have been applied to design environmental objects, such as gazebos and individual elements that enhance users' convenience and comfort.

The results obtained provide contributions to the scientific comprehension and advancement of discrete-parametric design. Additionally, these results generate novel prospects for the practical implementation of this field in the designing of environmental object design.

Keywords: parametric design, voxel model, discrete-voxel representation, design development of environmental objects.

ЗМІСТ

Вступ	12
1 Історія та розвиток параметричного дизайну	16
1.1 Виникнення та етапи розвитку параметричного дизайну	16
1.2 Ключові технології та інновації, що сприяли розвитку параметричного дизайну	20
1.3 Вплив параметричного проектування на сучасну архітектуру та дизайн.	23
Висновки до розділу 1	26
2 Параметризація та воксельне представлення моделей	28
2.1 Основи математичного поняття «параметризація». Класифікація методів параметричного моделювання	28
2.2 Воксельне представлення параметричних моделей	34
Висновки до розділу 2	38
3 Дискретно-параметричний дизайн	40
3.1 Воксельне представлення моделей об'єктів як основа дискретно-параметричного дизайну	40
3.2 Дискретно-воксельне параметричне проектування об'єктів середовища .	49
Висновки до розділу 3	56
4 Дизайн-розробка об'єктів середовища	58
4.1 Складові частини об'єкта проектування	61
4.2 Особливості формотворення об'єкта розробки	61
4.3 Матеріали і технологія виготовлення	63
Висновки до розділу 4	65
Висновки	67
Перелік джерел посилання	69
Додатки	73
Додаток А	74

ВСТУП

Актуальність проблеми. Сучасний світ переживає швидкий та нестримний розвиток технологій, що перетворює спосіб, яким ми бачимо, проєктуємо та взаємодіємо з нашим оточенням. Проєктування об'єктів середовища, таких як архітектурні споруди, міське середовище, ландшафт і предмети дизайну, стає складнішим завдяки вимозі забезпечити ефективність, естетику та екологічність. У такому контексті дискретно-параметричний дизайн виявляється актуальним і інноваційним підходом до розв'язання проєктних завдань.

Випускна робота присвячена дослідженню та розробці нового напрямку параметричного дизайну, а саме дискретно-параметричного дизайну як сучасного інструмента проєктування об'єктів середовища. Вона спрямована на вивчення історії, класифікації та систематизації параметричного дизайну, а також на розробку нових алгоритмів для формування параметричних об'єктів середовища. Результати цього дослідження будуть використані для створення проєктів дизайну, включаючи альтанки та окремі об'єкти середовища, що відповідають сучасним вимогам естетики, ефективності та екологічної стійкості.

Робота має на меті розкрити потенціал дискретно-параметричного дизайну як інструмента, що дозволяє створювати інноваційні та ефективні рішення для об'єктів середовища. Вона також надає вагому підтримку дизайнерам, архітекторам та інженерам, які зацікавлені у розвитку процесу проєктування та покращенні нашого оточення.

Впровадження дискретно-параметричного дизайну може відкрити нові можливості для творчості та інновацій у сфері дизайну об'єктів середовища, та надати інструменти для створення більш зручного, функціонального та естетичного оточення для людей. В даній роботі досліджується новий інструмент, який відкриє шлях до інновацій через дискретно-параметричний метод проєктування.

Крім того, важливим аспектом цього дослідження є його потенційний внесок у формування майбутньої архітектурно-дизайнерської парадигми, яка буде відповідати сучасним вимогам та викликам.

Загалом, актуальність та значення цього дослідження визначаються його потенціалом змінити підходи до проєктування об'єктів середовища, зробити їх більш ефективними, екологічно чистими та комфортними для людей. Це дослідження розширює можливості дизайнерів та архітекторів, відповідає потребам сьогодення та буде актуальним і в майбутньому.

Таким чином, робота може бути важливою в контексті сучасних викликів у галузі дизайну в таких областях:

1. Інноваційність у дизайні – дискретно-параметричний дизайн відкриває новий спосіб мислення та підхід до проєктування. Його інноваційність полягає в здатності створювати об'єкти, які оптимізовані під вимоги користувачів, забезпечують естетичність, ефективність та екологічність.

2. Сучасні виклики екології – зміна кліматичних умов та зростання екологічних проблем роблять актуальним пошук дизайнерських рішень, які б сприяли створенню більш стійкого та екологічного середовища. Параметричний дизайн може допомогти зробити це ефективніше.

3. Споживча динаміка – зростання населення та споживча активність створюють попит на інноваційні об'єкти середовища, які б задовольняли потреби сучасного суспільства.

4. Міське середовище – зростання міського населення ставить під загрозу комфорт та якість міського середовища. Дослідження у напрямку параметричного дизайну може допомогти створити більш зручним та придатне для життя місце.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є розробка основ дискретно-параметричного дизайну як інноваційного підходу до проєктування об'єктів середовища. Робота ставить перед собою наступні основні завдання:

1 – розглянути історичний контекст та еволюцію параметричного дизайну з метою з'ясування коренів та важливості цього напрямку;

2 – провести класифікацію та систематизацію параметричного підходу в дизайні з урахуванням різних критеріїв та основних сфер його впровадження;

3 – розробити та оптимізувати нові алгоритми для формування дискретно-параметричних об'єктів середовища з урахуванням сучасних вимог до ефективності, екологічності та доступності технології їх виготовлення.

4 – застосувати отримані знання та розроблені алгоритми для створення дизайну об'єктів середовища, включаючи альтанки та окремі елементи, що сприяють зручності та комфорту користувачів.

Об'єктом дослідження є параметричний дизайн в контексті створення об'єктів середовища – від меблів та садово-паркових елементів до архітектурних структур.

Предметом дослідження є розгляд інноваційних аспектів та наукових основ дискретно-параметричного дизайну, а також його практична реалізація у створенні функціональних та естетичних об'єктів, що впливають на навколишнє середовище та сприяють підвищенню якості життя.

Наукова новизна отриманих результатів:

– *вперше:* комплексно розглянуто історичні аспекти та ключові технології, які вплинули на розвиток параметричного дизайну, що розкриває нові перспективи для розуміння його еволюції;

– *вдосконалено:* систематизацію та класифікацію параметризації, що дозволило забезпечити більш повне розуміння її різноманітності та сфер застосування;

– *вдосконалено:* методологію проектування об'єктів середовища, розширивши її завдяки використанню дискретно-воксельного представлення моделей, що дозволяє досягати нового рівня індивідуалізації та адаптації до потреб користувача;

– *отримали подальший розвиток*: алгоритми дискретного проектування параметричних об'єктів середовища, що розширює можливості їх творення та вдосконалює процес взаємодії дизайнера з цифровим середовищем.

Практичне значення дослідження. Дослідження визначає нові можливості для створення інноваційних об'єктів середовища за допомогою дискретно-параметричного дизайну. Результати роботи можуть бути використані: 1) у науково-теоретичних дослідженнях; 2) у навчально-методичній роботі; 3) під час проектування та промислового виробництва для оптимізації та автоматизації процесів виготовлення параметрично проєктованих об'єктів.

Апробація. Результати роботи були представлені на V Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми сучасного дизайну», 27 квітня 2023 року у Київському національному університеті технологій та дизайну. Опубліковано 2 статті та 1 тези, пов'язані із темою дослідження [1, 2, 3].

Структура роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання (40 позицій) та додатків.

1 ІСТОРІЯ ТА РОЗВИТОК ПАРАМЕТРИЧНОГО ДИЗАЙНУ

1.1 Виникнення та етапи розвитку параметричного дизайну

Параметричний дизайн – це інноваційний підхід до дизайну, який отримав широке визнання та зайняв своє місце в сучасному світі. Щоб розуміти сутність цього напрямку розглянемо його започаткування та розвиток в історичній ретроспективі.

Історія параметричного дизайну, як ключового підходу в сучасному світі творчості та технологій, сягає своїм корінням другої половини 20-го століття, яка відзначається першими кроками у розвитку обчислювальних технологій та спробах застосування їх у дизайні. Спочатку це були експерименти з обчислювальними методами в індустріальному та архітектурному середовищі, де поняття «параметр» почало набувати ваги.

У різних літературних джерелах початок історії розвитку, становлення та еволюції «параметричного дизайну» трактується по-різному. Як науково обґрунтований напрям дизайну він установився на початку 90 років 20-го століття і був сприйнятий спеціалістами як авангардно-дизайнерський рух. Першими практиками даного напрямку стали Д. Рейзер, Г. Лінн, Л. Спайбрук, К. Остерхуїс, М. Беррі [4] та інші, у роботах яких було адаптовано нове програмне забезпечення, що з'являлося на ринку, для цифрового представлення дизайн-проектів та використання, при цьому, елементів анімації [5].

У цей період обчислювальна техніка стала доступною для деяких індустрій, що викликало інтерес до можливостей, які це відкривало для дизайну. Комп'ютери, хоча й обмежені за сучасними стандартами, були великим кроком уперед порівняно із звичайними методами ручного проектування.

Особливий вклад у становлення параметричного моделювання зробив у 1988 році А. Сазерленд, який створив інтерактивну програму автоматизованого проектування під назвою Sketchpad, що згодом стала прообразом майбутніх систем автоматизованого проектування [6].

Архітектори та дизайнери почали експериментувати з цими новими можливостями. Вони вперше мали змогу моделювати форми та структури, які були складні для уявлення та виконання вручну. Це відкрило нові горизонти для творчості, особливо в архітектурній сфері, де відбулися перші спроби створення об'єктів, які не обмежувалися традиційними геометричними формами.

Хоча термін «параметричний дизайн» ще не існував, перші кроки в напрямку параметризації були зроблені. Дизайнери почали використовувати числові параметри для опису форм та змінювати їх, спостерігаючи за впливом на результат. Ці експерименти поклали основу для майбутнього розвитку параметричного дизайну та стали важливим кроком у переосмисленні ролі комп'ютера в творчому процесі.

Кінець 20-го – початок 21-го століття став періодом активного формування і наповнення змістом терміну «параметричний дизайн».

Аналоговий метод проектування, запропонований Гауді [7], включав основні функції розрахунку параметричних моделей, до яких відносяться: вхідні параметри, рівняння, обмеження та результуючі моделі. Змінюючи окремі параметри цих моделей, Гауді міг генерувати різні версії своїх проєктів, будучи упевненим, що отримані структури знаходяться в певному прогнозованому фізичному стані.

Таким чином, цей період відзначився не лише практичними експериментами, але й виробленням теоретичної бази та обґрунтуванням основних концепцій, які в подальшому лягли в основу параметричного дизайну.

На початку 21 століття зростання обчислювальної потужності комп'ютерів та розвиток програмного забезпечення стали каталізаторами для нового етапу в розвитку дизайну. Дизайнери відчували, що комп'ютер може бути більше, ніж просто інструмент для відтворення ідей, і вперше почали розглядати його як засіб для генерації нових ідей та концепцій, тобто фактично почалась еволюція дизайнерського мислення.

Патрік Шумахер із проєктної групи Захи Хадід почав застосовувати термін параметризм як аналог математичного поняття «параметризації» в архітектурній

практиці, яке визначив як: «Параметризм – це стиль сучасної авангардної архітектури та дизайну, який вважається наступником постмодерністської та сучасної архітектури». Термін був ним у перше застосований у 2008 році, де параметризм трактувався як система обмежень при параметричному проєктуванні. Параметризм покладається на програми, алгоритми і комп'ютери для управління рівняннями в цілях проєктування [8].

Згідно П. Шумахеру, «параметризм – це система самореферентності, у якій усі елементи взаємопов'язані, а зовнішній вплив, що змінюється в одному елементі, змінює й усі інші» [9].

У цьому контексті надалі і формується поняття «параметричний дизайн». Дизайнери розуміли, що не лише окремі елементи можуть бути визначені числовими параметрами, але й сам процес створення може бути параметризований. Вперше стали вироблятися системи та підходи, які дозволяли створювати об'єкти, змінюючи параметри, які визначали їхню форму, структуру, а іноді й функцію.

Поруч із формуванням терміну «параметричний дизайн», розвивалися і алгоритмічні підходи до створення об'єктів. Дизайнери почали використовувати складні алгоритми та логіку програмування для формування взаємозв'язків між різними параметрами, створюючи тим самим гнучкі та динамічні системи дизайну.

Цей період також був часом активної концептуалізації параметричного дизайну як окремої галузі. З'явилися перші теоретичні роботи, в яких обґрунтовувалась сутність та можливості параметричного дизайну як інноваційного підходу до творчості, зокрема праці Девіда Гербера [10], Ріка Сміта [11], Домініка Гольцера [12] та інших.

Починаючи з 2000-х років параметричний дизайн став важливою складовою сучасної архітектури та дизайну. Цей період характеризується широким використанням цього підходу в реальних проєктах та його інтеграцією у креативний процес на всіх рівнях.

Вудбері Р. у своїй монографії «Елементи параметричного проектування», яка вийшла у 2010 році стверджує, що в параметричному середовищі дизайну проєктувальникам потрібно знання іншого роду, які можуть «передбачити постійні ефекти, щоб зрозуміти різноманітність і структуру математичного інструментарію, і перемикатися між передбачуваним дизайнерським ефектом і математичною реалізацією, яка його моделює» [13]. Це означає, що сучасні дизайнери повинні знати більше, ніж просто мати базові знання із класичних підходів до дизайнерської практики. Проте у процесі «параметричного дизайну», повинен існувати чіткий і усвідомлений баланс між чисто параметричним маніпулюванням із моделями та використанням широкого розуміння дизайнерських та архітектурних знань [14, 15].

Підвищується рівень контекстуалізації та індивідуалізації проєктів. Параметричний дизайн дозволяє архітекторам створювати об'єкти, які ефективно взаємодіють з контекстом і оточенням. Виникає можливість створювати спеціалізовані та індивідуалізовані рішення для різних проєктів, враховуючи усі аспекти від мікроклімату до культурного середовища. Усе це прослідковується у працях Роберта Айша і Роберта Вудбері [16], Джейн Беррі [17] та інших.

Завдяки застосуванню технологій параметричного дизайну спрощуються процеси проєктування. Дизайнери можуть створювати базові параметри та алгоритми, які визначають форму та структуру об'єктів, і дозволяють їм змінюватися в залежності від різних умов. Це призводить до скорочення часу, необхідного для розробки та адаптації проєктів.

Відбувається процес інтеграції в інші галузі дизайну, такі як промисловий та інтер'єрний дизайн. У виробничих процесах він дозволяє створювати складні форми, оптимізовані для виробництва, що раніше було важко досягти.

З появою нових технологій, таких як 3D-друк та штучний інтелект, параметричний дизайн стає ще більш потужним і ефективним інструментом. Це відкриває нові перспективи для інновацій та його розвитку в майбутньому.

1.2 Ключові технології та інновації, що сприяли розвитку параметричного дизайну

Розвиток параметричного дизайну тісно пов'язаний з прогресом комп'ютерних технологій, інноваціями у виробничій сфері та еволюцією дизайнерських підходів. Розглянемо ключові досягнення та події, які сприяли його розвитку.

Період 1960–1980 років відзначався прагненням полегшити та автоматизувати традиційні методи проєктування завдяки використанню комп'ютерної графіки та CAD-систем. Ці перші кроки виявилися фундаментальними для подальшого розвитку параметричного дизайну [4].

У 1963 році Айвен Сазерленд створив першу комп'ютерну програму, яка започаткувала принцип взаємодії людини з комп'ютером безпосередньо, інтерактивно, а не шляхом введення командних інструкцій (рис. А.1). Sketchpad визначив новий спосіб мислення при взаємодії з комп'ютером у сфері дизайну. Він започаткував еру комп'ютерного візуального мистецтва та комп'ютерного дизайну. Такі системи моделювання дозволили користувачам маніпулювати геометричними об'єктами за допомогою миші та клавіатури, що відкрило шлях для створення складніших систем моделювання. Архітектори та дизайнери почали використовувати комп'ютерні системи, щоб створювати моделі своїх проєктованих об'єктів.

У 1980-1990 роках за рахунок швидкого розвитку комп'ютерних технологій та програмного забезпечення, відбувся суттєвий стрибок у підходах до алгоритмічного проєктування [18]. У 1985 році Parametric Technology Corporation випустила перше комерційно успішне програмне забезпечення параметричного моделювання Pro/ENGINEER (рис. А.2). Приблизно у той самий час з'явилися й інші, популярні сьогодні графічні програмні комплекси AutoCAD, Archicad, SolidWorks тощо, які дозволили суттєво розширити застосування методів параметричного дизайну в архітектурі та автомобільній промисловості (рис. А.3, А.4, А.5).

Параметричне моделювання дозволило дизайнерам досліджувати «різноманітність дизайнів» [19]. Таку можливість забезпечили графічні програмні комплекси як через маніпулювання параметрами, так і через маніпулювання основними зв'язками моделі.

У 1990–2000 роках відбувається розвиток технологій, що дозволяють створювати більш складні та точні параметричні моделі. В 1995 році з'являється програма Rhinoceros, що стає однією з перших платформ для параметричного моделювання (рис. А.6). Її автор Сімін Гаген – канадський архітектор та дизайнер, його розробка в галузі обчислювального дизайну відкрила шлях для розвитку нових інструментів та методів параметричного дизайну. Rhinoceros здатна створювати складні 3D моделі з високою точністю та деталізацією, а завдяки гнучкій системі 3D-моделювання, Rhino надає дизайнерам та архітекторам широкі можливості для втілення своїх ідей у віртуальних просторах.

Однією з найбільш визначальних інновацій у сфері параметричного дизайну став програмний пакет Grasshopper, розроблений у 2003 році Деріком Андерсоном та Робертом Вудбері з Массачусетського технологічного інституту (рис. А.7). Цей пакет ввів новий рівень гнучкості та маневреності процесу дизайну, дозволяючи користувачам створювати складні геометричні форми з використанням змінних параметрів. Grasshopper був розроблений як доповнення до Rhinoceros. Він має інтуїтивно-зрозумілий графічний інтерфейс, що дозволяє користувачам створювати алгоритми за допомогою блоків та зв'язків між ними, а візуальне програмування в Grasshopper доступне навіть тим, хто не знайомий з програмуванням.

Починаючи з 2010 року розвиток параметричного дизайну нерозривно пов'язаний з прогресом у технології 3D-друку, що стало справжнім технологічним каталізатором для трансформації та вдосконалення дизайнерського процесу. З розвитком цієї технології виникли нові можливості та підходи, що значно розширили горизонти параметричного дизайну (рис. А.8).

Однак справжнім революційним аспектом стала можливість індивідуалізації та персоналізації завдяки 3D-друку. Параметричний дизайн дозволяє визначити параметри об'єкта для створення унікальних продуктів, а технологія 3D-друку забезпечує їхню швидку та високоякісну реалізацію.

З відкриттям нових можливостей оптимізації та легкості виготовлення, параметричний дизайн, у поєднанні з 3D-друком, дозволяє створювати не лише естетично привабливі, але й функціонально оптимізовані структури. Також важливою стала можливість використання технології для прототипування та тестування, що робить процес дизайну більш ефективним.

Локалізоване виробництво та можливість швидкого виготовлення прототипів стали реальними завдяки 3D-друку, дозволяючи дизайнерам адаптувати параметричні рішення до конкретних умов та потреб. Це стає актуальним у контексті швидкоплинного світу виробництва та дизайну.

Розвиток матеріалознавства в контексті 3D-друку визначає нові горизонти для створення технологічних та естетично привабливих виробів. Інновації у цій області зумовили винайдення матеріалів з необхідними функціональними властивостями [20]. Діапазон матеріалів для 3D-друку дозволяє створювати об'єкти дизайну максимально адаптованими до різних вимог сучасної індустрії, зокрема і екологічних.

Функціональні властивості матеріалів також зазнали значного вдосконалення. Використання термо-, фоточутливих, та п'єзоелектричних матеріалів дає можливість створювати об'єкти, які реагують на зовнішні впливи. Це дозволяє створювати «розумні» об'єкти та інтерактивні дизайни [21].

У сучасному параметричному дизайні назрівають революційні зміни завдяки використанню штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) [22]. Ці технології відкривають нові можливості та спонукають нас переосмислювати підходи до створення дизайну об'єктів.

ШІ та МН дозволяють автоматизувати певні етапи проектування, раціоналізуючи вибір параметрів та оптимізацію форми. Алгоритми можуть

аналізувати величезний обсяг даних та швидко генерувати варіанти, враховуючи задані критерії та обмеження.

Штучний інтелект може взаємодіяти з дизайнером, пропонуючи нові ідеї та альтернативи, а машинне навчання дозволяє аналізувати стилі та створювати унікальні дизайнерські рішення, враховуючи історію та тенденції сучасності [23].

Машинне навчання спрощує процес проектування, дозволяючи дизайнерам експериментувати та здійснювати ітерації над проектами, завдяки чому можливе створення персоналізованих дизайнів, що враховують індивідуальні вподобання та потреби користувачів.

Ще одним визначальним кроком в контексті дизайну, стало поєднання штучного інтелекту та технологій Інтернету речей (IoT). Такий підхід створив нові можливості для інноваційного підходу до проектування об'єктів середовища. З одного боку, ШІ дозволяє оптимізувати параметри дизайну, а з іншого боку IoT інтегрує ці параметри у фізичні об'єкти, надаючи їм здатність адаптуватися до змін у навколишньому середовищі та взаємодіяти з користувачами в реальному часі. Ця синергія дозволяє дизайнерам створювати інтерактивні та інтелектуальні об'єкти, що відповідають сучасним вимогам та найвищим стандартам якості.

1.3 Вплив параметричного проектування на сучасну архітектуру та дизайн

Параметричний дизайн, як інноваційний підхід до творчого проектування, має вирішальний вплив на обличчя сучасної архітектури та дизайну. Із зростанням доступності та потужності обчислювальних технологій, архітектори та дизайнери отримали можливість втілювати свої ідеї в життя за допомогою алгоритмів та математичних моделей. Цей підхід дозволяє не лише реалізувати традиційні концепції, але й переосмислювати їх, забезпечуючи нові рівні експресивності та функціональності.

Терміни «параметричний, алгоритмічний дизайн», «цифрове проєктування» у більшості людей викликають асоціації із чимось неживим, штучним, надто математизованим, таким, що суперечить людській природі та уявленням про творчість і мистецтво. Однак, дані відчуття швидко розвіюються, якщо хоча б один раз побачити роботи дизайнерів, які у своїх творах використовували параметризм. Інколи навіть важко повірити, що природні, живі, наче дихаючі будівлі та споруди, інтер'єри, меблі або ювелірні прикраси створені дизайнерами за допомогою використання сучасних комп'ютерних технологій. Саме за ефективним поєднанням геометричної науки та мистецтва і ховається «параметричний дизайн».

Розглянемо приклади параметричного дизайну в архітектурі та дизайні, які служать свідченням його революційного впливу на сучасну творчість та формування оточуючого нас середовища.

Заха Хадід, визнана геніальною архітекторкою та дизайнеркою, використовувала параметричний дизайн для створення надзвичайно вражаючих архітектурних творінь, які відрізняються не лише своєю архітектурною витонченістю, але й інноваційністю у використанні форм та матеріалів. Нижче представлені деякі із її ключових робіт, які відображають застосування технологій до параметричного дизайну.

1. Dongdaemun Design Plaza, Сеул, Південна Корея (рис. А.9). Заха Хадід втілила свою візію майбутнього в цьому комплексі, використовуючи витончені форми та складні структури. Параметричний дизайн дозволив створити динамічні криві, які забезпечили унікальну естетичну привабливість.

2. Heydar Aliyev Centre, Баку, Азербайджан (рис. А.10). Це вражаюча будівля, що служить культурним центром, відзначається параметричним дизайном в екстремально витонченій формі, яка дозволила створити простір без колон та без штучних розділень.

3. MAXXI, Національний музей сучасного мистецтва та архітектури, Рим, Італія. Цей музей представляє собою справжню симфонію параметричного

дизайну, де складні криві та об'єми формують внутрішні та зовнішні простори, створюючи унікальне середовище для експозицій.

5. Wangjing SOHO, Пекін, Китай (рис. А.11). Величезні та граціозні вежі комплексу Wangjing SOHO вражають не лише своєю висотою, але й формою, яку Заха Хадід досягла завдяки параметричному дизайну.

6. Serpentine Sackler Gallery, Лондон, Велика Британія (рис. А.12). Заха Хадід використала параметричний дизайн для створення граціозного розширення галереї, яке інтегрується з природним оточенням та визначає нові стандарти у гармонійному поєднанні архітектури та природи.

Усі ці приклади свідчать про те, що використання технологій параметричного дизайну спонукають переосмислювати наше уявлення про форму, простір та інновації в дизайні архітектурного середовища.

Frank Gehry відомий своєю експериментальною архітектурою, Gehry використовує параметричний дизайн для створення сучасних та інноваційних будівель, включаючи Walt Disney Concert Hall у Лос-Анджелесі (рис. А.13).

Роботи Fumihiko Maki, такі як Tokyo Metropolitan Gymnasium, демонструють вміння використовувати параметричний дизайн для створення естетично витончених інтер'єрів та екстер'єрів (рис. А.14).

Greg Lynn – визнаний лідер в цифровому дизайні, Лінн використовує параметричний дизайн для створення архітектурних форм, таких як Blobwall (рис. А.15) та інші.

Patrick Schumacher, архітектор і партнер Захи Хадід, Schumacher вивчав параметричний дизайн та інтегрував його в багато проектів, таких як Galaxy SOHO в Пекіні, Morpheus Hotel у місті Макау в Китаї (рис. А.16).

Ben van Berkel (UNStudio), відомий своїми інноваційними проектами, такими як Erasmus Bridge у Роттердамі, де параметричний дизайн використовується для створення складних структур (рис. А.17).

Hani Rashid (Asymptote Architecture). Роботи, такі як Hani Rashid's HydraPier у Нідерландах, відзначаються високотехнологічним та параметричним підходом до архітектурного дизайну (рис. А.18).

Marc Fornes (THEVERYMANY) відомий своїми легкими елементами та структурами, створеними за допомогою параметричного дизайну, такими як "Pleated Inflation" (рис. А.19) та "NonLin/Lin Pavilion" (рис. А.20).

У сфері проектування об'єктів середовища, таких як меблі, бесідки та альтанки, декілька дизайнерів вирізняються своїм інноваційним підходом та використанням технологій параметричного дизайну для створення унікальних елементів. Ось декілька прикладів:

– Ross Lovegrove відомий своєю органічною та ергономічною меблевою та об'єктною естетикою, Lovegrove використовує параметричний дизайн для створення інноваційних меблів та предметів середовища (рис. А.21).

– Philippe Starck – визнаний французький дизайнер, Starck використовує параметричний підхід для створення сучасних та стильних меблів, включаючи лавки та об'єкти для облаштування просторів (рис. А.22).

– Karim Rashid – дизайнер інтер'єрів та об'єктів, Karim Rashid впроваджує параметричний дизайн для створення високотехнологічних і сучасних меблів та декоративних предметів (рис. А.23).

– Greg Lynn власник студії FORM, поєднує синтез архітектури, дизайну та науки. Грег Лінн використовує параметричний дизайн для створення нестандартних форм у своїх меблевих та архітектурних проектах (рис. А.24).

– Benjamin Hubert (Layer Design) – дизайнер та засновник студії Layer, використовує параметричний дизайн для розробки інтелектуальних та естетично привабливих меблів, а також об'єктів для середовища (рис. А.25).

Ці дизайнери стали відомими завдяки своєму вмінню використовувати параметричний підхід для створення оригінальних та функціональних об'єктів середовища, що відображають сучасні тенденції та інновації в дизайні.

Висновки до розділу 1

У розділі 1 розглянуто історію виникнення та етапи розвитку параметричного дизайну. Огляд літературних джерел засвідчив, що цей напрям проектування почав свій шлях у 1960-70-х роках з розвитку комп'ютерної

графіки та CAD-технологій. З тих часів він зазнав значних змін і впливу на різні галузі дизайну та архітектури.

Досліджено ключові технології та інновації, які стали каталізаторами для розвитку параметричного дизайну. Розвиток комп'ютерної техніки, програмного забезпечення, технології 3D-друку та революційні зміни у сферах штучного інтелекту та машинного навчання сприяли створенню інструментів та можливостей для творчого застосування параметрики в дизайні.

Проаналізовано вплив параметричного дизайну на сучасну архітектуру та дизайн. Відзначено, що параметричне проєктування має значний вплив на сучасну архітектуру та дизайн. Це ілюструється численними прикладами використання параметрики в створенні інноваційних будівель, меблів, творів мистецтва та інших об'єктів. Розвиток параметричного дизайну допомагає не лише оптимізувати процес створення об'єктів, але й забезпечує новий рівень креативності та індивідуалізації у світі дизайну та архітектури. Він перетворює традиційні концепції, дозволяючи забути про обмеження та експериментувати з новими формами та структурами. Параметрика стала важливим фактором у створенні зручного та екологічно сталого середовища, де кожен об'єкт може бути оптимізований для максимального функціоналу при мінімальному використанні ресурсів.

Таким чином, розділ 1 надає розуміння історії та сучасних тенденцій розвитку параметричного дизайну, підкреслюючи його вагоме значення у сучасному світі дизайну та архітектури.

Параметричний дизайн визначається як інноваційний напрямок проєктування об'єктів середовища, здатний змінювати підходи до творчого процесу та створювати унікальні та функціональні об'єкти з урахуванням сучасних технологічних досягнень.

2 ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ТА ВОКСЕЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ

2.1 Основи математичного поняття «параметризація». Класифікація методів параметричного моделювання

Процес проектування чи конструювання об'єктів будь-якої галузі, як правило, є ітераційним і припускає перебір декількох можливих варіантів. Відтак спрощення і автоматизація побудови моделі майбутнього виробу є одним із найважливіших завдань розвитку сучасних технологій. Одним із достатньо поширених методів вирішення цієї проблеми, як зазначалося вище, є параметричне проектування (чи просто параметризація), засноване на моделюванні деталей і виробів із використанням параметрів елементів моделі та співвідношень між ними. Параметризація дозволяє оперативно перебрати за допомогою зміни параметрів або геометричних взаємозв'язків різні конструктивні схеми та вибрати оптимальні рішення й уникнути принципових помилок.

Термін «параметр» є ключовим терміном у такому підході до проектування. Використання понять «параметр, параметричний, параметризація», у такому сенсі, засноване на математичному терміні «параметр», який може бути визначений як – змінна, для якої діапазон можливих значень – ідентифікує набір окремих рішень задачі.

Будь-яке рівняння у математиці, виражене в параметрах, є параметричним рівнянням. Взагалі, відомі декілька способів задання функції. Параметрично заданою називається функція вигляду $y = f(x)$, якщо її аргумент x і сама функція зв'язані між собою через деякий параметр t , із заданою областю визначення, через дві явно представлені функції:

$$x = f_1(t), \quad y = f_2(t). \quad (2.1)$$

Складність такого взаємозв'язку полягає у тому, що одному значенню аргумента може відповідати декілька значень функції, але це є і позитивом,

оскільки форма параметрично заданих функцій є набагато складнішою ніж явно представлених об'єктів (рис. А.26).

Параметричні рівняння, зазвичай, використовуються для знаходження координат точок, що визначають геометричні об'єкти, наприклад, такі як крива лінія або криволінійна поверхня, і у цьому випадку рівняння в сукупності називаються параметричним представленням або параметризацією даних об'єктів. Можна помітити, що значна кількість рівнянь такого роду заснована саме на процесі визначення криволінійних форми ліній, поверхонь і областей під цими геометричними об'єктами. Використовуючи параметричні рівняння, математики, у різних програмних системах, будують множини криволінійних геометричних форм, кардинально різних за геометрією, управляючи тільки одним параметром t .

Тому, згідно роботи [24], **параметризм** – це автоматизована поезія або система самореферентності, у якій усі елементи взаємозв'язані, а зовнішній вплив на один елемент змінює і всі інші. Все це відкриває невичерпні можливості для автоматизованого проєктування або конструювання об'єктів у різних галузях практичного виробництва: машинобудуванні, будівництві, архітектурі і, звісно, у дизайні.

Ключовою дією параметричного представлення будь-якого об'єкту є його параметризація. Параметризація має на увазі використання різних видів взаємозв'язків між компонентами об'єкту для оптимізації кінцевого продукту, що їх використовує. Використання вищезгаданих підходів параметричного проєктування дозволяє, при необхідності, легко змінювати форму моделі об'єкту, внаслідок чого будь-який користувач має можливість швидко і ефективно отримувати альтернативні конструкції або переглянути концепцію виробу в цілому.

За відсутності засобів забезпечення параметричного конструювання модель визначена однозначно тільки своєю геометрією, тому внесення навіть незначних змін вимагає значних трудових витрат. Зміни ж параметричної моделі

виконуються настільки легко та просто, що будь-який, навіть недосвідчений конструктор, може отримувати найефективніші результати.

Параметризація це концепція, яка охоплює усі методи для вирішення завдань конструювання. Важливою особливістю сучасної концепції параметричного конструювання є, перш за все, можливість створення геометричної моделі з використанням зв'язків і правил, які можуть перевизначатись і доповнюватись на будь-якому етапі її створення.

Параметричне проектування суттєво відрізняється від звичайного двовимірного креслення або тривимірного моделювання. При параметричному проектуванні створюється по суті математична модель об'єктів із параметрами, при зміні яких відбуваються зміни конфігурації та розмірів об'єктів, їх взаємного розташування в проєкті і т.і.

На практиці застосовується досить багато різних методів параметризації і, на сьогодні, немає однозначно найефективнішого методу із визначеного переліку. Нижче наведені найчастіше вживані на практиці методи.

1. Таблична параметризація

Таблична параметризація полягає в створенні таблиці параметрів типових деталей проєкту (рис. А.27). Створення нового екземпляра об'єкту виконується шляхом вибору із таблиці певної множини змінних параметрів, наприклад типорозмірів. Можливості табличної параметризації дуже обмежені, оскільки задання довільних нових значень параметрів і їх геометричних взаємозв'язків є на завжди можливим у практичних застосунках.

Проте таблична параметризація знаходить широке застосування в усіх параметричних системах проектування, оскільки дозволяє істотно спростити та прискорити створення бібліотек стандартних і типових деталей, а також їх використання в процесі конструкторського проектування.

2. Ієрархічна параметризація

Ієрархічна параметризація (параметризація на основі історії проєкту) полягає у тому, що в ході побудови моделі уся послідовність дій відображається в окремому вікні у вигляді «дерева побудови» (рис. А.28). Система запам'ятовує

не лише порядок його формування, але і ієрархію окремих елементів (взаємозв'язків між елементами).

Параметризація на основі історії проєкту є стандартизованою практично для усіх систем автоматизованого проєктування, що використовують тривимірне твердотіле параметричне моделювання. Зазвичай такий тип параметричного моделювання поєднується із варіаційною або геометричною параметризацією.

3. Варіаційна (розмірна) параметризація

Варіаційна, або розмірна, параметризація заснована на побудові моделей об'єктів із накладанням на об'єкти різних параметричних зв'язків, і накладанні користувачем обмежень у вигляді системи рівнянь, що визначають залежності між окремими параметрами (рис. А.29).

Варіаційна параметризація дозволяє легко змінювати форму початкового варіанту проєкту або величину параметрів окремих операцій, що дозволяє зручно модифікувати тривимірну модель проєкту.

Частковим випадком розмірної параметризації є так звана «евристична» параметризація, коли послідовно створюється ескіз проєкту, на який поступово накладаються розміри, а спеціальними операціями зміщення отримують геометричну модель. Потім виконується редагування значень розмірів і проводиться операція «евристична параметризація», у результаті якої відбувається автоматична зміна геометричної форми об'єкту проєктування.

4. Геометрична параметризація

Геометричною параметризацією називається параметричне моделювання, під час якого геометрія кожного параметричного об'єкту перебудовується залежно від положення і форми ключових об'єктів, його параметрів і змінних.

Параметрична модель у випадку геометричної параметризації складається з «дерева конструювання» і елементів проєкту (рис. А.30).

Елементи побудови (конструктивні або допоміжні лінії) задають параметричні зв'язки. До елементів представлення моделі відносяться лінії зображення (якими наводяться проєктні лінії), а також допоміжні елементи оформлення (розміри, штрихування, колористика тощо). Одні елементи

представлення моделі можуть залежати від інших елементів побудови проєктованого об'єкту.

Геометрична параметризація забезпечує можливість більш гнучкого редагування моделі. У разі потреби внесення змін в геометрію моделі, необов'язково видаляти непотрібні лінії побудови (це може привести до втрати асоціативних взаємозв'язків між елементами моделі), можна провести нові лінії побудови і прив'язати їх до моделі.

5. Асоціативна параметризація

Асоціативне проєктування (Associative Design) – це узагальнююча назва технології параметричного конструювання, що забезпечує єдиний, у тому числі і двосторонній, інформаційний взаємозв'язок між геометричною моделлю, розрахунковими елементами, програмами для виготовлення виробу та базою даних проєкту.

Використання технології асоціативного конструювання дозволяє, при необхідності, змінювати форму моделі і отримувати автоматично перебудовані креслення або траєкторії руху інструменту для обробки на верстатах з ЧПУ.

Частковим випадком асоціативного конструювання є технологія асоціативної геометрії, що іноді іменується як «спрямована асоціативність» (idirected associativity).

«Спрямована асоціативність» – це технологія асоціативного проєктування, яка базується на безпосередніх взаємозв'язках між об'єктами. Простий приклад – визначення паралельності двох плоских криволінійних об'єктів у проєкті. Можна визначити об'єкти *A* і *B* як паралельні так, що відкриються можливості змінювати положення будь-якого з цих елементів, задовольняючи умовам так званої «м'якої асоціативності». Головною перевагою використання асоціативної геометрії є швидкість. Недоліком є те, що користувач повинен повністю визначити розміри, форму і орієнтацію елемента, перш ніж приступити до створення наступного об'єкту.

6. Об'єктно-орієнтована параметризація

Об'єктно-орієнтоване моделювання (Feature-Based Modeling) засноване на тому, що конструктивні елементи геометрії є об'єктами із зумовленою поведінкою і структурою даних. Це один із підходів асоціативного конструювання, за допомогою якого визначається поведінка геометричної форми під час подальших її змінах.

Такий підхід реалізується на основі певного набору правил і атрибутів, що задаються при виконанні базової операції, на додаток до вже сформованих зв'язків та асоціативної геометрії (рис. А.31). Базові операції є ефективним інструментом для створення геометричної моделі конструкції, інженерного або дизайнерського аналізу, а також виготовлення. Об'єктно-орієнтоване моделювання надає користувачу макрофункції, раніше визначені як послідовність дій, які використовують булеві (логічні) операції.

Вже існуючі типи відомих конструктивних елементів можуть бути використані для створення нових типів шляхом наслідування усіх властивостей початкових об'єктів і додавання до них нових атрибутів та поведінки. Обов'язковим компонентом об'єктно-орієнтованого конструювання є механізми створення конструктивного елемента і його оновлення шляхом зміни даних для кожного елемента. Запуск механізму оновлення при зміні даних автоматично ініціює операцію його створення, а оскільки ці механізми наслідуються усіма конструктивними елементами від базового типу, то забезпечується сумісність структур даних для усього набору елементів. Конструктивні елементи включені в загальний цикл оновлення, таким чином, будь-яка зміна даних призводить до автоматичного оновлення моделі відповідно до правил побудови і даних для кожного елемента.

Кожен із підходів до параметричного проектування має свої особливості, що визначають вибір методу параметричного створення об'ємної моделі. Незважаючи на це, можна однозначно перерахувати основні етапи параметризації, загальні для практично усіх варіантів параметричного моделювання:

- аналіз конструкції деталей проєкту;
- формування базового представника групи елементів проєкту;
- побудова початкових контурів для створення об'ємної моделі;
- нанесення розмірів;
- перетворення розмірів у параметричні функції;
- побудова об'ємної моделі за допомогою виконання спеціальних операцій над контурами;
- написання алгоритму розрахунку параметричних розмірів з використанням початкових даних;
- підключення таблиці значень параметричних розмірів до параметричної моделі, запис i -го параметричного фрагмента.

2.2 Воксельне представлення параметричних моделей

Термін «воксель» утворено від поєднання слів «volume» (об'єм) і «pixel» (піксель), вказуючи на тривимірний аналог двовимірного пікселя.

Воксельна модель – це представлення об'єкта у тривимірному просторі за допомогою вокселів (рис. А.32). Кожен воксель представляє собою об'ємну частину об'єкта і зберігає інформацію про його властивості в цьому конкретному об'ємі. Отже, воксельна модель визначається трьома основними характеристиками: розташуванням в просторі, розміром та властивостями, таким чином це, у певному сенсі, інформаційна модель проєктованого об'єкта.

В порівнянні з іншими типами представлення об'єктів, такими як полігони чи набори точок, воксельні моделі здатні точно представляти об'єм та форму об'єктів, що робить їх особливо ефективними для параметричного дизайну. Вони надають можливість детального відображення об'ємних характеристик, що є критичним у тих випадках, коли важлива точність та керованість дизайну.

Моделювання вокселями та полігонами представляють два основних підходи до тривимірного моделювання, кожен з яких має свої сфери використання.

Моделювання полігонами – це класичний підхід, що використовує геометричні об'єкти, такі як трикутники та чотирикутники, для створення поверхонь об'єктів (рис. А.33). Цей метод дозволяє отримати деталізовані та реалістичні моделі з унікальною текстурою та освітленням. Однак він може бути трудомістким у випадку об'єктів зі складною геометрією, такою як природні форми або рельєфні (пористі) матеріали.

Однією з основних переваг моделювання полігонами є його ефективність у відображенні складних деталей та натуральності форм. В даний час він є стандартом у великій кількості галузей, включаючи відеоігри та фільмову індустрію.

Моделювання вокселями ґрунтується на використанні тривимірних елементах об'ємів (рис. А.34). Структура вокселя визначається його розмірами та властивостями. Він має три виміри: висоту, ширину та глибину. Розміри визначають і його роздільну здатність, тобто рівень деталізації зображення або моделі. Властивості вокселя формують його зовнішній вигляд і поведінку, зокрема:

- колір (визначає його зовнішній вигляд);
- прозорість (визначає, наскільки він пропускає світло);
- текстура (визначає його поверхню);
- відбиття (показує, наскільки він відбиває світло);
- густина (визначає, наскільки він твердий).

Воксельні зображення створюються шляхом рендерингу вокселів відповідно до їхніх властивостей. Для цього використовується алгоритм рендерингу, який визначає, як їхній колір і прозорість впливають на фінальне зображення. Воксельні моделі створюються шляхом об'єднання вокселів у тривимірну решітку. Розмір решітки визначає рівень деталізації об'єкта.

Воксельні моделі можуть бути статичними або динамічними. Статичні моделі не змінюються з часом, а динамічні – можуть змінювати свою форму, розмір або положення.

Завдяки своїм унікальним можливостям, воксельне представлення об'єктів широко використовується в сучасних комп'ютерних графічних технологіях, знаходячи застосування у різних сферах. Розглянемо їх детальніше.

Відеоігри. Воксельна графіка здобула популярність у відеоіграх, починаючи з 1980-х років. Castle Wolfenstein (1981) та Outcast (1999) вважаються одними з перших ігор, де використано цю технологію. Переваги воксельної графіки включають реалістичність, високу деталізацію та продуктивність (рис. А.35). Останнім часом вона отримує додаткові можливості завдяки розвитку VR, що дозволяє створювати складні та деталізовані моделі для використання у віртуальному просторі.

Навчальні та наукові дослідження. Воксельна графіка використовується в наукових дослідженнях для моделювання об'єктів і процесів, наприклад, в кліматичних системах. Це дозволяє вченим детально вивчати різні явища та процеси.

Мистецтво та дизайн. Воксельна технологія знаходить застосування в сучасному мистецтві та дизайні. Художники та дизайнери використовують її для створення тривимірних скульптур, моделювання інтер'єрів та екстер'єрів, а також для створення персонажів для ігор і мультфільмів.

Архітектура. Воксельна технологія в архітектурі представляє інструмент для створення та аналізу архітектурних форм, враховуючи їх просторові та функціональні аспекти. Крім того, дозволяє аналізувати різноманітні характеристики будівель та їх взаємодію з оточенням. Архітектори можуть вивчати освітлення, вентиляцію та інші елементи дизайну, враховуючи тривимірний характер об'єктів. Це сприяє створенню більш ефективних та функціональних просторів.

Індустріальний дизайн. Використання воксельних моделей в індустріальному дизайні є важливою технологічною інновацією, яка трансформує підхід до створення та оптимізації промислових об'єктів. Цей метод не тільки дозволяє здійснювати високоточне моделювання, але і прискорює процеси прототипування та виробництва.

Однією з ключових переваг воксельного підходу в індустріальному дизайні є можливість високої деталізації моделей. Дизайнери можуть докладно представляти геометричні та функціональні характеристики продуктів, включаючи тонкі деталі та з'єднання, що істотно полегшує процес розробки та покращення дизайну.

Додатково, воксельні моделі відкривають можливості для проведення віртуальних тестів та симуляцій, що сприяє розумінню поведінки виробу в різних умовах. Це дозволяє виявляти потенційні проблеми та удосконалювати концепції ще на ранніх етапах розробки.

Крім того, воксельний дизайн полегшує процес створення прототипів та моделей, дозволяючи створювати деталізовані тривимірні об'єкти, які можна виводити на 3D-принтер. Це забезпечує швидкий і точний спосіб перевірки концепції та можливості внесення необхідних коректив.

Загалом, воксельне моделювання в індустріальному дизайні виступає як потужний інструмент, який покращує якість та швидкість розробки продуктів, забезпечуючи дизайнерам високий рівень контролю та творчих можливостей в процесі створення інноваційних та конкурентоздатних виробів.

Усі ці застосування воксельного підходу вказують на його великий потенціал у різних галузях та перспективи подальшого розвитку.

Отже, розглядаючи дизайн-проектування крізь призму воксельної технології, відкривається новий вимір можливостей та творчих перспектив. Вокселі визначають нові стандарти в параметричному дизайні, де кожна одиниця об'єму несе в собі потенціал необмежених форм та варіацій.

Така парадигма у підході до моделювання розкриває не лише естетичні грані дизайну, але й переосмислює способи взаємодії з концепцією проекту. Воксельна технологія стає містком між традиційними формами та високотехнологічними інструментами, дозволяючи досліджувати нові ідеї та трансформувати їх у реальність.

У світі параметричного дизайну вокселі виявляються важливим каталізатором для творчих винаходів і дизайнерських інновацій. Ця технологія

не просто розширює межі проектування, але й перетворює його на науково-творчий експеримент, де об'єм та форма виходять за рамки традиційних обмежень.

Водночас воксельний підхід не лише формує вражаюче сприйняття простору, але й впливає на способи взаємодії з оточуючим середовищем. Він адаптується до потреб і викликів сучасного світу, втілюючи в собі не лише естетичні цінності, але й функціональні рішення для забезпечення якісного життєвого простору.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 розглянуті ключові аспекти, пов'язані з математичним поняттям «параметризація» та класифікацією методів параметричного моделювання. Виявлено, що параметричний дизайн визначається як інноваційний напрямок у проектуванні об'єктів середовища, заснований на використанні параметрів для опису форм та характеристик моделей.

У контексті параметрики варто відзначити, що такий підхід дозволяє забезпечити гнучкість та легкість в управлінні параметрами об'єктів середовища, спрощуючи тим самим процес проектування та адаптації до різноманітних вимог.

Виконано порівняння полігонального та воксельного представлення об'єктів. Виявлено, що воксельні моделі мають ряд суттєвих переваг, основні з яких полягають у наступному:

- дозволяють більш деталізовано відтворювати форму, оскільки представляють собою об'ємні елементи;
- дозволяють більш ефективно представляти об'єкти зі складною геометрією завдяки своїй здатності точно відтворювати внутрішні об'єми та деталі;
- здатні ефективно взаємодіяти з тривимірними об'єктами та просторовою інформацією, що робить їх особливо зручними при відображенні та взаємодії у віртуальних середовищах.

Показано, що воксельне представлення параметричних моделей стає додатковою альтернативою у сфері дискретно-параметричного дизайну. Воксельні моделі дозволяють значно полегшити процес моделювання та оптимізації об'єктів, а також відкривають нові можливості для створення деталізованих моделей та їх інтерактивної взаємодії.

Таким чином, в результаті проведених у розділі 2 досліджень можна констатувати, що параметризація є потужним інструментом для досягнення гнучкості та ефективності у дизайні об'єктів середовища, а воксельне представлення відкриває нові горизонти для тривимірної візуалізації, надаючи більше можливостей у процесі моделювання та взаємодії з об'єктами.

3 ДИСКРЕТНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ ДИЗАЙН

3.1 Воксельне представлення моделей об'єктів як основа дискретно-параметричного дизайну

На сьогодні в технологіях моделювання реальних об'єктів, параметричний підхід виявляється надзвичайно ефективним для створення геометричних образів різної розмірності із складною і нерегулярною структурою. Найбільш наочними прикладами таких об'єктів є моделювання поверхонь ландшафту з їх характерними висотами та нерівностями, створення параметричних моделей рослинного покриття для архітектурних проєктів, які ефективно імітують природні форми, розробка параметричних схем транспортних маршрутів міст, що враховують різноманітні фактори, такі як густина населення та забудову, моделювання параметричних варіацій рельєфності матеріалів та шорсткості поверхонь дизайнерських виробів для оптимізації їх характеристик. Застосування методів, алгоритмів та базових форм класичної геометрії для адекватного представлення моделей згаданих об'єктів є трудомістким, а у багатьох випадках їх просто неможливо реалізувати.

Геометричні характеристики модельованих об'єктів лежать в основі розв'язання більшості практичних задач. Якщо такі характеристики обчислюються та аналізуються на основі двовимірних, зокрема ескізних зображень реальних об'єктів, то вони мають, як правило, дискретно-піксельну структуру. Для узагальнення потрібної інформації про об'єкти і використання її для вирішення прикладних завдань необхідно мати методику та алгоритми обчислення основних характеристик об'єктів: параметрів їх форми, геометричну структуру, склад об'єктів та інші характеристики. На основі аналізу знайдених характеристик узагальнюються висновки про типи та геометрію об'єктів, з метою визначення напрямів удосконалення його технічних та технологічних властивостей [25]. При цьому зрозуміло, що основу аналізу складають саме геометричні характеристики або цілісного зображення, або його окремих фрагментів [26]. Найчастіше вимірюваними параметрами фрагменту зображення

зокрема і у піксельному представленні [27, 28] можуть бути: ідентифікація типу об'єкту, його топологічна або фрактальна розмірність, лінійні розміри, периметр, площа, параметри форми (опуклість, концентричність, компактність, округлість), статичні моменти замкнутих областей та інші геометричні характеристики.

Однак, сучасні технології та засоби візуалізації усе більше удосконалюються, інколи потребують наявності зображення моделей у просторах, що перевищують розмірність 2, і тому вимагають нових, а іноді і радикальних рішень. Таким чином, в практичних застосунках актуальним стає завдання пошуку і розробки альтернативних методів візуалізації для вирішення спеціалізованих задач моделювання.

Альтернативою представлення об'єктів є певний об'єм, у якому вся сцена є набором вокселей – елементарних об'ємів. Вони є свого роду аналогами пікселів у двовимірній графіці. Кожен воксель зазвичай має форму куба. Головним недоліком такого представлення образів із різною топологічною або фрактальною розмірністю є їх фізичний розмір. Наприклад, об'єм із середньою роздільною здатністю 256^3 вимагає зберігання близько 16 мільйонів вокселей. Щоб згенерувати зображення тривимірного об'єкту на екрані, вони усі повинні бути оброблені відповідним чином.

Проте об'єм має і ряд важливих переваг: він може надати інформацію про геометричні характеристики внутрішніх елементів моделі, а не тільки зовнішнього шару (оболонки). Окрім цього, воксельні моделі дозволяють візуалізувати високо деталізовані об'єкти без використання додаткових програмних ресурсів, а кожен воксель – нести інформацію про тип матеріалу, щільність, пружність та інші характеристики, зокрема і механічні.

Для таких моделей можна розробити алгоритм управління їх геометрією, а можливість візуалізації об'єктів абсолютно різної природи і легкість їх динамічних перетворень роблять воксельне представлення вигідною альтернативою «поверхневих моделей» у багатьох практичних задачах. Ще одна перевага воксельних моделей полягає в одноманітності обчислювального

процесу для просторів будь-якої розмірності. Насправді, $2=2^1$, $4=2^2$, $8=2^3$ і так далі, де 2 – основа двійкової системи числення, що використовується в обчислювальних машинах, а показник степеня – розмірність простору чи об'єкту моделювання.

У роботах [25, 26] були розглянуті алгоритми знаходження різних геометричних характеристик множин пікселів у двовимірному просторі. Ці алгоритми передбачали сегментацію бінарних зображень конкретних об'єктів за рядом геометричних ознак, можливість топологічної ідентифікації кожної характерної області, аналіз інтенсивності впливу обчислюваних параметрів на покращення функціональної якості моделей, і на їх основі, – побудову рекомендацій щодо оптимізації технічних і технологічних характеристик фізичних об'єктів, що розглядаються. Однак усі вони стосуються тільки двовимірного (піксельного) представлення об'єктів різної розмірності, та їх аналізу стосовно впливу геометричних характеристик на удосконалення досліджуваних об'єктів.

Робота [29] присвячена розробці функціонально-воксельного методу, який базується на застосуванні диференціалів. Його розрахункові конструкції орієнтовані на моделювання алгебраїчних функцій та не пов'язані з вирішенням задач ідентифікації геометричних образів.

Підходи на основі воксельного представлення моделей широко використовуються для інтерпретації даних представлених множинами точок [30], зокрема під час вирішення задач тривимірної картографії, реконструкції, виявлення та розпізнавання 3D-об'єктів, підготовки моделей для 3D-друку [31], в медичних дослідженнях [32] тощо.

Однак, у вище перерахованих роботах відсутній комплексний аналіз геометричних характеристик досліджуваних об'єктів та їх вплив на шляхи удосконалення моделей для різних практичних застосунків.

Порівняно з іншими способами представлення геометричних моделей, зокрема полігональними сітками, вокселі мають регулярну та просту структуру,

завдяки якій можна сформувати ефективний математичний апарат для обробки, аналізу та управління воксельними моделями 3D-даних.

Тому, дослідження геометричних характеристик воксельно представлених моделей, визначення та формалізація взаємовідносин між їх елементами для вирішення задач геометричного моделювання та ідентифікації воксельно представлених образів є актуальним і потребує подальшого розвитку.

Тривимірний варіант представлення моделей у вигляді вокселів, розміщених у певних об'ємах передбачає, що замість окремих квадратиків (пікселів) для зображення сцен використовуються кубики, положення яких задається трьома цілочисельними координатами (x, y, z) . Нерідко, у практичних завданнях, наприклад аналізі ландшафтних даних, координата z використовується як номер певного зрізу на зображеннях.

Моделлю дискретного зображення тривимірного простору, заданого множиною вокселів, можуть бути кубічні решітки, які утворюються точками перетину трьох взаємно перпендикулярних сімейств паралельних прямих із відстанню між ними, рівною масштабній одиниці – *unit*. У якості одиниці може вибиратися величина, рівна, наприклад, розміру пікселя проекції воксельного зображення геометричного об'єкту на одній із координатних площин.

Назвемо об'єктом функцію f , визначену на множині регулярно розташованих точок (вокселів), яка набуває значень 0 або 1. Кожному вокселю ставиться у відповідність значення 0, якщо воксель не належить досліджуваному або модельованому матеріальному об'єкту, або 1 – якщо належить. Простим прикладом створення воксельної моделі є відображення тривимірного зображення, наприклад, фрагменту дизайнерської інтерпретації деревоподібної структури за допомогою множини просторових кривих у тривимірному просторі.

Якщо при неперервному представленні геометричних образів розмірності 1, 2 та 3 у тривимірному просторі немає особливих проблем із зв'язністю множин точок, оскільки існує аналітичне їх подання (наприклад, у параметричному

вигляді), то у дискретних моделях тих же образів на воксельній решітці питання зв'язності потребує додаткових визначень.

За аналогією формування растрових бінарних решіток на площині, у воксельних дискретних моделях слід визначитися із структурою сусідства окремих незайнятих і зайнятих елементів шестигранної ґратки.

Нехай в певному об'ємі задано W і U – дві множини: кубічні дискретні елементи точки (зайняті вокселі) об'єкту і порожні елементи ґратки. Кожен елемент (воксель) i, j, k зображення має сусідів, які визначаються відповідно до схеми (рис. А.36, а).

Множину усіх сусідів (G, P, B) елементу i, j, k будемо називати 26-сусідами. Сусіди зі спільними гранями (G) (рис. А.36, б) – назвемо прямими сусідами, їх максимальна кількість – 6. Сусіди зі спільними ребрами (P) (рис. А.36, в), максимальна кількість – 12 та спільними вершинами (B) (рис. А.36, г), максимальна кількість – 8, назвемо непрямыми сусідами. У загальному випадку, під поняттям сусідства будемо розуміти об'єднання всіх 26 сусідів одного зайнятого вокселя.

Одним із найважливіших параметрів дискретного кубічного представлення точок геометричного образу у тривимірному просторі є відстань між вокселями. Відстань між двома вокселями – це довжина найкоротшого відрізка, що сполучає центри двох сусідніх елементів. В шестигранних просторових ґратках дві точки є прямими сусідами, якщо відстань між ними дорівнює $unit$. Дві точки називаються непрямыми сусідами, якщо відстань між ними рівна $\sqrt{2} \cdot unit$ – за 12-сусідством і $\sqrt{3} \cdot unit$ – за 8-сусідством.

Із структурою сусідства дискретних точок просторової моделі об'єкта тісно пов'язане поняття зв'язності. Множина точок на кубічній ґратці вважається зв'язною, якщо кожна із точок множини (зайнятий воксель) має хоча б один із варіантів сусідства. Дві і більше множин точок у заданому об'ємі називаються розділеними, якщо їх об'єднання не є зв'язним.

Використовуючи поняття зв'язності окремих дискретних елементів моделі об'єкту, наведемо визначення дискретно представленої фігури у воксельній інтерпретації. Дискретною фігурою називається «максимально зв'язна» множина зайнятих вокселей на просторовій ґратці. Термін «максимально зв'язна» буде означати, що дискретна фігура не міститься ні в якій іншій зв'язній множині окремих точок вокселей, що не співпадають із цією фігурою. Таких «максимально зв'язних» множин в об'ємній просторовій моделі може бути декілька. Цим і будемо ідентифікувати наявність різної кількості геометричних фігур на заданому тривимірному зображенні.

Окремий зайнятий воксель є дискретною моделлю точки, він не має сусідів, не належить жодній із зв'язних множин і тому вважатимемо його 0-вимірним елементом простору. Відповідно, нескінченну множину таких дискретних елементів у заданому об'ємі будемо називати фрактальною множиною точок (вокселей) із розмірністю більше 0, і менше 1 (рис. А.37, а).

Дискретна воксельна модель одновимірного образу (прямої чи кривої лінії) у просторовому об'ємі з тривимірною ґраткою представляється зв'язною множиною кубиків із розмірами масштабу елемента ґратки (вокселя). При цьому ширина образу визначається виходячи із структури сусідства окремих його елементів. Це означає, що для кожної дискретно представленої точки (чорного вокселя) лінії серед усіх 26 сусідніх вокселей мають бути, як мінімум, ще один, а як максимум чотири зайняті вокселі як із прямим, так і непрямым сусідством. У випадку наявності одного або ж двох сусідів (із яких обов'язковим є непрямий сусід) – точка дискретної моделі лінії є кінцевою (граничною) (рис. А.37, б). У випадку, коли чорний воксель має від 2 до 4 чорних сусідів – вона є внутрішньою точкою дискретно представленої незамкнутої кривої лінії. Такий тип зв'язності, де враховується пряме та непряме сусідство вокселей назвемо змішаним або комбінованим типом зв'язності.

Для дискретної воксельної моделі одновимірного образу важливими геометричними характеристиками є: топологічна (фрактальна) розмірність, степінь криволінійності (прямолінійності) та довжина визначених ділянок.

Топологічна розмірність визначається за граничними (кінцевими) точками дискретної моделі. Границями моделі (рис. А.37, б) є 0-вимірні точки (вокселі), тобто – об'єкт є одновимірним.

Відповідно запропонованому комбінованому представленню одновимірних образів модель може включати множини вокселів із трьома типами сусідства, а саме: N_G – вокселі із прямими сусідами (сусідство – грань), N_P – вокселі із непрямыми сусідами (сусідство – ребро вокселя), N_B – вокселі із непрямыми сусідами (сусідство – вершина ґратки). При наявності для сусідніх вокселів одночасно декількох зв'язків, для визначення довжини моделі – вибирається короткий (діагональний) шлях (рис. А.38).

Довжина воксельної моделі одновимірного образу визначається за формулою:

$$L_{A-C} = unit(N_G + \sqrt{2}N_P + \sqrt{3}N_B),$$

де L_{A-C} – довжина моделі («скелету»); N_G – кількість зв'язків по гранях вокселів моделі одновимірного образу; N_P – кількість зв'язків по ребрах вокселів моделі; N_B – кількість зв'язків по вершинах вокселів моделі; $unit$ – масштабний параметр елементів дискретної просторової ґратки.

Степінь криволінійності (прямолінійності) дискретної воксельної моделі одновимірного образу – $W_{кр}$ визначається через відношення обчисленого параметра довжини «скелетним» методом до відстані між граничними точками даного об'єкту:

$$W_{кр} = \frac{L_{A-C}}{L_{GO}},$$

де L_{GO} – відстані між граничними точками об'єкту.

У замкнутої, воксельно представленій, просторової лінії на об'ємних просторових ґратках не існує кінцевих точок, тому у її дискретній воксельній моделі кожна точка повинна мати від 2 до 4 чорних сусідів.

Запропоновані визначення у багатьох випадках дозволяють легко виділити на зображенні граничні та внутрішні точки (чорні вокселі) і об'єднати їх у лінію.

Це надає можливість алгоритмічного визначення границь одновимірного образу на просторовому зображенні.

При наявності у воксельній моделі одновимірного образу, за комбінованим типом зв'язності, більше 4 чорних сусідів для одного елементу ґратки, таке утворення може ідентифікуватися як місце перетину декількох воксельних моделей кривих чи прямих (А), або як ущільнення (потовщення) одновимірних образів на певних ділянках (рис. А.39).

Для таких типів моделей (рис. А.39), окрім вже означених для дискретних одновимірних образів геометричних характеристик, можна визначити площу зовнішньої поверхні ущільнення (А) або у ряді випадків – об'єм ущільнення. Ці геометричні характеристики можуть стати базовими для розрахунку, наприклад, центру ваги або статичних моментів даного утворення. Границею таких утворень є вокселі (В) (рис. А.39), які за комбінованим типом зв'язності мають більше 4 сусідів.

Дискретні моделі двовимірних образів будемо ідентифікувати відповідно визначень класичної геометрії: будь-яку поверхню можна представити сіткою одновимірних образів, тобто лінійним каркасом. Звідси, якщо дискретна воксельна модель містить в усіх своїх перерізах (рівнях) у двох напрямках тільки воксельні моделі одновимірних образів, з характеристиками сусідства, наведеними вище стосовно ліній, такий воксельно представлений об'єкт є дискретною моделлю двовимірного образу (рис. А.40). У разі наявності іншої структури сусідства чорних і білих вокселів для будь-якої лінії каркасу об'єкта, він може бути охарактеризований як дискретна модель двовимірного образу із локальними включеннями або ущільненнями.

Для, дискретно представлених вокселями, двовимірних образів характерною геометричною характеристикою є площа S_{en} відсіку поверхні. Пропонується площу відсіку поверхні визначати через геометричні характеристики сімейства дискретних моделей ліній каркасу в одному із напрямків:

$$S_{en} = n \times k \times (unit)^2,$$

де k – число видимих граней n -ої смуги лінії каркасу дискретної моделі поверхні; n – число смуг сімейства лінійного каркасу, що покривають відсік дискретної моделі поверхні в одному із напрямків; $unit$ – масштабний параметр сторони елемента дискретної просторової ґратки.

Дискретні воксельні моделі тіл, тобто тривимірні об'єкти, ідентифікуються через сімейство двовимірних замкнутих образів. Кожна дискретна модель окремої смуги об'єкту представляє собою множину із внутрішніми і граничними вокселями (рис. А.41). Всі внутрішні елементи просторової ґратки кожної смуги мають по вісім сусідів за комбінованим типом зв'язності. Граничні вокселі смуги сформовані відповідно до геометричних властивостей дискретних моделей одновимірних образів, де кожний із елементів має від 2 до 4 сусідів.

Дискретні моделі окремих перерізів тривимірного об'єкту, можуть містити в середині і не зайняті елементи просторової ґратки. Тоді воксельна модель тривимірного об'єкту ідентифікується як тіло із отворами, кількість яких суттєво впливає на його фрактальну розмірність.

Однією із основних геометричних характеристик дискретної моделі тривимірного об'єкту, при розв'язанні практичних задач, є його об'єм. Об'єм моделі легко визначити через загальну кількість зайнятих (чорних) вокселів із визначеними масштабними параметрами елементів ґратки:

$$V_s = n \times unit^3,$$

де n – число чорних вокселів моделі тривимірного образу.

Однак на практиці визначити повну кількість чорних вокселів в моделі без спеціальних геометричних операцій неможливо. Тому, пропонується визначити об'єм моделі тривимірного дискретно представленого об'єкта через сімейство двовимірних образів, тобто геометричні параметри його окремих смуг. Якщо S_{cm} представити у вигляді:

$$S_{cm} = k \times unit^2,$$

тоді об'єм смуги обчислюється за формулою:

$$V_{cm} = S_{cm} \times unit = k \times unit^3,$$

а загальний об'єм дискретної моделі тіла визначається з виразу:

$$V_3 = m \times k \times unit^3,$$

де k – число чорних вокселей n -ої смуги перерізу тривимірного дискретно представленого образу; n – число сімейства смуг двовимірних дискретних перерізів, що покривають задане тіло в напрямку однієї з осей.

Ще однією важливою геометричною характеристикою воксельних моделей тривимірних образів, при реалізації практичних задач, є площа їх зовнішньої поверхні S_{3II} . Її можна визначити через геометричні характеристики сімейства дискретних моделей замкнутих граничних ліній каркасу в одному із напрямків, тобто параметри одновимірних образів:

$$S_{3II} = n \times k \times (unit)^2,$$

де k – число видимих граней n -ої смуги замкнутої лінії каркасу дискретної моделі тривимірного образу; n – число сімейства смуг лінійного каркасу, що покривають дискретну воксельну модель тіла в одному із напрямків.

3.2 Дискретно-воксельне параметричне проєктування об'єктів середовища

Явище параметрики бере початок із математики, геометрії, фізики та інших математично спрямованих наук. Параметричний вираз – це один із методів представлення неперервних або дискретних функцій через множину параметрів [33, 34]. Параметри можуть бути декількох типів: внутрішні (довжини, кути), декартові (координати відносно системи координат), ситуативні (відстань, кут між двома елементами) та інші. Обмеження на параметричне представлення – це параметри, які не слід змінювати. Тому, використовуючи методи параметричного проєктування, можна легко виокремлювати необхідні параметри як окремих елементів, так і цілого проєкту. Надання різних значень потрібним параметрам, відкриває можливості ефективного генерування множини різних конфігурацій. Математичні рівняння, при цьому, використовуються для опису залежностей між елементами у параметричній

моделі. Зв'язуючи інформацію про параметри моделі у потрібному руслі, дизайнер може за порівняно короткий час генерувати множину пропозицій щодо формування як індивідуальної естетики проєкту, так і його конструктивних особливостей.

Така формалізація процесу проєктування і використання обчислень відкривають для дизайнера чи архітектора нескінченний діапазон породжуючих алгоритмів, що дозволяють легко створювати нові середовища із спеціальною системою кодування і в той же час, проявляти, такий актуальний для проєктувальників, творчий підхід.

Отже, «параметричний дизайн» дозволяє:

- керувати складністю дизайну виробу, узгоджувати його із вимогами виробництва та матеріалознавства;
- суттєво удосконалити якість комп'ютерного проєктування об'єктів дизайну;
- ефективно впроваджувати елементи штучного інтелекту у творчий процес дизайну.

Однак, маючи ряд суттєвих переваг перед використанням тільки традиційних способів розробки дизайн-пропозицій, класичному «параметричному дизайну» властиві і ряд недоліків:

- розробка параметричних моделей проєкту вимагає від дизайнера спеціальних математичних знань та навичок створення неперервно заданих кривих ліній та поверхонь;
- у класичному «параметричному дизайні» відсутня єдина методологія із ефективного створення геометричних варіацій дизайнерських форм просторових образів проєктного задуму;
- параметричні моделі вимагають більше часу для оновлення, коли потрібно вносити несподівані та принципові зміни до конструктивної частини дизайнерського проєкту;

– каркасне представлення елементів виробу, велике розмаїття та вишуканість кожної із вигнутих його ліній нерідко є або технологічно не здійсненим задумом, або виготовлення таких елементів є надто затратним.

Ряд із вище перерахованих недоліків пропонується усунути шляхом розробки нової методики проєктування, яку можна класифікувати як самостійне відгалуження класичного «параметричного дизайну» та ідентифікувати як дискретно-воксельний параметричний дизайн.

В основу такого підходу покладено, з одного боку, використання дискретного параметричного моделювання геометричних образів різної розмірності за допомогою візуально зрозумілої для дизайнера техніки завантаження вузлів базового об'єкту відповідними формоутворюючими зусиллями, а з іншого – автоматизований перехід та представлення множини розроблених геометричних форм у воксельному вигляді.

Дослідження в такому напрямку є актуальними як із наукової, так і прикладної точки зору, а отримані результати у вигляді ефективної комп'ютерно-реалізованої технології розробки варіацій дизайн-проєктів суттєво розширяють можливості класичного «параметричного дизайну».

Якщо ж говорити про нове, пропоноване у даній роботі, відгалуження «параметричного дизайну», а саме дискретно-воксельний параметричний дизайн, то слід зазначити, що найближчим теоретичним та алгоритмічним підґрунтям даного підходу стали отримані у роботах [35, 36, 37] результати досліджень методів дискретного моделювання геометричних об'єктів різної розмірності за допомогою математичного апарату числових послідовностей.

Таким чином, розробляючи основи дискретно-воксельного параметричного дизайну, як принципово нового відгалуження від сучасного стилю «параметричного дизайну» потрібно запропонувати:

- підходи, які б дозволили позбутися основних недоліків у проєктованих об'єктах, створених за допомогою класичної параметрики;
- ефективні математичні алгоритми дискретного формування елементів каркасу візуальних форм, інтуїтивно зрозумілих для розробника;

– адаптацію чи розробку технологічних можливостей виготовлення проєктованих об'єктів з врахуванням та забезпеченням економічної ефективності проєкту.

Як зазначалося вище, термін параметричний походить із математики (параметричне представлення рівнянь) і пов'язаний із використанням певних параметрів або змінних, які можна редагувати для управління, наприклад, геометричними характеристиками одного об'єкту, чи для зміни результуючих властивостей всього проєкту.

Оскільки в дизайні ідея пошуку форми полягає у тому, щоб реалізувати певну мету, з врахуванням набору обмежень, то для дизайнера потрібна системна і одночасно зрозуміла та ефективна методика ціленаправленого впливу на множину характерних параметрів для досягнення потрібного результату.

Сучасна техніка параметричного проєктування дозволяє створювати ітераційний цикл розробки дизайн-проєкту. Наприклад, у процесі проєктування дизайнер може вивчати властивості матеріалу об'єктів, можливі обмеження на технологічні процеси їх виготовлення. Отримані дані та вироблені концепції переносяться в параметричну модель, у якій відображаються відповідні дизайн-рішення. У ході розробки проєктні гіпотези уточнюються та оптимізуються.

Такий процес використання параметричного інструментарію дозволяє підійти до матеріалу і виробництва не лише як до інструменту втілення ідеї, але і як до джерела натхнення, створення внутрішніх глибоких зв'язків між матеріальними, естетичними і функціональними характеристиками.

Однак, як правило, дизайнер це творча особистість, яка мислить образами. Складні математичні рівняння та системи рівнянь, що описують дані образи важко інтерпретуються в його свідомості як зрозумілий інструмент формоутворення об'єктів, тим більше із визначеними функціональними властивостями. Тут необхідно мати більш образно зрозумілий інструментарій, який дозволяв би системно і просто керувати естетичними властивостями об'єктів дизайну, ціленаправлено змінюючи параметри всієї системи.

У якості такого інструменту пропонується використати методи дискретного моделювання геометричних об'єктів апаратом числових послідовностей, де основним формоутворюючим фактором є множина векторів зовнішнього формоутворюючого навантаження, прикладеного до вузлів моделі [38, 39]. Координатні складові формоутворюючого навантаження у багатьох випадках дають можливість прогнозувати динаміку зміни геометрії моделі в процесі пошуку, враховувати естетичні та креативні властивості дизайну моделі, виражати метричні та диференціальні характеристики формованого образу через параметри складових навантаження, керувати функцією навантаження на вузли моделі у процесі можливих ітерацій для знаходження результуючого шуканого образу (рис. А.42).

Розглянемо це на прикладі проектування каркасу певного об'єкту та пошуку оптимальної форми як окремих його елементів, так і всієї множини дискретно представлених замкнутих кривих каркасу. Процес дискретного моделювання таких об'єктів проходить по окремим координатним складовим моделі у параметричному вигляді. Для такої інтерпретації процесу дискретного моделювання графіки координатних складових функції навантаження в розрахованих точках моделі, у сукупності, з одного боку забезпечують виконання метричних вимог, а з іншого боку однозначно характеризують ступінь гладкості конкретної замкнутої кривої на множині дискретних вузлів формованого образу.

Якщо всі функції розподілу координатних складових навантаження є дискретними аналогами неперервних функцій то, відповідно до цього, буде забезпечуватись і гладкість кінцевої моделі формованого образу. За наявності стрибків на хоча б одному із графіків навантаження втрачається гладкість між сформованими вузлами модельованої замкнутої кривої, а при наявності стрибків навантаження у вузлах формованої моделі – з'являться точки розривів. Коефіцієнти у функціях розподілу складових навантаження слугують крім того вільними параметрами для врахування практично необмеженої кількості вихідних параметрів та умов при дискретному моделюванні таких замкнутих

одновимірних образів [40]. Процес дискретного моделювання зрівноважених просторових (плоских) замкнутих кривих апаратом числових послідовностей можна описати, у параметричному вигляді, наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} x_n = (1 - \frac{n}{N})x_0 + \frac{n}{N}x_N + \frac{n}{N} \sum_{v=1}^{N-1} \sum_{s=1}^v kP_s^x - \sum_{v=1}^{n-1} \sum_{s=1}^v kP_s^x, \\ y_n = (1 - \frac{n}{N})y_0 + \frac{n}{N}y_N + \frac{n}{N} \sum_{v=1}^{N-1} \sum_{s=1}^v kP_s^y - \sum_{v=1}^{n-1} \sum_{s=1}^v kP_s^y, \\ z_n = (1 - \frac{n}{N})z_0 + \frac{n}{N}z_N + \frac{n}{N} \sum_{v=1}^{N-1} \sum_{s=1}^v kP_s^z - \sum_{v=1}^{n-1} \sum_{s=1}^v kP_s^z. \end{cases} \quad (3.1)$$

де $x_0, x_N, y_0, y_N, z_0, z_N$ – крайові умови,

N – порядковий номер вузла замикання,

kP_s^x, kP_s^y, kP_s^z – складові функціонально розподіленого навантаження у вузлах моделі.

Систему числових послідовностей (3.1), для спрощення, можна замінити одним рівнянням виду (3.2) із узагальненою координатною складовою u .

$$u_n = (1 - \frac{n}{N})u_0 + \frac{n}{N}u_N + \frac{n}{N} \sum_{v=1}^{N-1} \sum_{s=1}^v (k \times P_s^u f(s)) - \sum_{v=1}^{n-1} \sum_{s=1}^v (k \times P_s^u f(s)) \quad (3.2)$$

Наприклад, система (3.1) буде у тому випадку представляти плоску замкнуту траєкторію, якщо для двох координатних складових знайдеться такий період μ , на якому при фіксованому значенні n одночасно виконуються умови:

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n+\mu} \\ y_n &= y_{n+\mu} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Якщо елементи перших двох числових послідовностей (3.1) представляють собою числові ряди, фіксована множина елементів яких повторюється із певною періодичністю μ , то відповідні числові послідовності називаються періодичними і графічно інтерпретують замкнуті просторові дискретно представлені криві на відповідному проміжку. При цьому для будь-яких n у числових послідовностях (3.1) необхідне виконання умови (3.3) (рис. А.43).

Даний підхід формоутворення замкнутих та незамкнутих кривих, шляхом введення до математичної моделі будь-яких геометричних, естетичних чи функціональних параметрів та вираження їх через візуально прийнятні для

дизайнера вектори зовнішнього навантаження у вузлах образів, дозволяє коригувати степінь згущення сітки вузлів як окремих елементів, так і моделі вцілому (рис. А.44).

Слід зазначити, що при такому дискретному підході до моделювання як плоских, так і просторових замкнутих кривих числовими послідовностями кількість рівнянь в системі (3.1) не пов'язана із кількістю вузлів, необхідних для візуального представлення об'єкту і тому не переобтяжує обчислювальний алгоритм.

Як зазначалося вище, окрім розробки візуально простих але ефективних алгоритмів розробки дизайн пропозицій не останнє місце займають питання технологій реалізації задуму та економічності проєкту.

Практична реалізація ідей дизайнера у вигляді готового виробу можлива лише у випадку, коли буде доступною технологія їх виготовлення. Якщо технологія створення вимагає значних ресурсів, або не можлива, годі й сподіватись на втілення ідеї в життя. Тому, якщо методи проєктування адаптовані до технологічних можливостей виробництва, тоді є можливість отримати ефективний результат.

Успішне виготовлення складних за формою геометричних об'єктів «параметричного дизайну» вимагає розробки і застосування відповідних методів та інструментів. Використання воксельних моделей, які покладені в основу формування та представлення образів дискретно-воксельного параметричного дизайну дозволяє не тільки створювати креативні об'єкти дизайну, але і забезпечує технологію виготовлення тривимірних форм, подібно до складання конструктора.

Алгоритм реалізації дизайнерської ідеї відповідно до вище наведених результатів досліджень можна розділити на окремі етапи, послідовність виконання яких пропонується наступною.

Відповідно до розробленого підходу (рис. А.42), засобами дискретно-воксельного параметричного дизайну в Mathcad будується модель елементів

каркасу проєктованого об'єкту. Елементи каркасу представляються множиною, як правило, плоских кривих із різними геометричними характеристиками.

За допомогою спеціальної методики елементи каркасу збираються в автоматизованому режимі як варіанти цілісних об'єктів, форма яких відповідає задуму дизайнера (рис. А.45).

Далі розробник аналізує множину отриманих візуальних образів і вибирає з них найбільш оптимальне рішення.

Кожен елемент каркасу моделі вибраного образу переводиться у растрове представлення за допомогою спеціалізованої програми формування воксельних моделей MagicaVoxel (рис. А.46, А.47).

На рисунку А.48 наведені приклади об'єктів середовища, змодельовані засобами дискретно-воксельного параметричного дизайну.

Таким чином, використовуючи запропонований підхід до дискретно-параметричного моделювання та розділення алгоритму на етапи, можна більш ефективно та точно реалізувати оригінальні дизайнерські проєкти, а використання на одному із етапів переваг програми MagicaVoxel забезпечує ефективну технологію виготовлення креативних дизайнерських форм. Це пов'язано із тим, що MagicaVoxel дозволяє розкласти уніфіковані за геометрією тривимірні форми на окремі елементи призматичної форми, які є основою для виготовлення об'єкту (рис. А.49).

Висновки до розділу 3

У розділі 3 запропоновано підхід до дискретно-воксельного представлення моделей різноманітних об'єктів та досліджено множину геометричних параметрів, що впливають на характеристики їх функціонування.

На основі базового елемента – вокселя визначені взаємовідношення характеристик сусідства, що є визначальними під час формування моделей образів різної розмірності.

Запропоновано підхід до обчислення параметрів форми та метричних характеристик дискретно-воксельних моделей, а також визначено шляхи

удосконалення функціональних якостей об'єктів за рахунок ефективного управління множиною їх геометричних параметрів.

Проведено критичний аналіз «параметричного дизайну», який дозволив виявити основні його недоліки стосовно проєктування об'єктів дизайну, створених за допомогою класичної параметрики. На основі цього було запропоновано новий підхід до дизайн-проєктування, який надає можливість позбутися виявлених недоліків.

Розроблено ефективні математичні алгоритми дискретного формування елементів каркасу візуальних форм, які є інтуїтивно зрозумілими для дизайнера. Отримані алгоритми дозволяють реалізувати оптимальні підходи до проєктування із врахуванням технологічних можливостей виготовлення об'єктів дизайну та забезпечують економічну ефективність розробленого проєкту.

Як результат, запропоновано принципово новий стиль дизайнерських розробок – дискретно-воксельний параметричний дизайн, який у багатьох випадках буде більш ефективним і позбавленим недоліків, притаманних класичному «параметричному дизайну».

4 ДИЗАЙН-РОЗРОБКА ОБ'ЄКТІВ СЕРЕДОВИЩА

Завдання кваліфікаційної роботи на тему:

Дискретно-параметричний дизайн, як інноваційний напрям проєктування об'єктів середовища

1. Призначення та галузь застосування: розробити інноваційні та естетично привабливі рішення для сучасного середовища. Проєкт спрямований на розробку оригінальних об'єктів, зокрема садових меблів – лавочок та альтанок, за допомогою методів дискретно-параметричного дизайну та використання інноваційних технологій. Головною метою є створення не лише естетично привабливих, але й функціональних об'єктів, що відповідають високим стандартам сучасного дизайну та забезпечують комфорт користувачів у зовнішньому середовищі. Такий підхід впроваджується з урахуванням екологічних принципів, використовуючи екологічно чисті матеріали та враховуючи тенденції розвитку в галузі дизайну та архітектури.

2. Умови для розробки: завдання кваліфікаційної роботи.

3. Мета розробки – на основі проведення дизайн-аналізу аналогів і прототипів розробити стильовий образ садових меблів та альтанки.

4. Джерела – статті, книги, інтернет-джерела, зразки сучасних виробів у стилі параметричного дизайну.

5. Технічні вимоги:

– склад та функціональні вимоги: створення дискретно-параметричних об'єктів середовища таких як садові меблі та альтанка, які включатимуть в себе архітектурні форми, з високим рівнем гнучкості та адаптивності до вимог користувачів;

– умови експлуатації: використання якісних екологічних, зокрема природніх матеріалів, що забезпечують довгий термін служби та стабільність структури виробів;

- конструктивно-технологічне забезпечення: ґрунтується на ефективній системі домовленостей стосовно втілення проєктів та високої якості виконання дизайнерських рішень;
- вимоги до надійності: використання алгоритмів та методів дискретно-параметричного моделювання, які забезпечать міцність та стійкість конструкції, а також застосування якісних матеріалів для забезпечення тривалої експлуатації виробів;
- ергономічні вимоги: врахування принципів ергономіки, які забезпечать комфорт, легкість та зручність використання;
- вимоги естетики: відповідність сучасним дизайнерським тенденціям, естетичним стандартам та законам композиції;
- патентна чистота: дослідження та розробка не претендує на патентування;
- вимоги до категорії якості: дотримання високих стандартів та відповідність найвищим якісним критеріям.

6. Специфічні вимоги: внесення змін у проєкт під час виконання робіт.

7. Характер та стадії розробки: реалізація нової дизайн-розробки ґрунтується на аналізі аналогів та прототипів, включаючи всі етапи проєктного процесу за методикою дискретно-параметричного дизайну. Стадії розробки включають в себе проведення дослідження аналогів та прототипів, формулювання концепції параметризації, створення пошукових ескізів, затвердження остаточного варіанту розробки та виконання проєктних робіт для формування кінцевого образу.

8. Обмеження: за технологічними можливостями виготовлення, термінами виконання, матеріалами та ціною.

9. Композиційні елементи та види робіт, що підлягають розробці:

- пояснювальна документація, яка включає в себе опис програмних інструментів, алгоритмів та методів, що використовуються під час проєктування об'єктів середовища;

– демонстраційно-графічна пропозиція, яка містить рішення параметричних дискретно-воксельних моделей, перспективні зображення дизайну, а також розробку конструктивних елементів, де відображено переваги та варіативність воксельного підходу у дизайні об'єктів середовища.

10. Пропозиції з використання оздоблювальних матеріалів, види і способи застосування:

– для створення конструктивних елементів використано наступні матеріали:

- високоякісна вогнетривка деревина,
- полімерні композити,
- арт-рідини для технік акрилового нанесення.
- **дизайнерські елементи оздоблення:**
 - основа – зі спеціальним захистом від вологи та ультрафіолету;
 - декоративне покриття – ефективна арт-рідина, нанесена за допомогою абстрактних акрилових технік, надає стильний та виразний вигляд;
 - текстурні акценти – застосування полімерних композитів для створення виразних текстур.

11. Документи та художньо-графічні матеріали, що передаються замовнику. Для подальшого можливого втілення проєкту замовнику будуть передані такі матеріали:

- графічне рішення кваліфікаційної роботи та розрахункові матеріали.

13. Порядок контролю та приймання: згідно з вимогами методики проєктування та за домовленістю сторін.

Студент:

Самчук В.П.

Керівник:

Пустюльга С.І.

4.1 Складові частини об'єкта проєктування

Складовими проєкту стали оригінальні об'єкти середовища, зокрема альтанки, фігури для дитячих просторів та дизайнерські арт-об'єкти розроблені з використанням методів дискретно-параметричного дизайну. Кожна модель відзначається інноваційними підходами до формотворення та використанням екологічно чистих матеріалів.

Фігури для дитячих просторів та дизайнерські арт-об'єкти, моделі яких формуються за допомогою дискретно-параметричних методів, відрізняються не лише сучасним та естетичним дизайном, але і високою функціональністю. Під час їх створення є можливість врахувати не лише ергономічні параметри, а й індивідуальні вимоги замовників.

Альтанки, які розробляються за допомогою методів дискретно-параметричного дизайну, виконують функцію не лише захисного простору, але і стають виразом сучасного підходу до створення оригінальних зон відпочинку. Їх структура характеризується нестандартними формами та елементами, а використання екологічно чистих матеріалів сприяє створенню комфортного та естетичного середовища для відпочинку.

4.2 Особливості формотворення об'єкта розробки

Проєктування об'єктів середовища базується на прагненні створити сприятливе, функціональне та естетичне оточення для людей, що цінують природу, естетику та комфорт. Проєктування садових меблів спрямоване на створення зручних місць для відпочинку та взаємодії з навколишнім середовищем. Лавочки та альтанки виступають як елементи, які надають можливість насолоджуватися природою, читати книги, вести спільні бесіди чи просто відпочивати.

Розробка оригінальних об'єктів середовища, зокрема фігури для дитячих просторів та дизайнерські арт-об'єкти, дозволяє втілювати в життя естетичні ідеї та створювати дизайн, який гармонійно вписується в природний ландшафт.

Лавочки та альтанки можуть стати не лише функціональними, але й вишуканими елементами садового оздоблення. Садові меблі створюють простір для соціальної взаємодії та об'єднання родини чи друзів. Вони можуть слугувати місцем для спільного проведення дозвілля, сприяючи формуванню теплої та затишної атмосфери, а використання у проєкті екологічно чистих матеріалів сприяє створенню екологічно збалансованого середовища.

4.2.1 Функціональне призначення розробки

Функціональне призначення розробки, яка включає в себе дискретно-параметричний дизайн садових меблів, фігур для дитячих просторів та дизайнерських арт-об'єктів, зосереджується на створенні не лише естетично привабливих, але й функціональних об'єктів для садового простору. Основною метою є задоволення конкретних потреб та вимог користувачів у створенні комфортних зон для відпочинку, соціальної взаємодії та взаємодії з природним середовищем.

Функціональність об'єктів розробки визначається їхньою спроможністю забезпечувати зручні та практичні умови для користувачів, створюючи при цьому гармонійне поєднання з природним ландшафтом. Це включає в себе здатність меблів забезпечувати зручну опору під час відпочинку, оптимальну ергономіку та адаптацію до різних погодних умов.

Таким чином, функціональне призначення розробки полягає в створенні оригінальних об'єктів, що враховують індивідуальні потреби користувачів і відзначаються високою ефективністю їхнього використання в садовому середовищі.

4.2.2 Композиційні особливості розробки

Композиційні особливості розробки об'єктів середовища, зокрема садових меблів, фігур для дитячих просторів та дизайнерських арт-об'єктів, виступають ключовим елементом в створенні гармонійного та функціонального простору. Кожен елемент, починаючи від альтанок до арт-об'єктів, увібравши в себе

визначені функції, має бути вплетений в композиційну структуру так, щоб вони утворювали єдиний естетичний ансамбль. Розглядаючи пропорції, розташування, лінії та форми, композиція повинна враховувати не лише естетичні аспекти, але й забезпечувати зручність та практичність в експлуатації. Всі ці аспекти композиційного рішення спрямовані на створення привабливого та функціонального оточення, яке гармонійно вписується в садовий ландшафт та задовольняє потреби користувачів.

4.2.3 Образно-стилістичне рішення проєктованого образу

Образно-стилістичне рішення образу об'єктів середовища визначається прагненням до створення неповторної ідентичності та вираження в них естетичної вартості. У процесі проєктування альтанок, фігур для дитячих просторів та дизайнерських арт-об'єктів, враховується стильова концепція, яка включає сучасні тренди, елементи природної гармонії та архітектурну естетику.

Вибір матеріалів, фактура поверхні, кольорова палітра та декоративні елементи спрямовані на створення впізнаваного та привабливого образу. Враховуючи функціональність та естетичність, об'єкти дизайну не лише відповідають потребам користувачів, але і втілюють в собі артистичний вираз, що збагачує садовий простір елегантністю та оригінальністю.

4.3 Матеріали і технологія виготовлення

Вибір матеріалів є ключовим етапом у проєктуванні, забезпечуючи їхню відповідність функціональним вимогам та здатність адаптуватися до змін у природних умовах.

Для виготовлення садових меблів використовуються екологічні матеріали, що поєднують в собі естетику та стійкість до зовнішніх чинників. Важливим елементом є вибір деревини, яка не лише гарно виглядає, але й має високу стійкість до атмосферних впливів. Також використовуються металеві елементи, що забезпечують міцність та стабільність конструкції меблів.

Технологія виготовлення базується на поєднанні ручної роботи та сучасних методів обробки матеріалів. Процес включає в себе ретельний відбір матеріалів, їхню обробку, формування деталей та збірку об'єктів.

Передбачається, що меблі складатимуться з окремих елементів, що надасть їм суттєвий функціональний і естетичний потенціал. Спроектowana конструкція меблів розглядається як щось аналогічне до складання конструктора Lego. Цей підхід відкриває можливість легко розбирати та збирати меблі, щоб модифікувати їх конструкцію згідно із зміненими потребами та естетичними уподобаннями.

Планується використовувати окремі дощечки або інші модульні елементи, які можуть ефективно взаємодіяти один з одним, створюючи гнучкий простір для творчих змін і вдосконалень. Такий підхід сприяє не лише легкості монтажу, але й дозволяє в подальшому легко змінювати конфігурацію меблів, додаючи або замінюючи окремі елементи. Така гнучкість у виборі конструкції дозволяє враховувати зміни у смаках, стилі та функціональних потребах користувачів, а також швидко адаптувати меблі до нових тенденцій та індивідуальних вимог.

Враховуючи високі стандарти якості та естетичні вимоги, матеріали та технології виготовлення сприяють створенню не лише функціональних, але й вишуканих об'єктів середовища, які гармонійно впишуться у природне оточення та задовольнять смакам користувачів.

Застосування запропонованої методики дискретно-параметричного моделювання дизайн-об'єктів продемонстровано на прикладі трьох концептів. Завдяки воксельному представленню проєктованих форм, вони легко поєднуються з технологічними можливостями для їх реалізації: розроблені моделі можна збирати з однотипних дерев'яних елементів, аналогічно до складання конструктора Lego.

Концепт 1. Альтанки та садові меблі (рис. А.50, А.51, А.52).

Концепт 2. Фігури для дитячих просторів. Запропонований підхід дозволяє формувати цікаві та впізнавані образи, наприклад, тварин (рис. А.53, А.54).

Концепт 3. Дизайнерські арт-об'єкти (рис. А.55, А.56).

Переваги такого підходу:

- об'єкти дизайну збираються з уніфікованих дерев'яних елементів, наприклад брусків;
- мінімальні затрати на матеріал для підготовки складових елементів;
- мінімальні затрати часу на збирання форм;
- можливість легкої зміни чи заміни однієї форми іншою, що забезпечує можливість оперативного оновлення локацій;
- ремонтпридатність, що особливо актуально для дитячих та ігрових просторів.

Висновки до розділу 4

У розділі 4 розроблено завдання на проектування об'єктів середовища, виявлено і розглянуто ключові аспекти, що визначають їхню оригінальність, функціональність та технологічність.

Розглянуто складові частини об'єкта проектування. Відзначена можливість збірки меблів з окремих елементів, що надає гнучкості конструкції і можливість модифікації відповідно до змінених умов експлуатації та вподобань користувачів.

Функціональне призначення розробки – забезпечення зручності та естетичності садового простору, підкреслення його індивідуальності та відповідності сучасним тенденціям.

Композиційні особливості розробки відзначаються увагою до взаємодії окремих елементів, створенням гармонійної структури та функціональних зон.

Образно-стилістичне рішення проектного образу було ключовим елементом, де враховуються естетичні аспекти, підкреслюється індивідуальний характер та можливість адаптації до змін у смаках та стилях.

Матеріали і технологія виготовлення передбачають використання екологічно чистих матеріалів та модульних елементів, що дозволяють легко змінювати конструкцію меблів та модернізувати їх з урахуванням нових вимог та тенденцій.

Таким чином, результатом проектування об'єктів середовища, зокрема садових меблів, стали моделі, які поєднали функціональність, естетику та гнучкість у використанні, що створює оригінальні та індивідуальні об'єкти для відпочинку та задоволення користувачів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розкрито сутність дискретно-параметричного дизайну, як інноваційного напрямку проектування об'єктів середовища. Результати дослідження представлено у висновках:

1. Вперше були комплексно розглянуті та проаналізовані історичні аспекти та етапи розвитку параметричного дизайну, що відкриває нові перспективи для глибшого розуміння його еволюції.

2. У контексті класифікації методів параметризації вдосконалено підходи до систематизації, що дозволило надати більш повне та всебічне розуміння різноманітності та сфер застосування параметрики в дизайні. Це важливо для уникнення фрагментації та розривів у розумінні та застосуванні цього підходу в різних галузях дизайну.

3. З позицій параметричного моделювання вперше розглянуто нові аспекти воксельного представлення параметричних моделей. Таким чином, використання воксельної технології у параметричному дизайні не лише встановлює нові стандарти для творчого виявлення можливостей форм та варіацій, але й перетворює сам процес проектування на науково-творчий експеримент, розширюючи горизонти індивідуалізації та адаптації, що є ключовим для створення інноваційних та функціональних об'єктів середовища.

4. Методологія проектування об'єктів середовища отримала вдосконалення завдяки використанню дискретно-воксельного представлення моделей. Це дозволяє досягати нового рівня індивідуалізації та адаптації до потреб користувача, розширюючи можливості створення оригінальних та функціональних середовищ.

5. Суттєвий подальший розвиток отримали алгоритми для проектування параметричних об'єктів середовища. Це розширює можливості творення та вдосконалює процес взаємодії дизайнера з цифровим середовищем, забезпечуючи більш ефективний та творчий підхід до створення інноваційних об'єктів.

6. Отримані знання та розроблені алгоритми застосовані для розробки дизайну об'єктів середовища, зокрема оригінальних садових меблів і альтанок, що спрямовані на поліпшення зручності та комфорту користувачів.

У цілому, отримані результати не лише сприяють науковому розумінню та розвитку дискретно-параметричного дизайну, а й створюють нові можливості для практичного застосування цього напрямку в проектуванні об'єктів середовища.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пустюльга С.І., Самчук В.П., Головачук І.П., Лелик Я.Р., Клак Ю.В. Дискретно-воксельне представлення моделей об'єктів для ідентифікації та розрахунку їх фрактальних параметрів. Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2022. Вип. 103. С. 185-200. DOI: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2022.103.185-200>
2. Пустюльга С.І., Самчук В.П., Пасічник О.С., Чугай Р.В., Градиська Н.Б. Дискретно-воксельний параметричний дизайн. Теорія та практика дизайну: зб. наук. праць. Культура і мистецтво. 2023. Вип. 27. С. 165-174. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2023.27.21>
3. Самчук В., Пустюльга С., Приступа О. Становлення та перспективи розвитку параметричного дизайну. Актуальні проблеми сучасного дизайну: зб матеріалів V Міжн наук.-практ. конф. м. Київ, 27.05.2023 року: у 2 томах. Київ: КНУТД, 2023. Том 1. С. 371-374.
4. Burry, Mark. 1996. "Parametric Design and the Sagrada Família." *Architectural Research Quarterly*, 1 (Summer): 70-80.
5. Oxman R. *Theories of the Digital in Architecture*. U.K.; Routledge, 2014.
6. Portland State Maseeh College of Engineering & Computer Science: Electrical & Computer Engineering | Ivan Sutherland [Electronic resource]. – 2018. – Access mode: <https://www.pdx.edu/ece/sutherland>.
7. Hernandez C. R. B. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi, *Design Studies // Special issue on Digital Design*. 2006. Vol. 27 – P. 309–324.
8. Salim F. Software Openness: Evaluating Parameters of Parametric Modeling Tools to Support Creativity and Multidisciplinary Design Integration // *In Computational Science and Its Applications–ICCSA 2010*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2010. P. 483–497.
9. Karle D. Parametric thinking. // *ACADIA Regional*. 2011. P. 109–113.
10. Gerber, David. 2007. *Parametric practices : Models for design exploration in architecture*. Harvard University.

11. Smith, Rick. 2007. Technical Notes from experiences and studies in using Parametric and BIM architectural software. Notes.
12. Holzer, Dominik, Richard Hough, and Mark Burry. 2007. "Parametric Design and Structural Optimisation for Early Design Exploration." *International Journal of Architectural Computing* 05 (04): 625-644.
13. Woodbury R. *Elements of Parametric Design*. New York : Routledge, 2010.
14. Cardenas C. A. *Modeling Strategies: Parametric Design for Fabrication in Architectural Practice*. Harvard University; Cambridge, 2008.
15. Yu R. Architects' cognitive behavior in parametric design. // *International Journal of Architectural Computing*. 2014. Vol. 13. P. 83–101.
16. Aish, Robert, and Robert Woodbury. 2005. Multi-level Interaction in Parametric Design. In *Lecture Notes in Computer Science*, 151-162. Berlin: Springer.
17. Burry, Jane. 2007. "Mindful Spaces: Computational Geometry and the Conceptual Spaces in which Designers Operate." *International Journal of Architectural Computing*, 5 (4): 611-624.
18. Böhm, Wolfgang, Gerald Farin, and Jürgen Kahmann. 1984. "A Survey of Curve and Surface Methods in CAGD." *Computer Aided Geometric Design* 1 (1): 1-60.
19. Teresko, John. 1993. "Parametric Technology Corp.: Changing the way Products are Designed." *Industry Week*, December
20. J.M. Jafferson, M.C. Sabareesh, B.S. Sidharth. 3D printed fabrics using generative and material Driven design. *Materials Today: Proceedings*. Volume 46. Part 2. 2021. Pages 1319-1327.
21. Beatriz Mena Barreto dos Santos, Guy Littlefair, Sarat Singamneni. From 3D to 4D printing: A review. *Materials Today: Proceedings*. 20 June 2023,
22. Cristina Trocin, Åsne Stige, Patrick Mikalef. Machine Learning (ML) diffusion in the design process: A study of Norwegian design consultancies. *Technological Forecasting and Social Change*. Volume 194. 2023. 122724.
23. R. Verganti, L. Vendraminelli, M. Iansiti. Innovation and design in the age of artificial intelligence. *J. Prod. Innov. Manag.*, 37 (3) (2020), pp. 212-227.

24. Schumacher, Patrik. 2009a. "Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design." *Architectural Design* 79 (4): 14–23.
25. Пустюльга С.І., Самчук В.П., Самостян В.Р., Головачук І.П. Кількісний аналіз нуль-вимірних (точкових) множин методами фрактальної геометрії. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2019. Вип. 96. С. 64-72.
26. Пустюльга С.І., Самчук В.П., Придюк В.М., Самостян В.Р. Дискретне (піксельне) представлення транспортної мережі міста для топологічної ідентифікації та фрактального аналізу її геометричних складових. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. Вип. 1 (16). С. 137-149.
27. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Головачук І.П., Придюк В.М., Оксенюк В.А. Методика ідентифікації зображень п'ятен розпилю палива форсунками. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2018. Вип. 2(11). С. 100-116.
28. Пустюльга С.І., Придюк В.М., Головачук І.П. Метод фрактальної оцінки показника накладання маршрутних схем для оптимізації міських пасажирських перевезень. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. Вип. 1(14). С. 124-135.
29. Толлок А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании. *Физматлит*. 2016. 112 с.
30. Pearse G.D., Watt M.S., Dash J.P., Stone C., Caccamo G. Comparison of models describing forest inventory attributes using standard and voxel-based lidar predictors across a range of pulse densities. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 78 (2019), pp. 341-351.
31. Ghadai S., Jignasu A., Krishnamurthy A.. Direct 3D printing of multi-level voxel models. *Addit. Manuf.*, 40 (2021), Article 101929.
32. Martins D., Rademacher L., Gabay A.S., Taylor R., Richey J.A., Smith D.V., Goerlich K.S., Nawijn L., Cremers H.R., Wilson R., Bhattacharyya S., Paloyelis Y. Mapping social reward and punishment processing in the human brain: a voxel-based meta-analysis of neuroimaging findings using the social incentive delay task. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 122 (2021), pp. 1-17.

33. Lee J. H. Understanding Cognitive Activities in Parametric Design. In *Global Design and Local Materialization*. // Springer : Berlin/Heidelberg, Germany. 2013. P. 38–49.

34. Lee J. H. Creativity and parametric design? Comparing designer's cognitive approaches with assessed levels of creativity. // *Int. J. Des. Creat. Innov.* 2015. Vol. 3. P. 78–94.

35. Пустюльга С.І. Дискретне визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями. Дис. докт. техн. наук. 05.01.01. / Пустюльга Сергій Іванович ; Київ: КНУБА, 2006. – 320с.

36. Пустюльга С.І., Самчук В.П. Згущення точкових каркасів дискретно представлених кривих за рахунок параметрів зовнішнього формоутворюючого навантаження. VIII наук.-практ. конф. в Сімферополі "Геометричне та комп'ютерне моделювання. Прикладна геометрія та інженерна графіка": Зб. наук. пр. - К., 2011. - Вип. 88. – С. 35-41.

37. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Хомич А.А. Формування дискретних моделей зрівноважених замкнутих кривих за заданими вимогами математичним апаратом числових послідовностей. Наукові нотатки ЛНТУ. – Луцьк: ЛНТУ, 2013. - Вип. 41. - С. 144-147.

38. Пустюльга С.І., Самостян В.Р. Дискретне геометричне моделювання зрівноважених замкнутих кривих числовими послідовностями. Прикладна геометрія та інженерна графіка": Зб. наук. пр. - К., 2011. - Вип. 87. – С. 314-319.

39. Пустюльга С.І. Дискретне векторне формування геометричних об'єктів. VIII наук.-практ. конф. в Сімферополі "Геометричне та комп'ютерне моделювання. Прикладна геометрія та інженерна графіка": Зб. наук. пр. - К., 2011. - Вип. 88. – С. 271-278.

40. Пустюльга С.І., Самостян В.Р. Побудова дискретних моделей просторових замкнутих траєкторій із заданими геометричними властивостями. Науковий журнал "Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті" – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. - Вип. 1(8). - С. 123-130.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А



Рисунок А.1 – Іван Сатерланд за роботою в системі Sketchpad

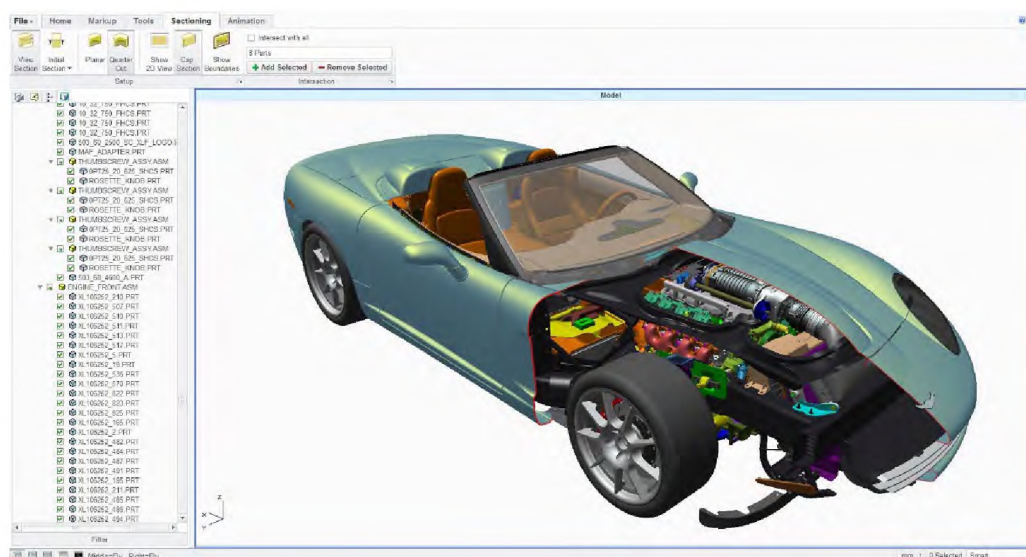


Рисунок А.2 – Проектування дизайну автомобіля в Pro/ENGINEER

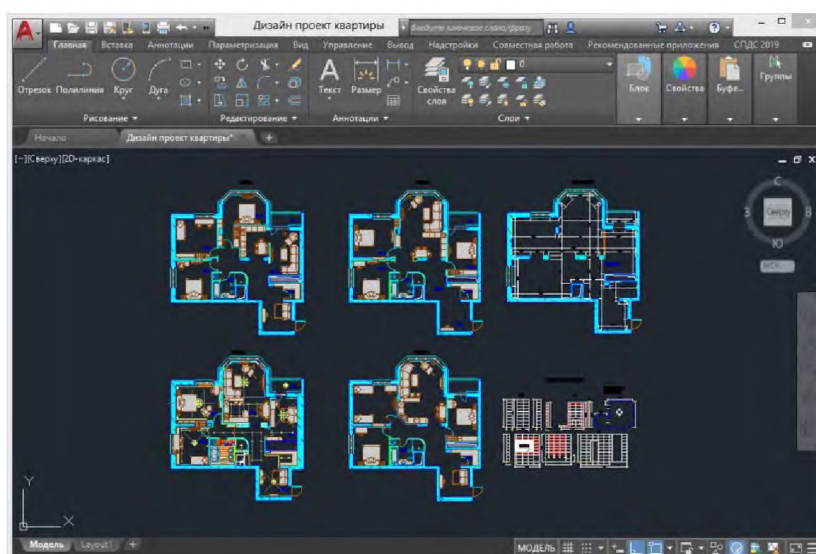


Рисунок А.3 – Розробка дизайну квартири в AutoCAD

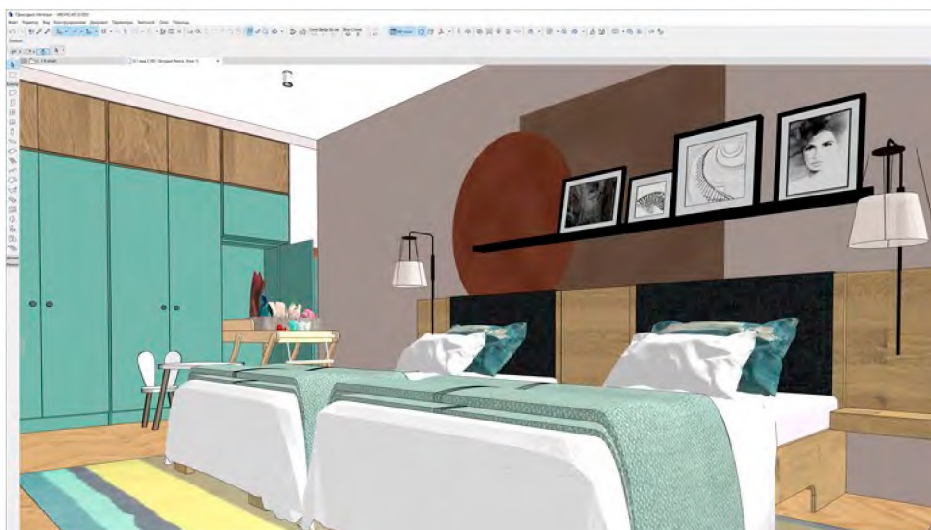


Рисунок А.4 – Проектування інтер'єру в Archicad

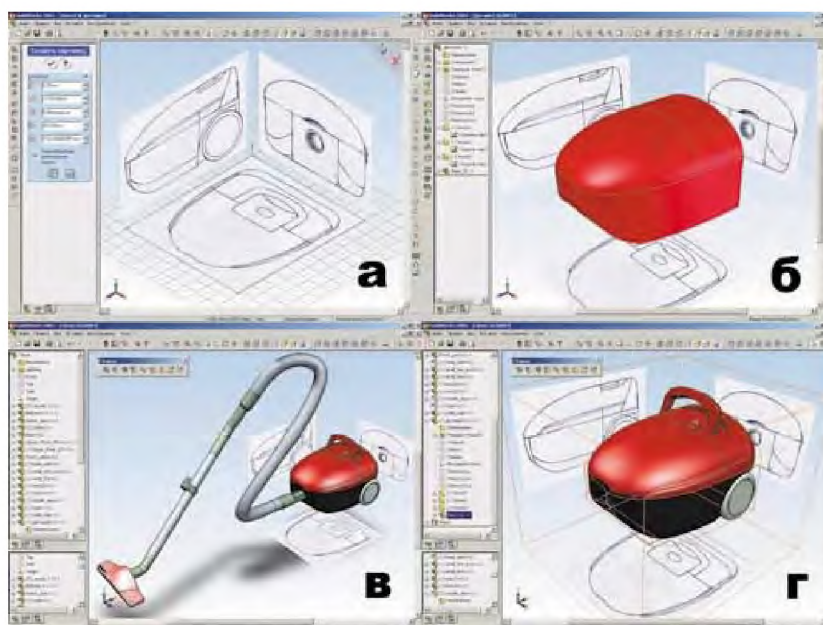


Рисунок А.5 – Від конструкції до проектування форми в SolidWorks

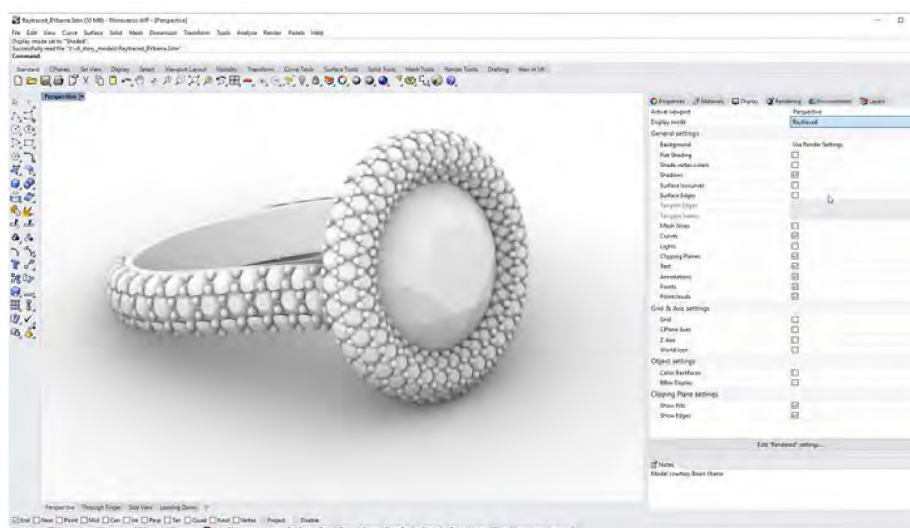


Рисунок А.6 – Розробка дизайну прикраси у Rhino 3D

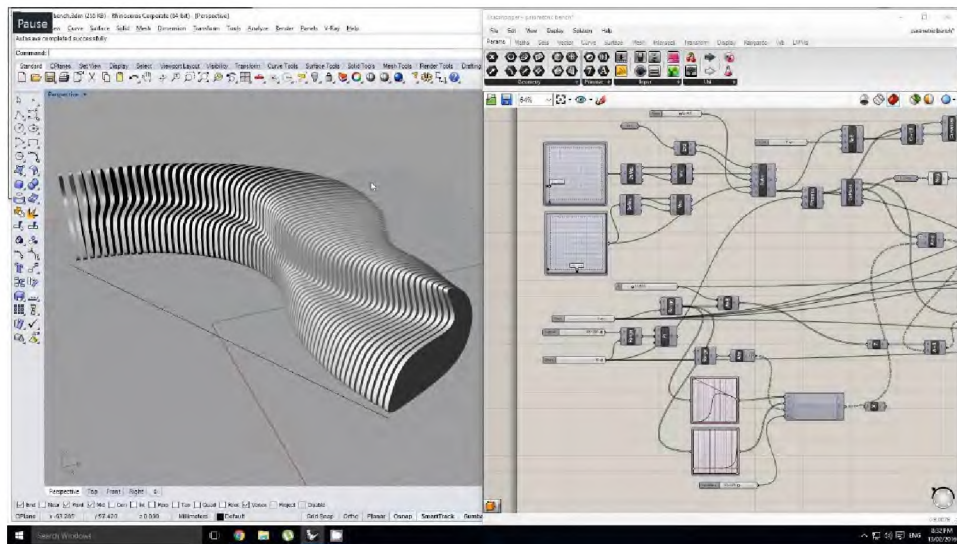


Рисунок А.7 – Параметричне проєктування в Grasshopper



Рисунок А.8 – 3D-друк параметричних об'єктів середовища

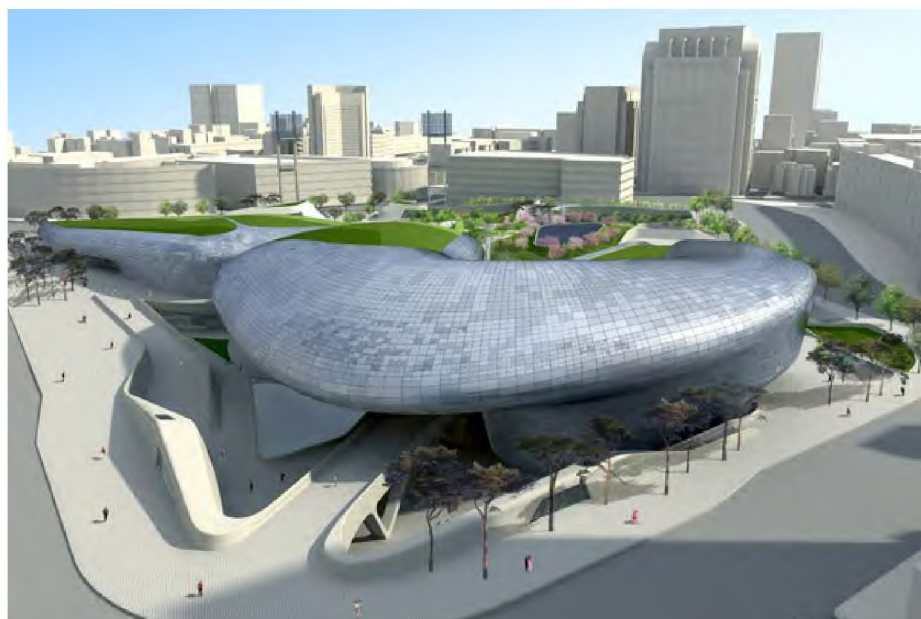


Рисунок А.9 – Dongdaemun Design Plaza, Сеул, Південна Корея (Zaha Hadid)



Рисунок А.10 – Heydar Aliyev Centre, Баку, Азербайджан (Zaha Hadid)



Рисунок А.11 – Wangjing SOHO, Пекин, Китай (Zaha Hadid)

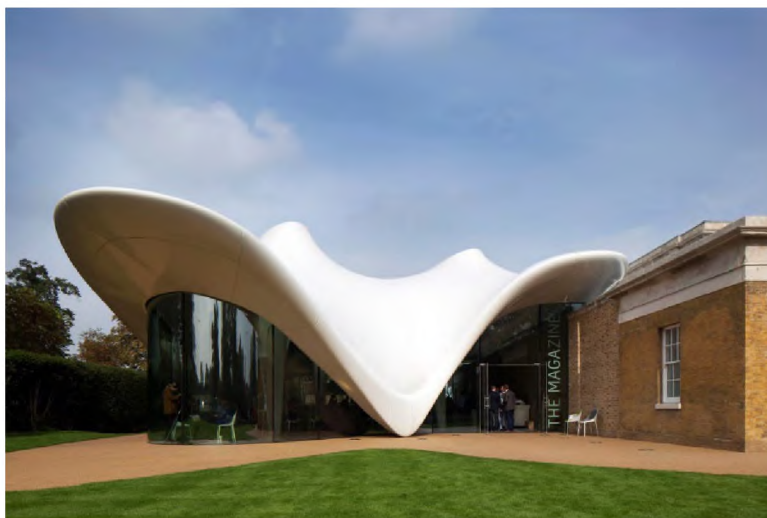


Рисунок А.12 – Serpentine Sackler Gallery, Лондон, Велика Британія (Zaha Hadid)



Рисунок А.13 – Walt Disney Concert Hall у Лос-Анджелесі (Frank Gehry)



Рисунок А.14 – Токуо Metropolitan Gymnasium (Fumihiko Maki)



Рисунок А.15 – Blobwall (Greg Lynn)



Рисунок А.16 – Morpheus Hotel, місто Макау, Китай (Patrick Schumacher)



Рисунок А.17 – Erasmus Bridge у Роттердамі (Ben van Berkel)



Рисунок А.18 – Асимптотична архітектура HydraPier (Hani Rashid)



Рисунок А.19 – Структура «Pleated Inflation» (Marc Fornes)



Рисунок А.20 – Опуклий кораловий павільйон для Louis Vuitton (Marc Fornes)

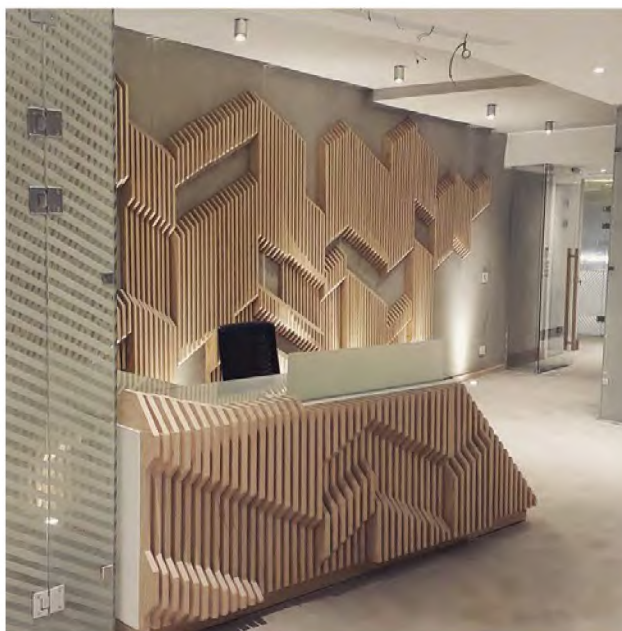


Рисунок А.21 – Інноваційні предмети середовища



Рисунок А.22 – Параметричні об'єкти облаштування просторів



Рисунок А.23 – Високотехнологічні і сучасні елементи інтер'єру



Рисунок А.24 – Нестандартні форми у меблевих композиціях (Greg Lynn)



Рисунок А.25 – Естетично привабливі елементи інтер'єру

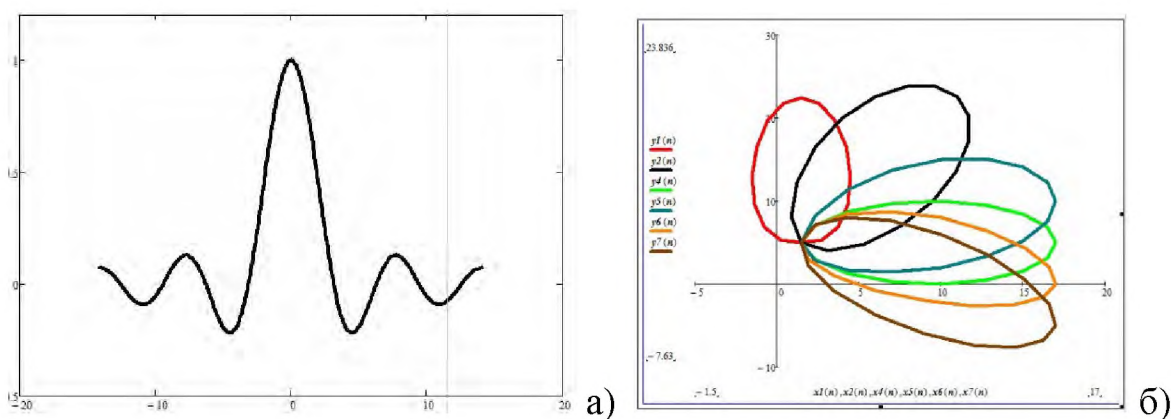
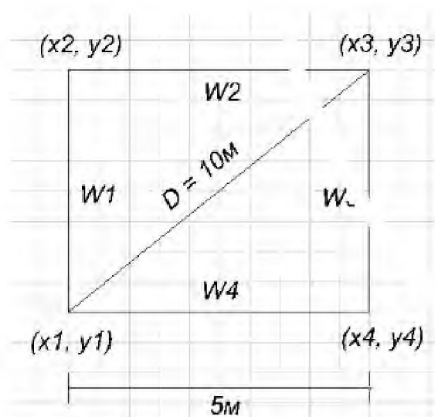


Рисунок А.26 – Графіки функції заданої у явному вигляді (а) і параметрично (б)



Таблична параметризація

Назва	Зв'язки	Опис	Номер	Рівняння
				Умови
W1	Вертикальна		(1)	$x_1 - x_2 = 0$
W3	Вертикальна		(2)	$x_3 - x_4 = 0$
W4	Горизонтальна		(3)	$y_1 - y_4 = 0$
W1	Вертикальний розмір		(4)	$(x_1 - x_4)^2 - 25 = 0$
D	Діагональний розмір		(5)	$(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 - 100 = 0$
W1 и W2	Перпендикулярність		(6)	$(x_1 - x_2) * (x_2 - x_3) + (y_1 - y_2) * (y_2 - y_3) = 0$

Рисунок А.27 – Приклад табличної параметризації

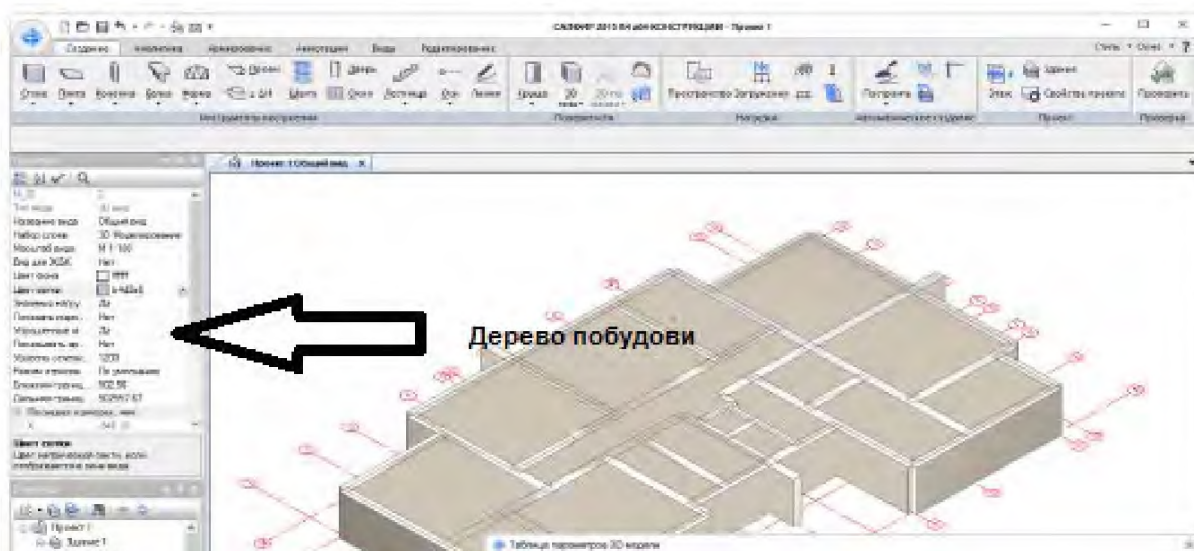


Рисунок А.28 – Параметризація на основі історії моделювання

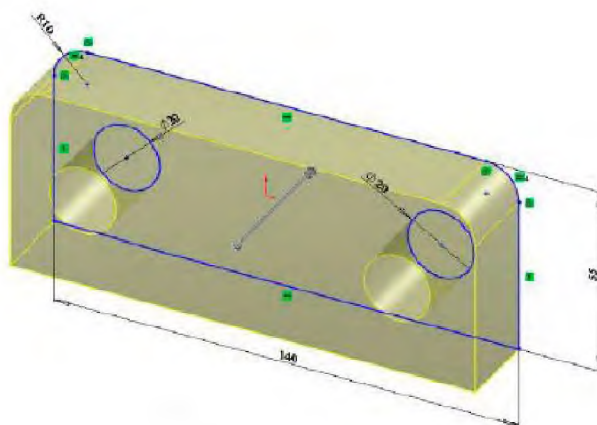


Рисунок А.29 – Можливості варіативної параметризації

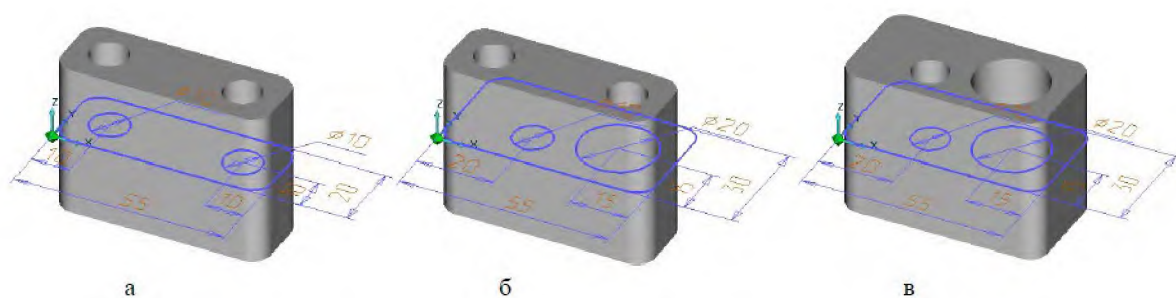


Рисунок А.30 – Приклад геометричної параметризації

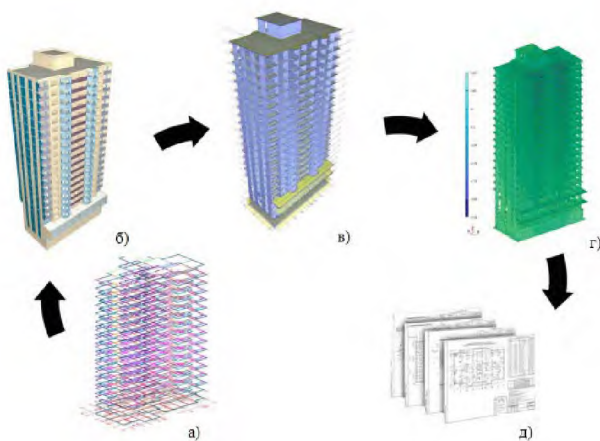
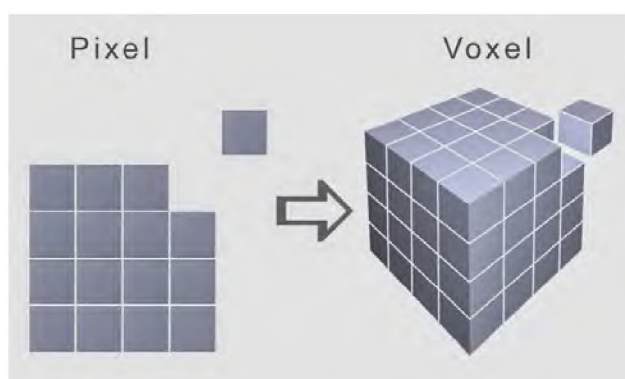


Рисунок А.31 – Об'єктно-орієнтована параметризація для врахування всіх видів конструктивного аналізу



VOLUMETRIC + PIXEL = VOXEL

Рисунок А.32 – Представлення об'єкта у тривимірному просторі за допомогою вокселів

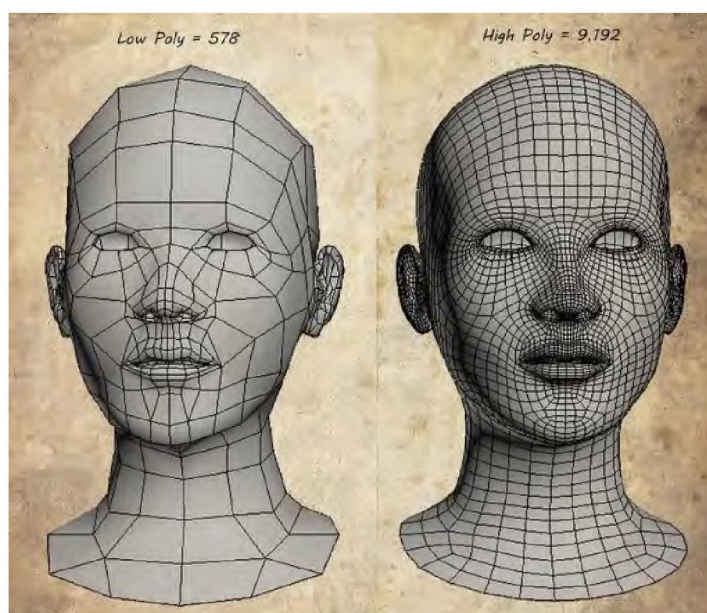


Рисунок А.33 – Полігональна модель

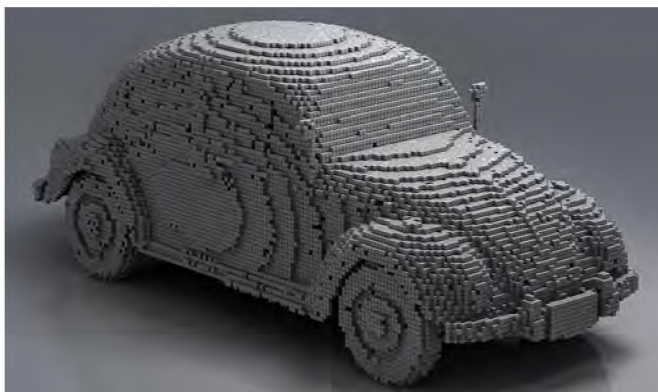


Рисунок А.34 – Воксельна модель



Рисунок А.35 – Воксельна графіка у комп'ютерних іграх

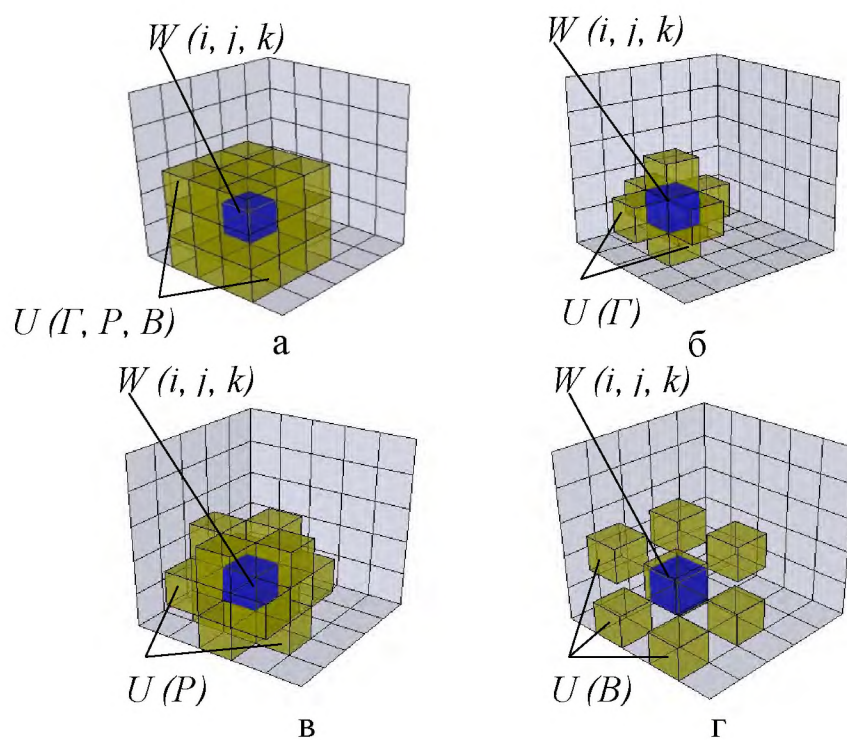


Рисунок А.36 – Схема сусідства зайнятих та вільних вокселів: Г – грань, Р – ребро, В – вершина

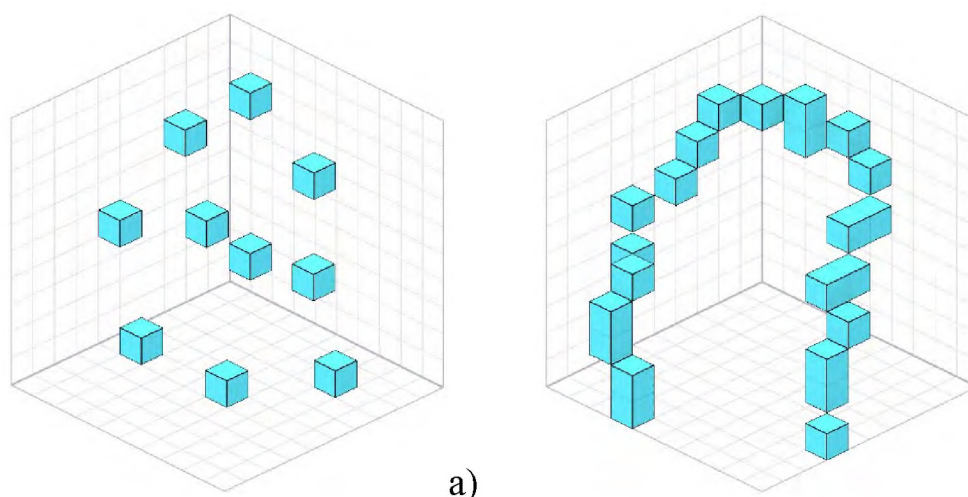


Рисунок А.37 – Фрактальна множина вокселів із розмірністю: а: $[0; 1)$; б: $[1; 2)$

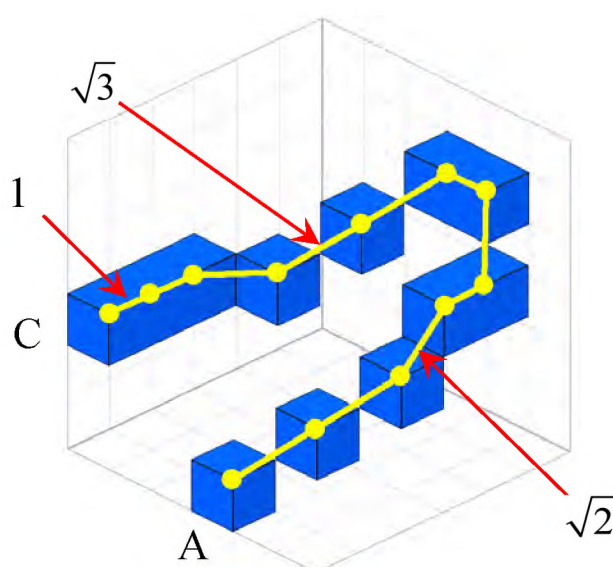


Рисунок А.38 – Визначення довжини воксельної моделі одновимірного образу

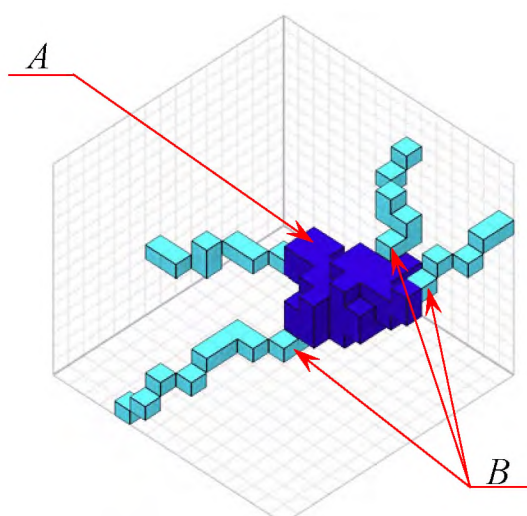


Рисунок А.39 – Перетин (А) декількох одновимірних образів або ущільнення (потовщення) (В) воксельних моделей

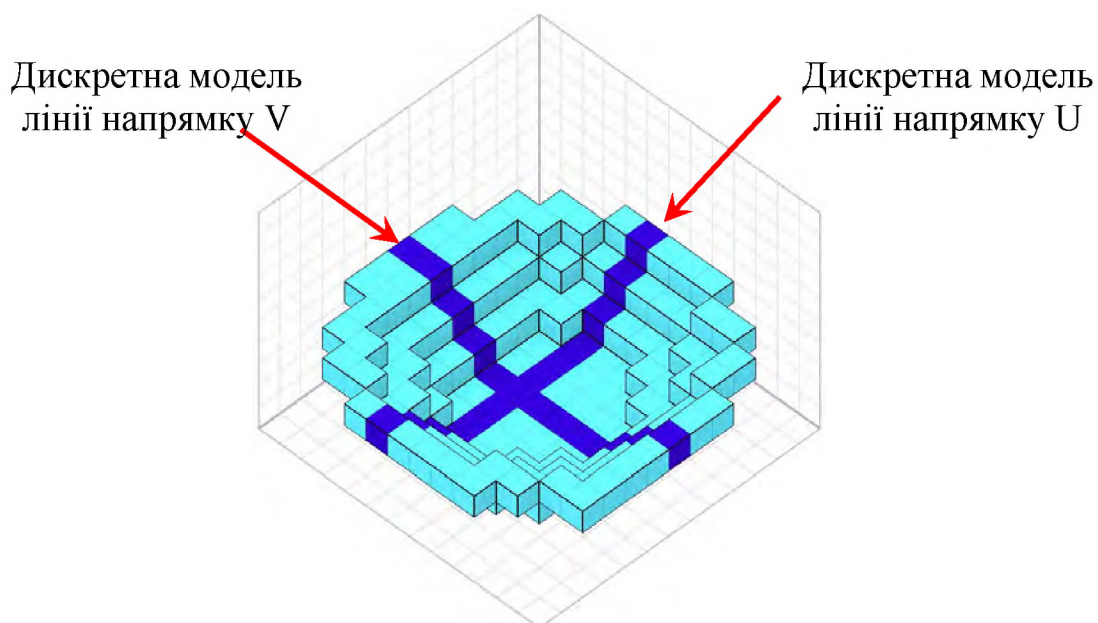


Рисунок А.40 – Воксельно представлений об'єкт – дискретна модель двовимірного образу

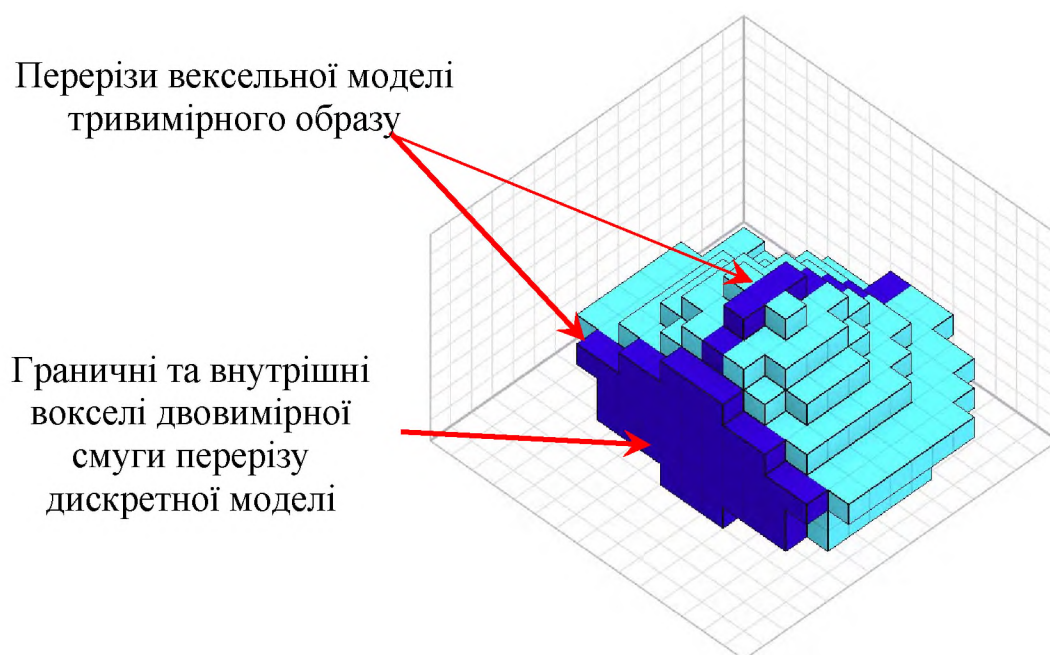


Рисунок А.41 – Ідентифікація дискретної воксельної моделі тіла через сімейство двовимірних замкнутих образів

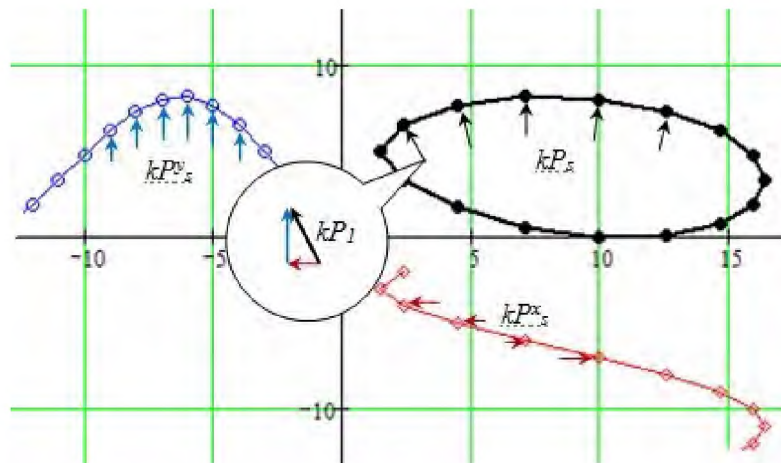


Рисунок А.42 – Принцип візуального керування параметрами дискретного формоутворюючого навантаження

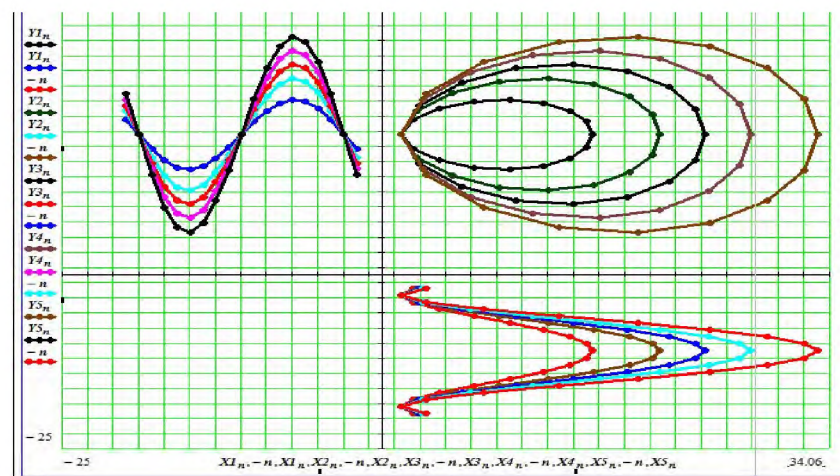


Рисунок А.43 – Приклад формування множини замкнута кривих шляхом керування формоутворюючим навантаженням в системі

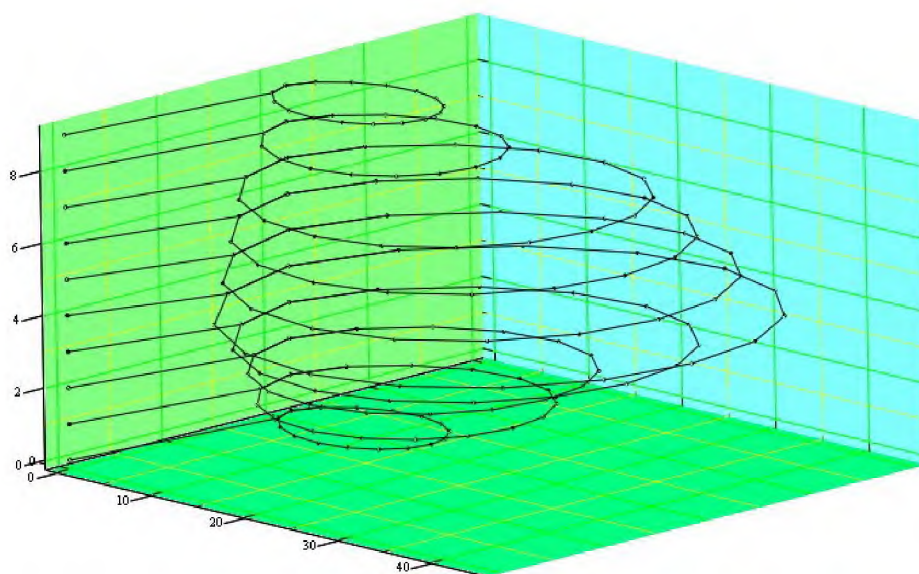


Рисунок А.44 – Приклад дискретного параметричного формування об'єкту шляхом управління функціональним навантаженням у вузлах системи

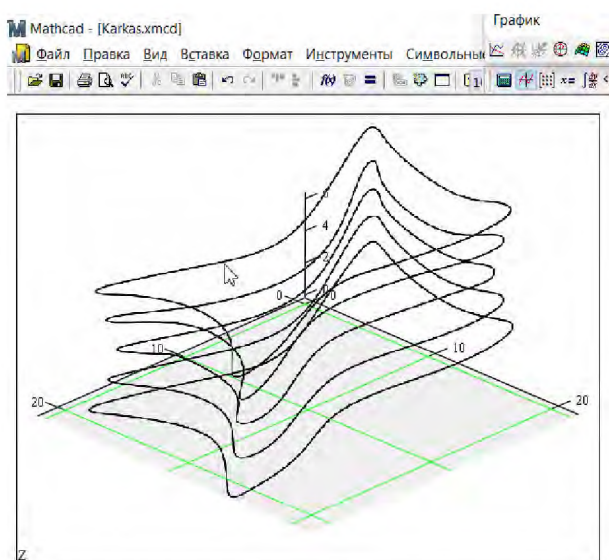


Рисунок А.45 – Просторный каркас проектаного об'єкта

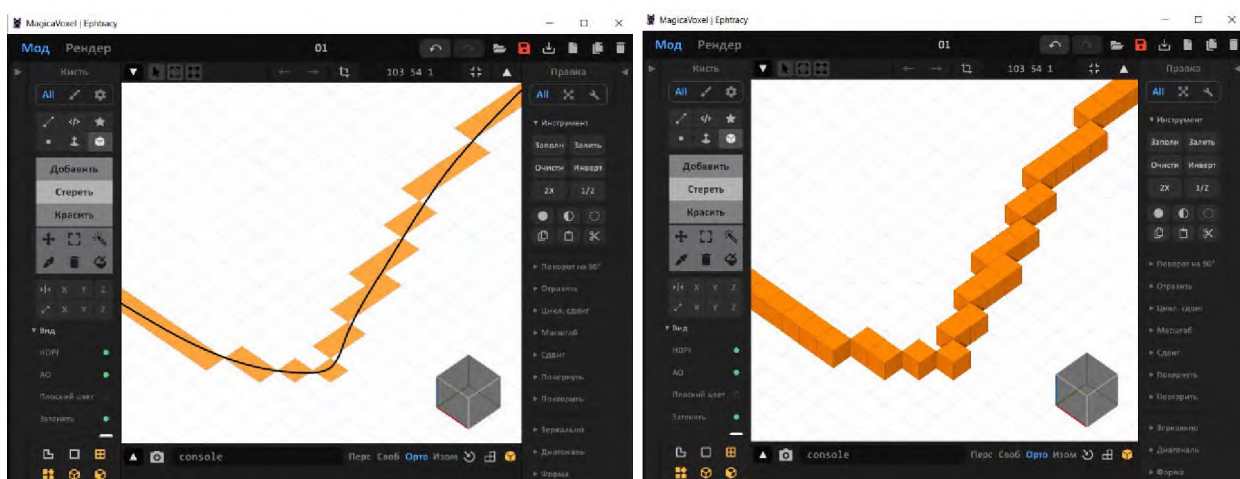
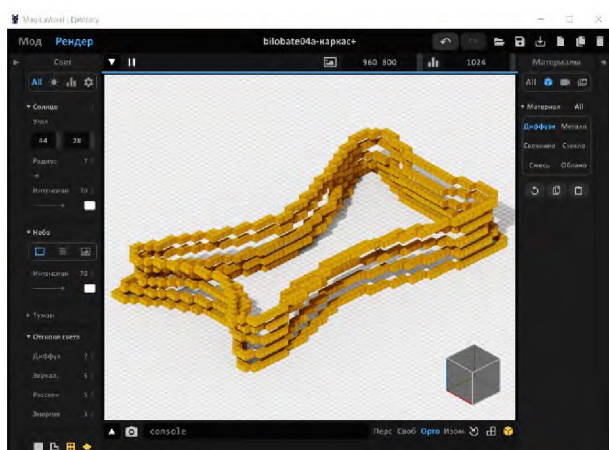


Рисунок А.46 – Воксельна модель елемента каркасу проектаного об'єкта



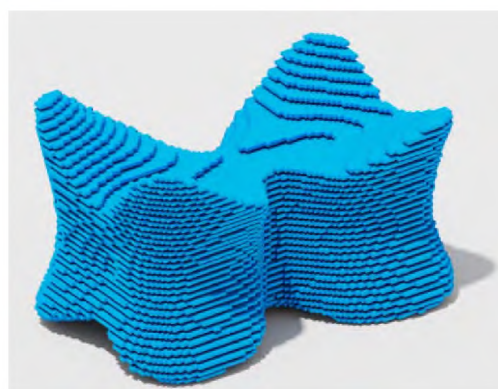
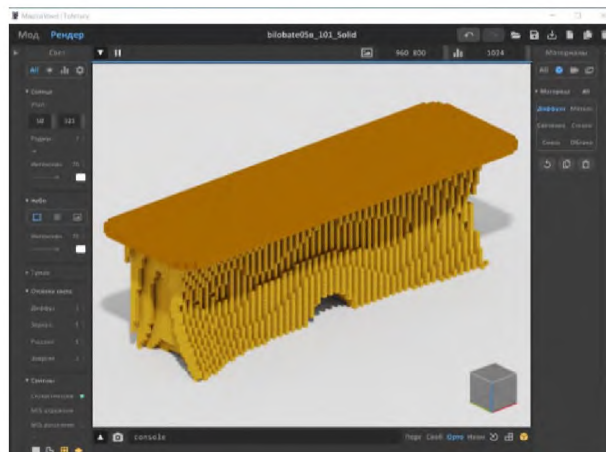
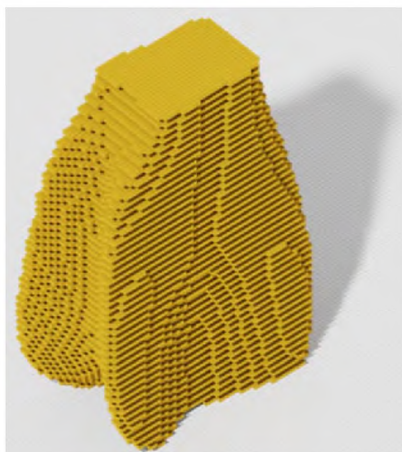


Рисунок А.48 – Приклади воксельних моделей об'єктів середовища



Рисунок А.49 – Арка виконана з уніфікованих дискретних елементів



Рисунок А.50 – Альтанка виконана з уніфікованих дерев'яних елементів



Рисунок А.51 – Альтанка у японському стилі виконана з уніфікованих дерев'яних елементів



Рисунок А.52 – Альтанка у грецькому стилі виконана з уніфікованих дерев'яних елементів



Рисунок А.53 – Фігури тварин для дитячих просторів виконані з уніфікованих дерев'яних елементів



Рисунок А.54 – Фігури екзотичних тварин для дитячих просторів виконані з уніфікованих дерев'яних елементів

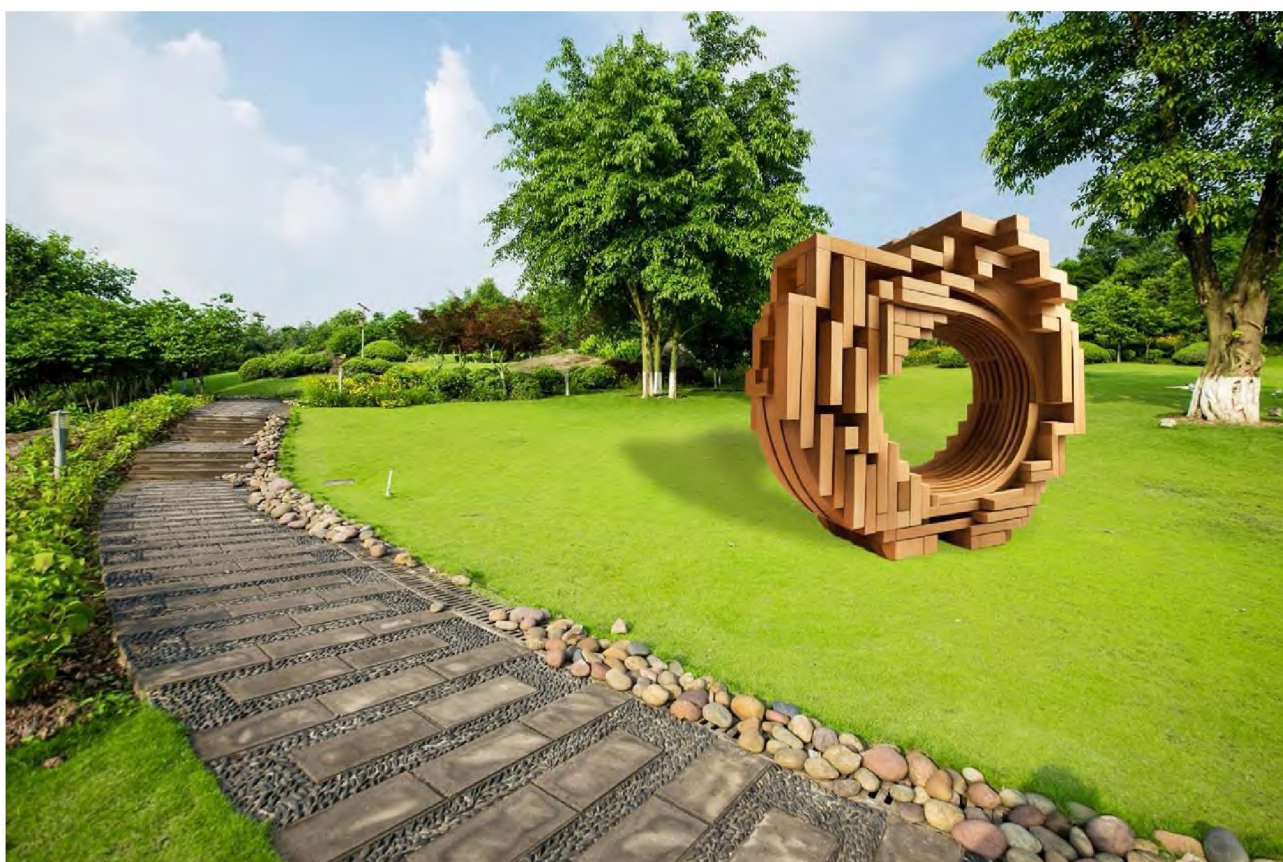


Рисунок А.55 – Дизайнерський арт-об'єкт виконаний з уніфікованих дерев'яних елементів



Рисунок А.56 – Дизайнерський арт-об'єкт виконаний з уніфікованих дерев'яних елементів

