

Параметричне моделювання кінетичних та адаптивних фасадних систем

Данило Бачинський, аспірант ¹ (ORCID:0009-0002-8184-3845)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м.Київ, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі представлено комплексний огляд використання параметричного моделювання для проєктування кінетичних та адаптивних фасадних систем у громадських будівлях. Розкрито методологічні принципи алгоритмічного проєктування, описано інструменти моделювання та оптимізації, наведено приклади реалізованих об'єктів у світовій практиці. Показано, що параметричний підхід дозволяє поєднати естетичність і функціональність, підвищуючи енергоефективність та комфорт користувачів.

Ключові слова: кінетична архітектура, параметричне моделювання, адаптивні фасади, алгоритмічний дизайн, енергоефективність.

1. ВСТУП

Сучасні громадські будівлі потребують рішень, здатних швидко реагувати на зміну клімату, інсоляції та функціональних сценаріїв використання. Кінетична архітектура, що інтегрує рухомі елементи в будівельну оболонку, дозволяє адаптувати простір до зовнішніх впливів і підвищувати енергоефективність. Водночас розвиток цифрових технологій дав змогу архітекторам перейти від статичних форм до динамічних систем, у яких форма та поведінка будівлі описуються математичними залежностями. Параметричне моделювання відкриває можливість керувати геометрією фасаду, швидко перевіряти різні сценарії експлуатації та інтегрувати енергоефективні стратегії ще на етапі проєктування. Для України, яка перебуває на етапі масштабного відновлення міського середовища, впровадження таких підходів є актуальним кроком до створення інноваційних і сталих громадських просторів.

2. МЕТА

Метою дослідження є визначення принципів і методів застосування параметричного моделювання для проєктування та оптимізації кінетичних і адаптивних фасадних систем громадських будівель з урахуванням міжнародного досвіду та перспектив впровадження в Україні.

3. МЕТОДОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПАРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИЧНИХ ФАСАДІВ

Параметричне моделювання — це гнучка цифрова методологія, за якої геометрія та поведінка архітектурного об'єкта визначаються системою взаємопов'язаних змінних. Будь-яка зміна параметра, наприклад кута нахилу або швидкості руху фасадної панелі, миттєво перебудовує всю модель, дозволяючи проєктувальникам швидко досліджувати різні сценарії роботи кінетичного фасаду та передбачати його реакцію на кліматичні впливи [1]. Такий підхід важливий для будівель у регіонах зі значними добовими й сезонними коливаннями температури.

Сучасні дослідження доводять, що алгоритмічний дизайн значно підвищує точність та швидкість проєктування. У світовій практиці розроблено методи параметричного аналізу денного освітлення та візуального комфорту, що дозволяють оптимізувати розташування та конфігурацію рухомих елементів фасаду для зменшення перегріву приміщень і економії енергії [1]. Генетичні алгоритми, які імітують природну еволюцію, дають можливість одночасно враховувати кілька критеріїв — від зниження теплових втрат до мінімізації витрат матеріалів — та обирати найкращу комбінацію рішень [2]. Такі алгоритми стали невід'ємною частиною сучасних параметричних інструментів.



Рисунок 1. Алгоритмічна схема роботи параметричної моделі для проєктування кінетичного фасаду(авторська ілюстрація, 2025).

В українському науковому полі тему енергоефективності кінетичних фасадів ґрунтовно проаналізувала Савченко, довівши, що впровадження рухомих елементів і параметрично оптимізованих систем затінення здатне зменшити теплові втрати та скоротити споживання енергії на кондиціонування громадських будівель [3]. Її результати підтверджують доцільність впровадження таких технологій у вітчизняних проєктах і демонструють, як локальні кліматичні дані можна інтегрувати в алгоритмічні моделі для підвищення енергоефективності.

Важливим напрямом розвитку є поєднання параметричних моделей з BIM-середовищами та технологіями цифрового виробництва. Дослідження [4] підкреслюють значення «цифрових двійників», які супроводжують будівлю від концепції до експлуатації, дозволяючи проводити моніторинг стану фасаду й вносити зміни в режимі реального часу. Узагальнену послідовність дій і взаємозв'язок етапів параметричного моделювання демонструє схема зображена на (Рис. 1).

Ключовим інструментом для практичного проектування лишається Rhino/Grasshopper з його системою візуального програмування. Завдяки плагінам Ladybug та Honeybee архітектор може вбудувати кліматичні дані, розрахувати енергетичний баланс і сформувати оптимальні траєкторії руху фасадних елементів. На (Рис. 2) наведено приклад створення у Rhino/Grasshopper параметричного модуля фасаду AlBahar Towers, відомого своєю динамічною системою - «mashrabiya».

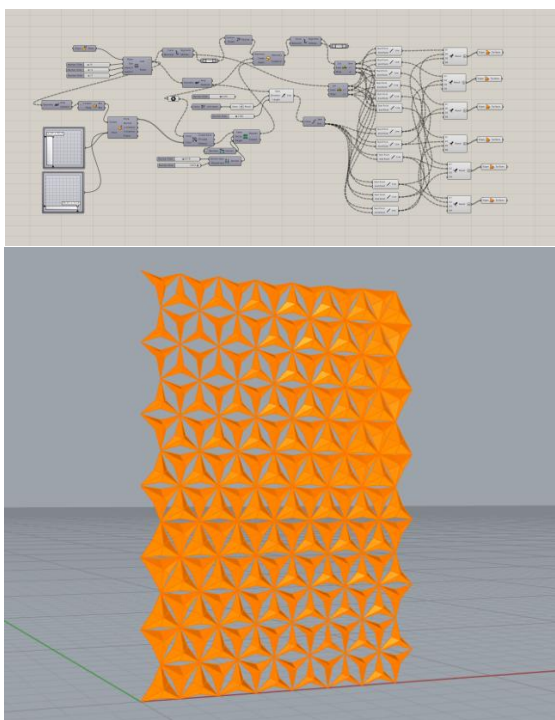


Рисунок 2. Моделювання модуля фасаду Al Bahar Towers у Rhino/Grasshopper (авторська ілюстрація, 2025)

4. ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИЧНИХ ФАСАДІВ

Світова практика підтверджує, що параметричне моделювання є дієвим інструментом для створення кінетичних фасадів. Яскравим прикладом став павільйон One Ocean Pavilion на виставці EXPO 2012 у місті Йосу (Південна Корея), де фасад утворюють 108 лопастей зі склопластику. Кожна лопастя керується індивідуально, реагуючи на напрямок вітру та інтенсивність сонячного випромінювання. Параметрична модель дозволила визначити товщину й гнучкість матеріалу та амплітуду коливань, що забезпечило безпечну роботу конструкції навіть за сильних поривів вітру [5].

Інший приклад — будівля культурно-офісного центру Media-TIC у Барселоні, фасад якої складається з багатошарових подушок ETFE, наповнених інертним газом. Об'єм повітря в подушках автоматично змінюється залежно від температури й сонячного випромінювання, регулюючи прозорість та тепловий захист. Така система дозволяє у реальному часі керувати поведінкою фасаду, оптимізуючи енергоспоживання та зменшуючи потребу в кондиціонуванні приміщень [6].

Цікавий досвід продемонструвала бібліотека Kolding Campus Library у данському місті Колдінг. Динамічні трикутні панелі автоматично регулюють рівень природного освітлення, реагуючи на добові та сезонні коливання інсоляції. Параметричне моделювання забезпечило точний розрахунок швидкості й амплітуди руху кожного елемента, що дало змогу зменшити теплові навантаження та підтримувати стабільний мікроклімат у читальних залах без значних витрат на механічне охолодження [7].

5. ВИСНОВКИ

Виявлено, що параметричне моделювання кінетичних фасадів поєднує алгоритмічні методи проектування та інтеграцію рухомих елементів, що дає змогу будівлям адаптуватися до змінних кліматичних умов і потреб користувачів. Основні тенденції розвитку включають використання генетичних алгоритмів для оптимізації рухомих панелей, застосування сенсорних систем для автоматизованого керування та впровадження цифрових двійників для моніторингу й експлуатації. Аналітичний огляд показав, що такі фасадні системи не лише підвищують енергоефективність, а й створюють динамічну архітектурну виразність, перетворюючи громадські будівлі на «гнучкі» та інтерактивні просторові середовища. Це відкриває нові можливості для архітектурного дизайну та підвищує якість сучасних громадських просторів.

Список літератури

- [1] Tabadkani A., et al. Parametric analysis of day light and visual comfort with sun-responsive shading. *Solar Energy*, 2018.
- [2] Rezakhani M. Genetic Algorithm-Driven Optimization of Pattern for Parametric Façade Design. *Buildings*, 2024.
- [3] Савченко Н.М. Вплив кінетичних фасадів на енергоефективність споруд. Одеса: ОДАБА, 2023.
- [4] Baraboi D.R., et al. Smart 3D-Printed Facades: A Review of Innovations for Adaptive Envelopes. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2025.
- [5] Knippers J., Scheible F., Oppe M., Jungjohann H. Bio-Inspired Kinetic GFRP-Façade for the Thematic Pavilion of the EXPO 2012 in Yeosu. *IASS-APCS Symposium*, 2012.
- [6] Ruiz-García L., et al. Media-TIC building: Adaptive ETFE facade for energy efficiency. *Energy and Buildings*, 2017.
- [7] Nielsen S., et al. Dynamic Façade Optimization at Kolding Campus Library. *Journal of Façade Design and Engineering*, 2019.