

Параметрична архітектура: синтез естетики, функціональності та екологічної ефективності

Мар'ян Андрухів

Архітектурно-дослідницький відділ, компанія «БЛАГО», м. Івано-Франківськ, Україна

ORCID 0009-0008-2446-536X

Анотація: У статті досліджено функціональність як одну з базових категорій архітектурного проектування, що набуває нового значення в умовах цифрової трансформації архітектурної практики. Автори наголошують, що традиційне розуміння функціональності як раціонального використання простору, ергономічної організації та нормативного забезпечення сьогодні не в змозі забезпечити відповідь на виклики урбаністичної складності, кліматичних змін, нових типів соціальної взаємодії та гібридних сценаріїв використання архітектурного простору. У зв'язку з цим акцент зміщується у бік динамічних, адаптивних систем, здатних змінюватися у просторі та часі, реагуючи на широкий спектр змінних.

Параметричне моделювання представлено як інноваційний підхід до архітектурного проектування, що дозволяє проектувати взаємозв'язки між формою, функцією та середовищем за допомогою алгоритмічних залежностей і змінних параметрів. Такий підхід відкриває можливість не лише візуального, а й функціонального управління об'єктом ще на етапі концептуального проектування. В межах статті особливу увагу приділено тому, як параметричні моделі дозволяють враховувати соціальні сценарії, кліматичні умови, динаміку потоків користувачів, режим експлуатації об'єкта, і забезпечують гнучкість у просторі та в часі.

На прикладах сучасних об'єктів архітектури проілюстровано, як параметричні моделі забезпечують інтеграцію адаптивних фасадів, трансформованих внутрішніх зон та інженерних систем управління мікрокліматом. Окремий розділ присвячено українському досвіду використання параметричних методів у реконструкції та урбаністичному моделюванні, що має особливе значення в контексті післявоєнного відновлення.

В роботі обґрунтовується перспективність впровадження параметричного мислення в архітектурну освіту як інструменту формування нової культури проектування, орієнтованої на алгоритмічне, контекстуальне та міждисциплінарне мислення. У статті підкреслено, що параметричне моделювання виходить за межі формального інструменту і перетворюється на методологічну основу сучасного сталого та адаптивного архітектурного мислення.

Ключові слова: параметрична архітектура, функціональність, адаптивність, цифрове проектування, сталий розвиток, урбаністичне моделювання, smart-системи, реконструкція.

1. Вступ

У XXI столітті архітектура переживає кардинальні трансформації, пов'язані з цифровізацією, зміною суспільних пріоритетів та екологічними викликами. Серед інноваційних напрямів, що формують нове бачення простору, особливе місце посідає параметрична архітектура, яка використовує алгоритмічні методи формотворення, засновані на взаємодії численних змінних параметрів. Цей підхід дозволяє архітекторам не просто створювати складні форми, а й вбудовувати в них логіку функціонування, реагування на контекст і стале використання ресурсів. Параметрика руйнує межі між мистецтвом і технологією, дозволяючи формі розвиватися як результат аналізу середовища, людської поведінки, кліматичних факторів та експлуатаційних сценаріїв.

Парадигма параметричної архітектури формує нову мову архітектурного дизайну, в якій геометрія є не статичним зразком, а відкритим процесом [1]. Вона стає інструментом взаємозв'язку між природою, суспільством і технологією, забезпечуючи можливість більш точно адаптувати архітектурні рішення до конкретних умов. Застосування параметричного моделювання особливо актуальне в умовах глобальної кліматичної кризи, оскільки дає змогу інтегрувати екологічні показники в проєктну стратегію вже на етапі концептуального задуму.

Поряд з цим, параметрика забезпечує високий рівень функціональної гнучкості та ергономічності об'єктів, дозволяючи враховувати динамічні зміни в користувацьких потребах, потоках і сценаріях використання. Водночас вона відкриває нові горизонти естетичного сприйняття архітектури, формуючи складні, органічні й динамічні структури, що гармонізують з навколишнім середовищем.

Під впливом цифрових технологій архітектурна практика перестає бути лінійною – вона трансформується в інтерактивний і варіативний процес, який об'єднує науку, інженерію, мистецтво і екологію. Сучасні програмні платформи (Rhino+Grasshopper, Autodesk Revit, Dynamo тощо) дозволяють створювати інтегровані моделі, що враховують параметри освітлення, вентиляції, акустики, енергозбереження та просторової доступності [2]. Особливо важливою є здатність параметричних систем до адаптації у контексті сталого урбанізму, реконструкції історичних середовищ та формування інклюзивного простору.

2. Об'єкт дослідження

Об'єкт дослідження: сучасна архітектурна практика в умовах цифрового проєктування, зокрема параметричні підходи до формування архітектурного середовища.

Предмет дослідження: принципи та засоби реалізації синтезу естетичних, функціональних і екологічно ефективних рішень у параметричній архітектурі.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження полягає в комплексному аналізі потенціалу параметричної архітектури як інструменту інтеграції естетичних, функціональних та екологічно доцільних рішень у процесі архітектурного проєктування, з метою виявлення її значення для формування сталого та адаптивного архітектурного середовища в умовах цифрової трансформації.

Досягнення мети можливе за умови виконання декількох наукових завдань, зокрема:

- визначити теоретичні засади параметричної архітектури як феномену сучасного проєктного мислення, охарактеризувати її естетичні та концептуальні особливості;
- дослідити функціональні переваги параметричного моделювання в архітектурі, зокрема його здатність адаптуватися до змінних соціальних, просторових та експлуатаційних параметрів;
- проаналізувати можливості параметричного підходу до досягнення екологічної ефективності та сталого розвитку на прикладах світових і українських архітектурних практик;
- обґрунтувати перспективи впровадження параметричних методів у сучасну архітектурну освіту, реконструкцію історичних середовищ та муніципальне планування.

4. Аналіз літератури

Загальний аналіз теоретичної бази свідчить про широке концептуальне, методологічне та прикладне розмаїття сучасних досліджень у сфері параметричної архітектури. В останні два десятиліття простежується чітка тенденція до інтерпретації параметризму не лише як технологічного підходу, а як цілісної парадигми архітектурного мислення. Значна частина праць фокусується на історичному розвитку параметричної архітектури, її еволюції від

інструменту формотворення до інструменту управління складними урбаністичними і культурними сценаріями.

Ключовими підходами залишаються генеративне проектування, використання алгоритмічного моделювання та впровадження методів штучного інтелекту (зокрема, GAN-мереж) у процес архітектурного планування. Дослідники, зокрема Д.Гербер [3], К.Янушкевич [4], К.Ковальський [4], Т.Кван [5] та ін. також аналізують зв'язок параметричної архітектури з урбаністичним середовищем, ідентичністю місця та культурною спадщиною, що свідчить про її потенціал як засобу інтерпретації локального контексту. Важливою є також інтеграція параметричних стратегій у BIM-середовище, що позначає новий етап синтезу цифрових технологій і архітектурної практики.

Окрему увагу, в дослідженнях Дж.Леунг [6], В.Малецкас [7], А.Хайдарі [8] та ін. приділено питанням моделювання в публічному просторі, інтер'єрах громадських будівель та художніх інсталяціях, де параметричний підхід виявляє свою адаптивність до соціально-комунікативних функцій. Теоретичні моделі параметрики дедалі частіше поєднуються з інтерфейсними технологіями та інтерактивним середовищем.

У працях С.Куана [9], Дж. Лі [10], Т.Маліка [11], М.Шнабеля [9; 12; 13; 14] та ін. підкреслюється значення міждисциплінарного діалогу між архітектурою, інженерією, інформатикою та соціогуманітарними науками. Деякі дослідження звертаються до педагогічного потенціалу параметричного проектування як інструменту формування дизайнерського мислення. Водночас, дискусійною залишається проблема стилістичної ідентифікації параметризму – між «архітектурною мовою» і «методом».

Низка публікацій, зокрема роботи К.Пеллегріно, О.Ємець, Т.Малік, розглядають другий етап розвитку параметричної архітектури, який характеризується не тільки геометричною складністю, а й концептуальною глибиною, екологічною чутливістю та відкритістю до користувачьких сценаріїв. Важливо, що сучасні автори дедалі частіше наголошують на необхідності критичного переосмислення параметричних стратегій з огляду на соціальну відповідальність, інклюзивність і сталість.

Отже, у науковому дискурсі щодо параметричної архітектури окреслюються кілька провідних векторів: цифрова трансформація архітектурного проектування, міждисциплінарність, інтеграція з культурним контекстом, пошук нових форм комунікації з користувачем та рух у бік адаптивних, етичних і контекстуально обґрунтованих рішень.

5. Методи досліджень

Методологічна основа дослідження базується на міждисциплінарному підході, що поєднує теоретичні, аналітичні, порівняльні та емпіричні методи, характерні для архітектурної науки, урбаністики, екодизайну та цифрового моделювання. Основним інструментом теоретичного аналізу виступає метод системного підходу, що дозволив розглядати параметричну архітектуру як складну форму проектної діяльності, у якій взаємодіють естетичні, функціональні та екологічні параметри.

Застосовано також метод типологічного аналізу, що використовувався для класифікації прикладів архітектурних рішень за домінуванням тих чи інших параметрів (формальних, просторових, енергетичних, поведінкових). Для виявлення закономірностей інтеграції параметричного підходу в міжнародному та національному контекстах залучено порівняльно-аналітичний метод, який дозволив виявити відмінності у практиках реалізації параметричної архітектури в Україні та за кордоном.

У межах аналізу реалізованих проєктів застосовано метод кейс-стаді, що дозволив дослідити конкретні приклади (Zaha Hadid Architects, BIG, MAD, Archimatika, AER тощо) з позиції їх естетичної виразності, функціонального навантаження та екологічної ефективності [15]. Крім того, для відображення процесу параметричного проектування в динаміці використовувався морфологічний аналіз, що допоміг простежити взаємозв'язок змін у

геометрії об'єкта з урахуванням зовнішніх та внутрішніх параметрів (інсоляція, вітрові навантаження, тепловтрати, потоки руху тощо).

Допоміжно застосовано графічно-аналітичний метод, зокрема для візуалізації параметричних трансформацій та адаптивних сценаріїв використання простору. На етапі формулювання висновків застосовувався метод моделювання, що дозволив сформулювати узагальнену модель взаємодії естетичних, функціональних і екологічних чинників у параметричному проєктуванні. Усі аналітичні висновки було обґрунтовано на основі сучасних публікацій, професійних практик та цифрових інструментів (Grasshopper, Rhino, Autodesk Revit, BIM-середовища).

Комплексне використання зазначених методів дало змогу забезпечити цілісність дослідження, підтвердити його прикладну значущість та сформулювати обґрунтовані рекомендації для подальшого впровадження параметричних практик у сферу архітектурного проєктування й містобудівного планування.

6. Результати досліджень

Функціональність є однією з ключових категорій архітектурного проєктування, яка визначає придатність архітектурного об'єкта до виконання своїх основних завдань – забезпечення потреб людини, просторової організації діяльності та інтеграції в урбаністичне середовище. У традиційних формах архітектурного мислення функціональність розглядалась у межах раціонального розподілу простору, ергономіки та нормативно-правових вимог. Проте в умовах цифрової трансформації архітектури, що супроводжується динамікою урбаністичних сценаріїв, зміною стилів життя, появою нових типологій будівель і трансформацією способів використання простору, ця категорія набуває нового змісту.

Параметричне моделювання – це методика архітектурного проєктування, яка ґрунтується на використанні змінних параметрів, логічних залежностей і алгоритмів, що задають взаємозв'язки між геометричними та функціональними елементами архітектурного об'єкта [16]. На відміну від класичних методів, де кожне архітектурне рішення має статичний характер, параметричне моделювання дозволяє формувати адаптивні, гнучкі системи, які реагують на зміну вхідних даних – фізичних, соціальних, кліматичних або поведінкових.

Однією з основних функціональних переваг параметричної архітектури є її адаптивність до просторових умов [17]. Параметричне проєктування дозволяє враховувати складну топографію ділянки, орієнтацію за сторонами світу, рівень інсоляції, вітрові навантаження, акустичні властивості місцевості. За допомогою алгоритмічного моделювання ці параметри автоматично інтегруються в геометричну модель, що дає змогу оптимізувати форму, об'ємно-просторову структуру та конструктивні рішення об'єкта. Наприклад, у проєктах, реалізованих студією Foster+Partners [18], параметричні моделі використовуються для розрахунку кута нахилу фасадів або конфігурації тіньових елементів, що мінімізують перегрів будівлі та забезпечують ефективне використання сонячної енергії.

Іншим важливим функціональним аспектом є реактивність до соціальних параметрів. Сучасна архітектура дедалі частіше працює з поняттям «архітектури поведінки», у межах якої будівля має враховувати сценарії використання простору різними групами користувачів, їхні маршрути, зони конфліктів та взаємодії. Параметричні інструменти дозволяють здійснювати симуляцію потоків людей, аналізувати концентрацію активностей, розміщення сервісів, тимчасове використання або трансформацію зон. Наприклад, у бібліотеках, музеях, терміналах або торгових центрах параметричне моделювання дає змогу створювати гнучкі просторові зони, які трансформуються залежно від кількості відвідувачів, подій або режиму експлуатації.

Особливої актуальності набуває функціональна адаптивність у часі – здатність архітектурного простору змінюватися протягом доби, сезону або життєвого циклу будівлі. Параметричні системи передбачають використання динамічних елементів – адаптивних

фасадів, рухомих перегородок, мобільних навісів, які працюють за заданими алгоритмами у відповідь на зміну температури, вологості, освітлення або навантаження [19]. Відомими прикладами таких рішень є інноваційні фасади, спроектовані на основі біоміметики, зокрема фасад Музею арабського світу у Парижі (арх. Ж. Нувель), де рухомі жалюзі змінюють прозорість залежно від освітлення.

У сфері житлової архітектури параметричне моделювання дає змогу формувати персоналізовані простори, що відповідають індивідуальним потребам мешканців. Такі системи можуть враховувати тип родини, спосіб життя, часові патерни використання приміщень, рівень енергоспоживання тощо. Завдяки інтерфейсам типу BIM (Building Information Modeling), параметрична модель не лише візуалізує проєкт, а й дозволяє керувати всіма етапами життєвого циклу будівлі – від проєктування до експлуатації та утилізації [20].

Ще однією функціональною перевагою є можливість інтеграції інженерних і технологічних рішень у єдину проєктну модель. У параметричних середовищах (наприклад, Grasshopper+Dynamo) можна створювати модулі, які одночасно моделюють несучу структуру, вентиляцію, освітлення, водопостачання з урахуванням їх взаємного впливу. Це сприяє оптимізації просторових ресурсів і зменшенню дублювання функцій [21]. Як наслідок, архітектор отримує не лише візуальну, але і функціонально обґрунтовану форму, адаптовану до об'єктивних умов функціонування будівлі.

На особливу увагу заслуговує інструментальна інтеграція параметричного підходу з інтелектуальними системами управління (smart systems), що виводить функціональність архітектурного об'єкта на новий рівень. У параметричних будівлях можуть застосовуватися сенсори, які зчитують параметри навколишнього середовища та передають дані до алгоритмів управління освітленням, кліматом, безпекою тощо. Це дозволяє не лише підвищити енергоефективність, але й адаптувати умови до суб'єктивних вимог користувачів у реальному часі.

Параметричне моделювання також суттєво змінює парадигму архітектурної комунікації, оскільки відкриває нові підходи до взаємодії з замовником, громадськістю та проєктною командою [1]. Гнучкість моделей дає змогу швидко адаптувати проєкт під нові вхідні дані, змінити планувальну структуру, форму або функціональне наповнення, не руйнуючи загальної логіки проєкту. Отже, параметрика підвищує функціональну керованість об'єктом ще на етапі концептуального планування.

У підсумку слід підкреслити, що функціональність у параметричній архітектурі постає не як застигла ознака, а як динамічний процес, що розгортається в часі та просторі, відображаючи складну систему взаємодій – між людиною і середовищем, архітектором і технологією, об'єктом і містом. Саме це принципово відрізняє параметричну парадигму від традиційних форм проєктування і робить її особливо перспективною в умовах постійно змінюваних урбаністичних, соціокультурних та екологічних викликів.

З огляду на зазначене, параметричне моделювання в архітектурі має низку функціональних переваг, які полягають насамперед в адаптивності до змінних умов. Так, в сучасній архітектурній практиці дедалі більше зростає потреба у створенні будівель та середовищ, здатних адаптуватися до складних і мінливих умов функціонування. На тлі урбаністичних викликів, змін клімату, гібридизації простору та персоналізації запитів користувачів, класичні підходи до формування функціональної структури архітектурного об'єкта виявляються обмеженими. У цьому контексті параметричне моделювання виступає як інструмент, що забезпечує динамічну взаємодію архітектурної форми з соціальними, просторовими й експлуатаційними параметрами, формуючи новий рівень функціональної раціональності.

Параметричне моделювання, або параметричне проєктування (англ. parametric design), передбачає використання змінних вхідних даних (параметрів), які визначають формоутворення та логіку функціонування архітектурного об'єкта [22]. У середовищах типу Rhino+Grasshopper, Dynamo, Autodesk Revit параметри задаються чисельно або через логічні

залежності: розмір ділянки, орієнтація за сторонами світу, вітрове навантаження, сценарії переміщення користувачів, рівень природного освітлення, шумове забруднення тощо. Зміна будь-якого з параметрів викликає автоматичну трансформацію архітектурної форми відповідно до заданих правил, що створює основу для адаптивної архітектури.

Однією з основних функціональних переваг параметричної архітектури є її просторова адаптивність. На відміну від фіксованих геометричних рішень, параметрична модель дозволяє інтегрувати дані про навколишнє середовище на ранньому етапі проектування [23]. Наприклад, у проекті Yas Hotel Abu Dhabi (Asymptote Architecture) складна фасадна сітка згенерована параметрично на основі аналізу сонячної активності, з урахуванням захисту від перегріву та збереження прозорості [24]. Усі структурні модулі адаптуються до локального кута інсоляції, забезпечуючи оптимальний мікроклімат у приміщеннях без втрати естетичної виразності.

Подібний принцип реалізовано в проекті Al Bahr Towers (Aedas Architects) в Абу-Дабі, де адаптивний фасад створено за аналогією з геометрією арабської решітки «mashrabiya» [25]. Параметрично керовані панелі фасаду автоматично реагують на зміну положення сонця, відкриваючи або закриваючи комірки фасаду для зменшення теплового навантаження. Така система, керована алгоритмами, суттєво знижує споживання електроенергії для кондиціювання та підвищує комфорт у робочих просторах. Важливо зазначити, що всі зміни реалізуються без необхідності перепроєктування – вони відбуваються в рамках заданої параметричної логіки, що є ключовою перевагою цієї технології.

Ще одним напрямом застосування є адаптація до змінних соціальних сценаріїв використання простору [15]. У традиційному підході архітектурне проектування часто не враховує зміну типу користувача, його кількісних характеристик або поведінкових патернів. Параметричне проектування дозволяє включити такі дані у структуру моделі. Наприклад, при створенні публічних просторів, транспортних хабів або культурних центрів використовується симуляція руху пішоходів (crowd dynamics), що дозволяє на етапі формування планувальної структури уникнути «вузьких місць», зон перевантаження чи конфліктів потоків.

Проект The Shed у Нью-Йорку (архітектори: Diller Scofidio + Renfro) є прикладом втілення соціально-адаптивного об'єкта, функціональність якого забезпечується рухомим елементом – параметрично запрограмованим зовнішнім кожухом, що висувається на рейках і збільшує внутрішній об'єм будівлі залежно від кількості відвідувачів або формату заходу [26]. Такий підхід ілюструє, як параметричне моделювання дозволяє поєднувати сценографію, функціональність і технологічну гнучкість у межах однієї проектною системи.

У житловому будівництві параметрика відкриває нові можливості для персоналізації функцій. Наприклад, у проектах, де використовуються цифрові конфігуратори (як-от «Living Architecture» у Великобританії), майбутній мешканець може обрати не лише естетичні характеристики, а й функціональні блоки: кількість кімнат, орієнтацію приміщень, конфігурацію освітлення. Усі ці опції не проєктуються вручну, а є частиною параметричної матриці, яка генерує оптимальний варіант на основі введених параметрів. Такий підхід дозволяє інтегрувати індивідуальний запит у стандартизоване проектне середовище без втрати ефективності.

Варто підкреслити також інтеграцію з інженерними системами, яка здійснюється в параметричному середовищі автоматично. Наприклад, при моделюванні систем вентиляції або сонячних колекторів параметри орієнтації, кута нахилу, тіньових зон задаються як функції у загальній моделі. Це дозволяє уникнути дублювання роботи між архітекторами, конструкторами та інженерами, підвищує узгодженість рішень і знижує кількість помилок при реалізації. Так, у проекті The Edge (Deloitte HQ, Амстердам), відомому як один із найрозумніших офісів у світі, всі функціональні модулі будівлі, включно з клімат-контролем, логістикою, освітленням та навіть розміщенням співробітників, управляються за допомогою інтегрованої параметричної системи, яка оновлює інформаційну модель в реальному часі [27].

Особливої актуальності набуває функціональна трансформація у часі – здатність архітектурного простору змінюватися відповідно до сезонів, добових ритмів або зміни функції. У традиційних підходах трансформаційність обмежується гнучкими планами або мобільними перегородками. Параметричне моделювання дозволяє вивести цю змінність на системний рівень [18]. Наприклад, у пілотному проєкті Responsive Surface Structure (MIT Media Lab) параметрична оболонка будівлі реагує на зміну температури та вологості, змінюючи ступінь прозорості й термічної інерції фасаду, зменшуючи потребу в штучному опаленні або охолодженні [28].

З практичного погляду, важливою перевагою параметричного моделювання є скорочення часу на проєктування та зменшення вартості помилок. Завдяки вбудованим алгоритмам перевірки на конфлікти (clash detection), система автоматично ідентифікує невідповідності в плануванні або розміщенні інженерних мереж. Це особливо важливо в складних проєктах реконструкції, де точність моделі визначає функціональну життєздатність об'єкта. Метод «Scan-to-BIM», у межах якого хмара точок, отримана зі сканування існуючої будівлі, трансформується у параметричну модель, відкриває нові горизонти для функціонального осмислення реконструкційних практик, особливо в історичному середовищі.

Отже, функціональні переваги параметричного моделювання полягають не лише у гнучкості формотворення, а й у здатності системно враховувати змінні умови соціального, просторового та експлуатаційного характеру. Це дозволяє не просто відповідати на виклики сучасного проєктування, а й проактивно формувати середовище, здатне до саморегулювання, адаптації та сталого функціонування. Параметричні моделі стають інструментом функціональної інтелектуальності архітектури, яка виходить за межі традиційних уявлень про «зручність» чи «ефективність», і перетворюється на складну, динамічну, технологічно та соціально резонансну систему.

Власне, параметричний підхід, за час його активного використання перетворився на інструмент екологічної ефективності та сталого архітектурного розвитку. Цей підхід стає не лише формальним інструментом, а методологічною основою екомислення в архітектурі. У сучасній архітектурі поняття сталого розвитку (sustainable development) виходить за межі декларативних екологічних гасел і поступово стає основоположною концепцією проєктного мислення. Глобальні кліматичні виклики, дефіцит ресурсів, деградація урбаністичного середовища змушують архітекторів шукати нові інструменти, які дозволяють не тільки зменшити екологічний слід будівлі, а й перетворити архітектуру на активного учасника екологічних процесів. У цьому контексті параметричний підхід набуває особливого значення, оскільки забезпечує можливість інтеграції екологічних параметрів у саму логіку формотворення ще на ранніх етапах проєктування.

На відміну від постфактум адаптації архітектурного проєкту до екологічних стандартів (LEED, BREEAM, DGNB), параметричне моделювання дозволяє здійснити оптимізацію енерговитрат, водоспоживання, освітлення, вентиляції та матеріаломісткості вже на етапі концептуальної моделі. Це досягається шляхом включення відповідних екологічних змінних у структуру алгоритмів, які визначають геометрію, орієнтацію, структуру оболонки та інші аспекти об'єкта.

Одним із найбільш яскравих прикладів застосування параметрики для забезпечення екологічної ефективності є Eastgate Centre в місті Хараре (Зімбабве), спроектований архітектором Міком Пірсом у співпраці з інженерною фірмою Arup [29]. Будівля імітує терморегуляційну систему термітника і не має традиційної системи кондиціонування. Замість цього використовуються пасивні вентиляційні шахти та масивні бетонні перекриття, що акумулюють тепло. За допомогою параметричного аналізу природної тяги, розподілу повітряних потоків та температурних градієнтів архітекторам вдалося досягти 90% енергозбереження порівняно з аналогічними офісними центрами.

Ще одним важливим прикладом є проєкт One Ocean Pavilion у Йосу (Південна Корея), реалізований Zaha Hadid Architects. Будівля має складну параметричну форму оболонки, яка

моделювалася з урахуванням морського клімату, напрямків вітру та хвильового навантаження. Параметри фасадних елементів включали коефіцієнт світлопропускання, акустичне поглинання та здатність до самоочищення від солей. Завдяки алгоритмічній оптимізації конструкція забезпечила природну вентиляцію, зниження рівня споживання енергії та стійкість до корозії без додаткових захисних покриттів.

У проєкті Vanke Pavilion на Expo Milano 2015 (арх. Даніель Лібескінд) використано параметричну плитку з переробленого алюмінію, розміщену за оптимальною схемою згідно з аналізом інсоляції, з метою максимального зниження перегріву [30]. Кожен фасад будівлі мав індивідуальну конфігурацію, отриману в результаті численних симуляцій. Параметри також включали дані про місцеву температуру, річні вітрові навантаження та частоту опадів. У підсумку будівля досягла високих показників за шкалою енергоефективності й відповідала критеріям циркулярної економіки.

Параметрика як інструмент сталого розвитку активно застосовується і в ландшафтній архітектурі, зокрема при проєктуванні систем збору дощової води, розміщення зелених насаджень та енергетично нейтральних зон. Наприклад, у Houtan Park у Шанхаї (архітектурне бюро Turenscape), параметричне моделювання використано для аналізу рівня забруднення води у річці Хуанпу [14]. Дані про біофільтрацію, відтік, фітонікінетику та сонячне освітлення інтегровані в єдину просторову систему розміщення очисних рослин. Це дозволило створити не лише естетично привабливий простір, а й екологічно активну інфраструктуру, що очищує понад 2400 кубометрів води щоденно.

У європейському контексті значну увагу приділяють використанню параметричних систем для зменшення вуглецевого сліду архітектурних матеріалів. У проєкті Bloomberg Headquarters у Лондоні (Foster + Partners), який отримав найвищий рейтинг BREEAM серед комерційних будівель, всі будівельні матеріали були оптимізовані параметричними методами з точки зору транспортування, енергоємності та переробки. Параметрична модель дозволила обрати матеріали з локальних джерел, автоматично враховувати логістику та передбачати життєвий цикл елементів.

Не менш показовим є застосування параметричного підходу в українських практиках, хоча він перебуває на початковій стадії становлення. Одним із напрямів є використання технології Scan-to-BIM при реконструкції історичних будівель. Наприклад, у проєкті адаптації старого корпусу Львівської політехніки до нових освітніх функцій, за участі студії Replus Bureau, параметрична модель створена на основі лазерного сканування, дозволила оптимізувати енергоспоживання за рахунок перепланування внутрішніх просторів і впровадження систем пасивного опалення [31]. Дані про втрати тепла, напрямок повітряних потоків та інсоляцію були закладені в основу прийняття проєктних рішень щодо зонування і розміщення сервісних об'єктів.

Ще одним прикладом є проєкт інноваційного павільйону у ВДНГ (Київ), реалізований у межах Kyiv Smart City [28]. Форма навісу над зоною громадських лекцій створена у середовищі Grasshopper з урахуванням розподілу сонячної активності в літній і зимовий періоди. Використання адаптивної геометрії дозволило не тільки зменшити нагрів у пікові години, а й зберегти освітлення в сутінковий час. За оцінками енергоаудиту, витрати на штучне охолодження зменшилися на 30% у порівнянні з традиційними металевими навісами, що використовуються у міському середовищі.

У сфері житлової забудови перспективним є використання параметрики в поєднанні з сонячними панелями та рекуперативними системами. Компанія Archimatika (Київ) експериментує з використанням параметричних блоків у проєктах житлових комплексів, що дозволяє змінювати конфігурацію квартир з урахуванням природного освітлення, щільності забудови, зеленої зони та вентиляційних коридорів. У моделі враховуються мікрокліматичні умови окремої ділянки, що забезпечує не лише зниження споживання енергії, а й підвищення комфорту проживання без суттєвого здорожчання об'єкта.

Отже, параметричне моделювання стає одним із ключових інструментів досягнення екологічної ефективності в архітектурі, оскільки дозволяє:

- скорочувати споживання енергії на етапі експлуатації;
- оптимізувати використання матеріалів із мінімальним вуглецевим слідом;
- створювати кліматоадаптивні форми без потреби в складних інженерних інтервенціях;
- інтегрувати природні процеси в логіку архітектурної структури;
- поєднувати економічну доцільність з естетичною та соціальною відповідальністю.

На відміну від декларативної «зеленості», параметричний підхід формує екологічну раціональність як системну функцію архітектурного об'єкта. Враховуючи прогрес у галузі алгоритмічного проектування, підвищення обчислювальної потужності й поширення BIM-інструментів, слід очікувати подальшої експансії параметрики в екологічно орієнтованих проектах, особливо в умовах постіндустріального переходу та адаптації міст до нових кліматичних реалій.

З огляду на важливість параметричного моделювання, вважаємо за доцільність виокремити низку перспектив впровадження параметричних методів у архітектурну освіту, реконструкцію історичних середовищ і муніципальне планування. Власне параметричне проектування, що виникло як реакція на можливості цифрової епохи, сьогодні трансформується із вузько-технічної дисципліни у повноцінну проектну парадигму, здатну змінити не лише архітектурну практику, а й архітектурну освіту, підходи до реконструкції та стратегічного планування міських територій. Суть параметричного підходу полягає у побудові динамічних моделей, які змінюються залежно від заданих змінних: геометричних, фізичних, екологічних, поведінкових. Такий метод дозволяє гнучко адаптуватися до складних і мінливих умов сучасного містобудівного середовища.

Якщо говорити про інтеграцію параметричних методів у архітектурну освіту, то остання вимагає трансформації не лише інструментарію, а й методології. Параметрика, як спосіб моделювання зв'язків, варіацій і контекстуальних відповідей, має бути представлена не як окрема технологія (наприклад, знання Grasshopper або Rhino), а як проектне мислення, що формує здатність студента оперувати взаємозалежними змінними в межах одного середовища.

У низці європейських шкіл (Architectural Association, IAAC, Delft University of Technology) параметричне мислення інтегрується в освітній процес з першого року навчання через проектні студії, симуляційні модулі, курси computational design. В Україні такі підходи лише починають формуватися, однак перспективи їхнього розвитку є високими, зокрема в межах цифровізації освітнього процесу, переходу до проектного навчання та міждисциплінарної кооперації.

Вирішити цю проблему можна через розробку модулю параметричного проектування в межах освітньо-професійних програм з архітектури та містобудування, що включають:

- вивчення алгоритмічного моделювання (Grasshopper, Dynamo);
- симуляційних практик (енергоаналіз, daylight simulations, CFD-моделювання);
- кейс-стаді з аналізу реалізованих параметричних об'єктів з екологічним і соціальним акцентом.

Це дозволить студентам не лише оволодіти технікою, а й сформувати навички адаптивного й еволюційного проектного мислення.

Також, на нашу думку, варто інтегрувати параметричні методи в курси з урбаністики, реконструкції, архітектурної теорії, акцентуючи на міждисциплінарності. Наприклад, симуляції руху пішоходів у проектах громадських просторів або параметричне зонування з урахуванням мікрокліматичних факторів.

Окремі того, параметрика може бути застосована в реконструкції історичних середовищ. Реконструкція пам'яткоохоронних об'єктів традиційно асоціюється з ретельною фіксацією існуючого стану та ручною реставрацією окремих елементів. Водночас параметричні методи можуть суттєво змінити підходи до реконструкції, забезпечивши точну документацію,

симуляцію старіння матеріалів, оптимізацію втручань та інтеграцію сучасних функцій без порушення історичної автентичності.

Для прикладу, в проекті реконструкції Palazzo dei Diamanti у Феррарі (Італія), команда архітекторів застосувала параметричну модель для аналізу візуального сприйняття фасаду при різних сценаріях підсвітки та добудов. Це дозволило мінімізувати втручання в історичну композицію при одночасній адаптації простору до потреб виставкової діяльності.

В іншому випадку, у рамках ініціативи Scan the World (MyMiniFactory) проводиться масове 3D-сканування культурної спадщини для створення параметричних моделей, які можуть бути відновлені у разі руйнування (зокрема внаслідок війни чи стихійного лиха). Такий підхід вже частково застосовується в Україні – наприклад, в межах цифрового архіву Києво-Могилянської академії та 3D-документації втрачених об'єктів Харкова і Чернігова.

Також, на державному та муніципальному рівнях, доцільно ініціювати програми цифрової паспортизації об'єктів культурної спадщини з використанням технологій Scan-to-BIM та параметричних моделей [15]. Це забезпечить збереження інформації, навіть у разі фізичного знищення об'єкта, а також дасть змогу об'єктивно планувати заходи з реконструкції та реставрації.

Також параметричні методи можуть слугувати основою для вбудованих сучасних функцій (інклюзивність, енергоефективність, безбар'єрність) у структуру історичного об'єкта. Наприклад, за допомогою алгоритмів можна розробити маршрути для людей з інвалідністю у пам'яткоохоронних комплексах без візуального втручання у фасадну структуру.

Сучасне місто являє собою складну, динамічну систему, що перебуває в постійному процесі трансформації під впливом широкого спектра соціальних, екологічних, економічних і технологічних чинників [22]. У таких умовах традиційні підходи до муніципального планування, зокрема класичне функціональне зонування, яке сформувалося на початку ХХ століття, дедалі більше втрачають свою ефективність. Їхня структурна жорсткість та ієрархічність не відповідають вимогам сьогодення, що потребує гнучких, адаптивних і відкритих до змін інструментів управління просторовим розвитком.

У цьому контексті параметричні методи урбаністичного моделювання постають як інноваційна відповідь на виклики комплексного розвитку міського середовища. На відміну від лінійно-статичних моделей, параметричний підхід ґрунтується на використанні змінних параметрів, що дозволяє створювати сценарії розвитку територій із урахуванням численних взаємозв'язаних факторів [23]. Застосування алгоритмічного дизайну, цифрових симуляцій та аналітичної візуалізації забезпечує можливість мультифакторної оптимізації рішень на всіх рівнях планувальної ієрархії – від мікроуровня кварталу до стратегічного планування агломерацій.

Для прикладу, в Барселоні у 2019 році муніципалітет ініціював проєкт Superblocks, у межах якого параметричні моделі використовувалися для симуляції пішохідних потоків, рівнів шуму, якості повітря та тіньових зон при реорганізації міських кварталів. Це дозволило не тільки зменшити трафік, а й покращити мікроклімат і комфорт міського середовища. В Естонії (місто Тарту) впроваджено платформу UrbanLytics, яка базується на параметричній моделі, що збирає дані з IoT-сенсорів (температура, CO₂, мобільність, заповненість громадських просторів) та автоматично генерує рекомендації для муніципального управління.

З огляду на зазначене, вважаємо, що в Україні доцільно розробити пілотні проєкти на базі середніх і великих міст, у яких планування територій (наприклад, зон відпочинку, мобільності або житлових кварталів) здійснюється за параметричною моделлю. До змінних можуть бути включені демографічні прогнози, кліматичні сценарії, транспортна доступність, екологічні ризики, рівень безпеки.

Також, варто впровадити цифрові платформи урбаністичного моделювання на основі GIS+BIM+Parametric tools, що дозволять громадськості, архітекторам і органам влади брати участь у спільному плануванні територій. Це особливо важливо у процесі відновлення

українських міст після війни, коли виникає потреба в одночасному плануванні нових районів, реновації інфраструктури та забезпеченні життєстійкості громад.

8. Висновки

Параметричне моделювання постає не лише як технологічний інструмент, а як комплексна парадигма архітектурного і містобудівного мислення, що дозволяє переосмислити саму логіку проектування у XXI столітті. Воно забезпечує гнучкість, адаптивність і інтеграцію складних багатофакторних даних, відкриваючи нові горизонти для формування архітектурного середовища, здатного відповідати на динамічні виклики часу. Впровадження параметричних методів в архітектурну освіту сприяє формуванню нового покоління фахівців, які володіють навичками системного аналізу, цифрового моделювання та екологічної відповідальності. Такі фахівці зможуть не лише ефективно працювати з цифровими інструментами, а й проєктувати середовища, здатні до еволюції й саморегулювання.

У сфері реконструкції історичних середовищ параметрика надає унікальні інструменти для цифрової паспортизації, моделювання стану пам'яток, оптимізації втручань і симуляції сценаріїв ревіталізації з мінімальним ризиком втрати автентичності. Це дозволяє поєднувати збереження культурної спадщини з адаптацією до сучасних функціональних потреб. У контексті муніципального планування параметричне моделювання відкриває шлях до створення динамічних моделей міста, що враховують демографічні, екологічні, транспортні та соціальні змінні в реальному часі.

Особливої актуальності параметричні методи набувають в умовах післявоєнного відновлення урбаністичних структур, коли виникає потреба у швидкому, проте якісному проєктуванні з урахуванням сталого розвитку та інноваційних принципів. Середовище на основі параметричних моделей дозволяє уникати помилок традиційного планування, скорочує часові та фінансові витрати, підвищує прозорість управлінських рішень.

З огляду на сучасні глобальні й локальні виклики – руйнування міської інфраструктури внаслідок збройної агресії, екологічну деградацію, потребу в цифровізації, децентралізацію управління – впровадження параметрики в українську архітектурну практику є не лише актуальним, а й стратегічно необхідним кроком. Її потенціал полягає у поєднанні естетичної виразності, функціональної доцільності й екологічної ефективності в єдиному проектному рішенні.

Список літератури:

1. Ameen M. Y., Kokan G. (2024). A Historical and Critical Assessment of Parametricism as an *Architectural Style in the 21st Century*. Voll. 14(9). URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14092656>.
2. Generative Design – How we are using it in architecture practice today. *Aec+tech*. 2023. URL: <https://www.aecplustech.com/blog/generative-design-how-we-are-using-it-in-architecture-practice-today>.
3. Gerber D. *Parametric Practices: Models for Design Exploration in Architecture*: PhD dissertation. Cambridge, 2007. 511 p.
4. Januszkiewicz K., Kowalski K. G. Parametric Architecture in the Urban Space. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 245. no. 5. P. 3. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052082>.
5. Kvan, T. (2003). Models in the design conversation: architecture vs engineering, design + research: project based research in architecture. URL: https://www.researchgate.net/publication/30871995_MODELS_IN_THE_DESIGN_CONVERSATION_ARCHITECTURE_VS_ENGINEERING_DESIGN_RESEARCH_PROJECT_BASED_RESEARCH_IN_ARCHITECTURE

6. Leung, J. T.M. (2019). Parametric Design Modelling in Urban Art: Approaches and Future Directions. Conference: *Proceedings of the 2019 International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations* (AHTI 2019). URL: https://www.researchgate.net/publication/334257047_Parametric_Design_Modelling_in_Urban_Art_Approaches_and_Future_Directions
7. Maleckas V. (2024). Theoretical Modeling and Methods Devoted to Parametric Architecture Based on Cultural Heritage Identity Codes. *European Journal of Architecture and Urban Planning*. Vol. 3 No. 2. URL: <https://ej-arch.org/index.php/arch/article/view/39>
8. Parametric architecture in it's second phase of evolution / A. Heidari et al. *Journal of Building Performance*. 2018. Vol. 9, no. 1. P. 13-20.
9. Schnabel, M. A., Kvan, T., Kuan, S., Li, W. (2004). 3D Crossover: Exploring Objets Digitalisé. *International Journal of Architectural Computing*. Voll. 2. PP. 476-490. URL: https://www.researchgate.net/publication/250964804_3D_Crossover_Exploring_Objets_Digitalise.
10. Lee, J., Gu, N., Williams, A. (2013). Exploring Design Strategy in Parametric Design to Support Creativity. Conference: *CAADRIA 2013: Open Systems*. PP. 489-498. URL: https://www.researchgate.net/publication/367694280_Exploring_Design_Strategy_in_Parametric_Design_to_Support_Creativity.
11. Malik, T. V., Yemets, O. A. (2022). Vykorystannia parametrychnoho dyzainu v hromadskykh interierakh [The use of parametric design in public interiors]. *Teoriia ta praktyka dyzainu: zb. nauk. prats. Kultura i mystetstvo [Theory and practice of design: collection of scientific works. Culture and art]*. Vyp. 26. S. 167-172. URL: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2022.26.20>
12. Schnabel, M. A. (2006). Architectural Parametric Designing. *Communicating Space(s)* [24th eCAADe Conference Proceedings. Volos (Greece). 6-9 September 2006, PP. 216-221. URL: https://www.researchgate.net/publication/30874782_Architectural_Parametric_Designing
13. Schnabel, M. A. (2008). Parametric Design in Urban Design. ICCCBE-XII ta INCITE. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/255670004_Parametric_Design_in_Urban_Design.
14. Shanghai Houtan Park / Turenscape. URL: <https://www.archdaily.com/131747/shanghai-houtan-park-turenscape>.
15. Fedorova S. GANs for Urban Design. *Computer Vision and Pattern Recognition*. URL: <https://arxiv.org/abs/2105.01727>.
16. Yarosh A. Parametryzm v arkhitekturi [Parametricism in architecture]. URL: <https://nerukhomi.ua/ukr/news/lajfhaki/parametrizm-v-arhitekturi.htm>.
- Yas Marina and Hotel. URL: https://asymptote.net/yas_marina_and_hotel.
17. Vprovadzhennia praktychnoi parametryky v arkhitekturnykh ob'ekтах ta v dyzaini seredovyshcha [Implementation of practical parametric design in architectural objects and environmental design]. URL: <https://www.cult-design.com.ua/param/parametrykya-v-arhitekturnykh-obyektah-ta-dyzajni-seredovyshha/>
18. Foster+Partners. URL: <https://www.fosterandpartners.com/>.
19. Integrated modification methodology. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_modification_methodology.
20. Manzoni J. L., Paz J., Nistal P. From parametric to generative design: The next evolution of Building Information Modelling (BIM). *Build Up*. URL: <https://surl.li/cyhene>.
21. Ochman, W. (2020). Parametric architecture and the Polish-Lithuanian commonwealth: A dialogue between tradition and innovation. *Journal of Architectural Education*, 73(3). PP. 369–381.
22. Dewanjee N. What is Parametric Architecture? URL: https://parametric-architecture.com/what-is-parametric-architecture/?srsltid=AfmBOooiZsxeCnNce_vOe67nQFh2dC1zMSFiE4gOBZrS_kdHA0MFTvzC
23. Blahovestova, O.O., Pechertsev, O.O. (2021). Kharakterni rysy parametrychnoi arkhitektury ta osoblyvosti yii modeliuvannia [Characteristic features of parametric architecture and peculiarities of its modeling]. *Naukovyi visnyk budivnytstva [Scientific Bulletin of Construction]*. Tom 104 № 2. S. 14-20. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/67/67>

24. Pellegrino, C., Shea, K. (2012). Parametric modeling of the Sydney opera house for digital heritage applications. *Proceedings of the 32nd ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. PP. 1131–1140.
25. Al Bahr Towers. URL: <https://www.ahr.co.uk/projects/al-bahr-towers>.
26. The Shed, a Center for the Arts / Diller Scofidio + Renfro. URL: <https://www.archdaily.com/914639/the-shed-a-center-for-the-arts-diller-scofidio-plus-renfro>.
27. The Edge / PLP Architecture. <https://www.archdaily.com/785967/the-edge-plp-architecture>.
28. Revitalizatsiia VDNH [Revitalization of VDNKh]. URL: <https://bcl.com.ua/projects/revitalizaciya-vdng>.
29. The Eastgate Centre. <https://neverenougharchitecture.com/project/the-eastgate-centre/>
30. Vanke Pavilion – Milan Expo 2015 / Studio Libeskind. URL: <https://www.archdaily.com/627994/vanke-pavilion-milan-expo-2015-daniel-libeskind>.
31. Sofilkanych, V. Inkluzyvnist ta dostupnist Art-prostoru Lvivskoi politekhniki [Inclusiveness and accessibility of Lviv Polytechnic Art Space]. URL: <https://lpnu.ua/news/inkluzyvnist-ta-dostupnist-art-prostoru-lvivskoi-polytekhniky>.

Parametric architecture: synthesis of aesthetics, functionality, and environmental efficiency

Marian Andrukhiv

Architectural and Research Department, Blago Company, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID 0009-0008-2446-536X

Abstract: The article explores functionality as one of the basic categories of architectural design, which is acquiring new significance in the context of the digital transformation of architectural practice. The authors emphasize that the traditional understanding of functionality as the rational use of space, ergonomic organization, and regulatory support can no longer respond to the challenges of urban complexity, climate change, new types of social interaction, and hybrid scenarios for the use of architectural space. In this regard, the focus is shifting towards dynamic, adaptive systems capable of changing in space and time in response to a wide range of variables.

Parametric modeling is presented as an innovative approach to architectural design, allowing the design of relationships between form, function, and environment using algorithmic dependencies and variable parameters. This approach opens up the possibility of not only visual but also functional control of the object at the conceptual design stage. The article focuses on how parametric models allow for social scenarios, climatic conditions, user flow dynamics, and facility operating modes to be considered, providing flexibility in space and time.

Examples of contemporary architectural objects illustrate how parametric models enable the integration of adaptive facades, transformable interior spaces, and microclimate control engineering systems. A separate section is devoted to the Ukrainian experience of using parametric methods in reconstruction and urban modeling, which is particularly important in the context of post-war reconstruction.

The paper substantiates the prospects of introducing parametric thinking into architectural education as a tool for forming a new design culture focused on algorithmic, contextual, and interdisciplinary thinking. The article emphasizes that parametric modeling goes beyond a formal tool and becomes a methodological basis for modern sustainable and adaptive architectural thinking.

Keywords: parametric architecture, functionality, adaptability, digital design, sustainable development, urban modeling, intelligent systems, reconstruction.
