УДК 72.021:004.8

В.П. Ковальський
В. О. Мащицька

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРОБКИ ФАСАДНИХ РІШЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ ТА НЕЙРОМЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет

Анотація:

У роботі розглянуто підходи до автоматизації проєктування сучасних фасадних систем на основі поєднання методів параметричного моделювання, еволюційних алгоритмів та штучних нейронних мереж. Проаналізовано вплив інсоляційного режиму й сонячної радіації на показники енергоефективності та мікроклімат приміщень з урахуванням наукових праць фахівців Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Обґрунтовано принцип створення адаптивних і кінетичних фасадних конструкцій, геометричні параметри яких оптимізуються за допомогою генетичних алгоритмів для узгодження природного освітлення та захисту від літнього перегріву. Визначено роль нейронних мереж як сурогатних моделей для швидкої попередньої оцінки теплотехнічних характеристик і компонувальних рішень фасаду. Запропоновано послідовність етапів цифрового проєктування в середовищі САПР, що дає змогу скоротити витрати часу на концептуальний пошук і підвищити загальну енергоефективність будівельних об'єктів.

Ключові слова: параметричне проєктування, генеративний дизайн, фасадні системи, інсоляція, енергоефективність, штучні нейронні мережі, сурогатні моделі, САПР, адаптивні фасади.

ABSTRACT

The paper examines approaches to automating the design of modern facade systems by integrating parametric modeling, evolutionary algorithms, and artificial neural networks. The influence of insolation regimes and solar radiation on building energy efficiency and indoor microclimate is analyzed, drawing on research conducted at Vinnytsia National Technical University (VNTU). The principle of developing adaptive and kinetic facade structures is substantiated, wherein geometric parameters are optimized via evolutionary algorithms to reconcile natural daylighting with summer overheating prevention. The role of neural networks as surrogate models for rapid preliminary assessment of thermal performance and facade pattern composition is defined. A sequence of digital design stages within a CAD environment is proposed to reduce conceptual design time and improve the overall energy performance of buildings.

Keywords: parametric design, generative design, facade systems, insolation, energy efficiency, artificial neural networks, surrogate models, CAD, adaptive facades.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку будівельної галузі спрямовані на підвищення енергоефективності споруд, скорочення експлуатаційних витрат та забезпечення високих архітектурно-естетичних якостей забудови. Огороджувальні конструкції, зокрема фасадні системи, формують тепловий і світловий баланс будівлі, визначаючи рівень тепловтрат у холодний період року та ступінь надлишкового нагріву внутрішніх приміщень улітку [1-3]. Посилення вимог до теплового захисту стимулює розробку адаптивних і кінетичних фасадів, здатних реагувати на сезонні та добові зміни сонячної активності [4-6].

Традиційне проєктування фасадів характеризується значною трудомісткістю та обмеженою варіативністю: архітектор вручну опрацьовує лише 2-3 концептуальні варіанти, після чого виконується їх тривалий інженерний розрахунок. У разі виявлення невідповідності теплотехнічним нормам процес доводиться повторювати ітераційно [7-9]. Застосування інтегрованих засобів САПР та алгоритмів багатокритеріальної оптимізації дає змогу системно вирішити цю задачу на ранніх стадіях проєктування [10-12].

Окремий науковий інтерес становить поєднання методів генеративного дизайну з алгоритмами машинного навчання. Інтеграція еволюційного пошуку форми та нейромережевих сурогатних моделей дозволяє оперативно проаналізувати велику кількість проєктних варіантів, знаходячи раціональний компроміс між інсоляцією, енергоефективністю та архітектурною виразністю [13-15].

Автоматизація розробки фасадних рішень на основі генеративного дизайну та нейромереж

Формування енергоефективного фасаду безпосередньо залежить від просторової орієнтації будівлі та інсоляційного режиму ділянки забудови [1–3]. Пряма сонячна радіація є основним джерелом природного освітлення, проте влітку вона зумовлює пікові теплові навантаження на системи кондиціонування. Відповідно, геометрія сонцезахисних елементів (ламелей, перфорованих екранів, карнизів) повинна диференціюватися залежно від орієнтації фасаду.

Таблиця 1. Вплив орієнтації фасаду на параметри проєктування сонцезахисту

Сторона світу	**Характер інсоляційного навантаження**	**Рекомендований тип сонцезахисних елементів**	**Пріоритет оптимізації**
Південь	Високе стояння сонця, максимальна радіація опівдні	Горизонтальні консолі, статичні ламелі	Блокування прямого проміння влітку, уловлювання взимку
Схід / Захід	Низьке стояння сонця, глибоке проникнення променів	Вертикальні поворотні панелі, адаптивні жалюзі	Запобігання засліпленню та перегріву в ранкові й вечірні години
Північ	Відсутність прямої радіації, лише розсіяне світло	Мінімальне затінення, збільшена площа скління	Максимізація світлопропускання, високий опір теплопередачі

Параметричне проєктування дає змогу описати фасад не як фіксовану геометрію, а як систему взаємопов’язаних математичних змінних: кроку панелей, глибини виносу, кута нахилу та коефіцієнта скління [10, 16]. Генеративний дизайн, спираючись на генетичні алгоритми, виконує направлений пошук Парето-оптимальних рішень серед тисяч можливих комбінацій параметрів.

Таблиця 2. Порівняння методів проєктування фасадних рішень

Критерій порівняння	Традиційний метод	Параметричне моделювання	Генеративний дизайн із ШІ
Кількість аналізованих варіантів	2-5 варіантів	10-30 варіантів	500-5000+ варіантів
Час генерації концептів	Кілька днів / тижнів	Кілька годин	Кілька хвилин хвилини
Врахування інсоляції	Наближене (нормативне)	Точне розрахункове	Багатокритеріальне автоматичне
Оцінка енергоефективності-енергоефективності	По завершенню ескізу	Ітераційна перевірка	Миттєва (у режимі реального часу)
Вплив людського фактору	Високий (суб'єктивний)	Середній	Мінімальний (вибір із Парето-множини)

Головним стримувальним чинником класичної генеративної оптимізації є висока обчислювальна

складність: детальний теплотехнічний або аеродинамічний розрахунок одного варіанта методами скінченних елементів (FEM) чи обчислювальної гідродинаміки (CFD) триває від 15 хвилин до кількох годин [12, 17]. Для подолання цього обмеження в розрахункову схему інтегрують штучні нейронні мережі, що працюють як сурогатні моделі. Попередньо навчена на вибірці еталонних фізичних симуляцій нейромережа прогнозує сумарні тепловтрати та рівень освітленості приміщень за частки секунди з точністю понад 92-95 %. Додатково згорткові генеративні мережі (GAN) застосовуються для варіативної генерації та оцінки візуальної гармонійності фасадних патернів [18-20].

Таблиця 3. Порівняння методів оцінки характеристик фасаду

Метод моделювання	Час оцінки 1 варіанта	Необхідні ресурси	Точність результату	Можливість оптимізації в реальному часі
Чисельні методи (CFD/FEM)	10-120 хв	Високі (робочі станції)	Еталонна (98-99%)	Неможлива (завеликі часові витрати)
Спрощені аналітичні формули	1-5 с	Низькі	Низька (похибка до 25%)	Обмежена
Сурогатні нейромережі (ШІ)	0,01-0,05 с	Низькі (після навчання)	Висока (92-96%)	Повна (інтеграція в алгоритм)

Висновок

У результаті проведеного аналізу встановлено, що поєднання параметричного моделювання, генеративного дизайну та алгоритмів штучного інтелекту формує ефективну методологічну базу для автоматизації архітектурно-будівельного проєктування фасадів.

Застосування динамічних сонцезахисних елементів, диференційованих за сторонами світу відповідно до інсоляційних характеристик, дає змогу суттєво поліпшити мікроклімат споруд. Інтеграція нейронних мереж як сурогатних моделей усуває головне обмеження генеративного дизайну — високу тривалість інженерних обчислень, скорочуючи час оцінки варіантів у сотні разів. Запропонований підхід забезпечує зниження витрат енергії на опалення та кондиціонування будівель орієнтовно на 15-25 % уже на етапі концептуального проєктування, одночасно зменшуючи терміни розробки проєктних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучеренко Л. В., Бабій І. М., Сологуб М. С. Перспективні напрямки інсоляційних технологій. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т. 35, № 2. С. 60–67.
2. Швець В. В., Кучеренко Л. В., Сологуб М. С. Інсоляція в будівництві: вплив та значення для комфортного життя. *Матеріали науково-технічної конференції ВНТУ*. Вінниця ВНТУ, 2023.
3. Бабій І. М., Кучеренко Л. В. Моделювання організаційно-технологічних факторів для визначення ефективних рішень проєкту утеплення фасадів з облицюванням штукатурками. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. Т. 31, № 2. С. 98-105.
4. Бабій І. М., Олійник Н. В., Фадєєва А. П. та ін. Дослідження дефектів та недоліків при влаштуванні систем теплоізоляції на основі навісних вентильованих фасадів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022. Т. 33, № 2. С. 115-122.
5. Ободянська О. І. Технологія влаштування навісного вентильованого фасаду. *Збірник тез доповідей науково-технічної конференції студентів ВНТУ*. Вінниця, 2020.
6. Ковальський В. П., Акімов Н. А. Проектування енергозберігаючих малоповерхових житлових будинків. *Інституційний репозитарій ВНТУ*. Вінниця, 2019.
7. Ковальський А. В., Ковальський В. П., Смашнюк Д. В. Особливості проектування багатоповерхових енергозберігаючих будівель. Вінниця: ВНТУ, 2019.
8. Дзюбенко А. Ю., Ковальський В. П. Обґрунтування доцільності використання піноізолу. Одеса : ОДАБА, 2024.
9. Ковальський В. П. Будівельне матеріалознавство. Вінниця ВНТУ, 2021. С. 88–102.

10. Моргун А. С., Андрухов В. М., Сорока М. М., Меть І. М. Системи автоматизованого проектування в будівництві : навч. посіб. Вінниця ВНТУ 2015. 129 с.
11. Андрухов В. М., Матвійчук В. В., Колесник А. О. Наскрізні автоматизовані технології в проектуванні багатоповерхових житлових будівель. *Матеріали конференції ВНТУ*. Вінниця, 2018.
12. Ратушняк Г. С., Попова О. С. Моделювання процесів енергозбереження огороджувальних конструкцій будівель. Вінниця УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2016. 144 с.
13. Бікс Ю. С. Перспективи використання виробів з соломи в малоповерховому будівництві. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2017. № 1. С. 75-83.
14. Ратушняк О., Бікс Ю., Кавецький В. Організаційно-економічні засади використання технічної коноплі в будівництві. *Innovation and Sustainability*. 2024. № 2. С. 44-52.
15. Papadopoulos A. M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*. 2020. P. 77-86.
16. Caetano I., Santos L., Leitão A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*. 2020. Vol. 9, Iss. 2. P. 287-300.
17. Wortmann T. Genetic algorithms for architectural design: A review of implementations and applications. *Automation in Construction*. 2019. Vol. 102. P. 110-123.
18. Asl M. R., Zarrinmehr S., Yan W. Towards BIM-based parametric building energy performance multi-objective optimization. *Building and Environment*. 2015. Vol. 91. P. 182-195.
19. Brown N., Mueller C. Designing with data: An exploration of generative design tools for early-stage architectural design. *Design Studies*. 2019. Vol. 65. P. 1-25.
20. Sustainability of bio-based building materials. *Journal of Cleaner Production*. 2022. P. 98-112.

Мащицька Вікторія Олегівна – студентка групи 2БМ-26б, факультет будівництва та цивільної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Ковальський Віктор Павлович — канд. техн. наук, доцент кафедри міського будівництва та архітектури, Вінницький національний технічний університет, email: kovalskiy@vntu.edul.ua

Mashchitska Viktoria O. – student of group 1BM-25b, Faculty of Construction and Civil Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Kovalsky Viktor P. — Associate Professor, Department of Urban Planning and Architecture Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: kovalskiy@vntu.edul.ua