

DOI: 10.32347/2076-815x.2026.91.170-178

УДК 721.21

Кордияка Р.М.,

kolisnyk_rm-2022@knuba.edu.ua, orcid: 0009-0002-1178-5387,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ГЕНЕРАТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ФОРМУВАННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ В ІСТОРИЧНО СКЛАДЕНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглянуто особливості застосування параметричних методів при формуванні енергоефективних будівель в умовах історично складеного середовища. У статті також окреслено суть параметризації проєктних змінних для створення операбельних вхідних даних у системі архітектурного проєкту.

У статті описано переваги методу генеративного моделювання, та особливості його взаємодії з багатofакторними чинниками при формуванні енергоефективних будівель, та особливості формалізації проєктних вимог при роботі з історично складеним середовищем. Розглянуто процес формування вибірки потенційних проєктних рішень та їх подальшу оцінку щодо відповідності заданим проєктним вимогам.

Ключові слова: енергоефективні будівлі; історично складене середовище; параметричні методи; генеративне моделювання.

Постановка проблеми. Формування енергоефективних будівель в межах історично складеного середовища є складним завданням, що повинне послуговуватися комплексними мультифункціональними методами, та враховувати широкий спектр взаємопов'язаних параметрів. Йдеться як про потребу забезпечити визначені проєктним завданням окремі просторово-планувальні характеристики проєктованих будівель, так і враховувати існуючі кліматологічні умови середовища та окремі енергетичні показники, а також опиратися на обмеження існуючого історичного контексту, забезпечивши виконання вимог щодо збереження автентичності, масштабу та архітектурного образу середовища. За таких умов, традиційні методи проєктування, що опираються на послідовне прийняття рішень і точкове коригування проєктних параметрів, виявляються недостатньо ефективними, оскільки не здатні достатньо всеохопно оцінити архітектурне середовище як систему.

При роботі з історично складеним середовищем існує потреба формалізувати окремі проєктні вимоги та обмеження, що пов'язані з необхідністю збереження автентичності та історичного характеру середовища.

Водночас, проектування енергоефективних будівель частіш за все спрямоване на досягнення максимального результату у питаннях енергозабезпечення та продуктивності, а застосування тих чи інших практик часто стикатиметься з унеможливленням використання певного типу втручань через обмеження історичного характеру та потенційного порушення цілісності історичного образу.

Перегляд варіативності тих чи інших архітектурних рішень, а також їх безпосередній вплив на окремі чинники та характеристики будівель та оточуючого архітектурного середовища потребують системного, а не фрагментарного дослідження та огляду, що є критично важливим для прийняття обґрунтованих проектних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах сьогодення, підвищення вимог до енергоефективних характеристик будівель є наслідком комплексного впливу кліматичних змін, трансформації енергетичних ринків та посилення екологічних зобов'язань на міжнародному рівні. У Європейському Союзі ці процеси представлено у довгострокових стратегіях, що знайшли відображення у нормативних документах, зокрема у директиві 2018/844/EU [1], що спрямована на підвищення енергоефективності будівель, зокрема через впровадження інтелектуальних систем управління енергозабезпеченням, а також у директиві 2010/31/EU [2], що закладає методологічну основу для оцінки та порівняння параметрів енергетичної продуктивності споруд. Окремі стандарти та норми зокрема формують основу для енергетичного моделювання продуктивних процесів у будівлях, та регламентують методики обчислення енергетичних процесів, як-от ДСТУ EN ISO 52000-1:2023, ДСТУ EN 52016-1:2022 та ДСТУ EN ISO 52003-1:2022.

Базові принципи енергозбереження та оцінки енергетичних характеристик закладено у Законі України «Про енергетичну ефективність будівель» (2017, чинна редакція 2025) [3]. Правові рамки для модернізації історично складеного середовища викладено в Законі України «Про охорону культурної спадщини» (2000, чинна редакція 2025) [4]. Основним документом, що впроваджує підходи до оцінки енергетичних характеристик в Україні є ДБН В.1.2-11:2021 «Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність» [5].

Серед робіт українських науковців та дослідників, що вивчали паарметризацію та моделювання системи енергоефективних будівель, зокрема в контексті історично складеного середовища, слід виділити напрацювання Кащенко Т.О., Сергейчука О.В., Шулдан Л.О, Марттинова В.Л., Чирви Т.Л., Буравенко В.С., Френюк Г.Г. та інших

Серед науковців та практиків, напрям досліджень яких спрямований на дослідження параметричних моделей для оцінки сценаріїв енергетичної

модернізації та аналізу впливу різних комбінацій енергоефективних заходів, із врахуванням специфіки історично складеного середовища, слід виділити Dang M., van den Dobbelen A., Vosculen P., Cronemberger J., Soares R.M., Gigliarelli E., Calcerano F., Caldas L., Cruz A.S., Castro Mendes J. та ін.

Метою публікації є розгляд сучасних параметричних методів, зокрема методу генеративного моделювання, та особливостей генерування множини потенційних архітектурних рішень при формуванні енергоефективних будівель в умовах історично складеного середовища.

Основна частина. Застосування параметричних методів при формуванні енергоефективних будівель в межах історично складеного середовища, дозволяють відійти від обмеженого представлення архітектурного проєкту, та перейти до розуміння його як керованої динамічної системи, що майже миттєво реагує на зміну вхідних даних. Це дає змогу більш ретельно та системно аналізувати вплив окремих факторів на загальні характеристики будівлі та архітектурного середовища вже на ранніх етапах проєктування, а отже отримувати більш ретельний прогностичний результат.

Одним з найбільш перспективних параметричних методів на сьогоднішній день є метод генеративного моделювання, що ґрунтується на створенні множини проєктних варіантів згідно заданих вхідних параметрів, меж їхніх значень, а також окремих правил та обмежень, та подальшої оцінки проєктних рішень для виокремлення тих варіантів, що якнайбільш відповідають поставленим проєктним задачам. Даний метод враховує дуалізм проблеми підвищення енергоефективності архітектурного середовища з вимогою збереження його автентичності [6].

Генеративне моделювання виступає тим інструментом, що дозволяє перевести складну систему взаємопов'язаних вимог та характеристик у структурований набір змінних та обмежень, придатних до аналітичної обробки [7]. Параметризація архітектурних рішень дає змогу формалізувати як просторово-геометричні характеристики новосформованих будівель, так і контекстуальні чинники історично складеного середовища, включно з регламентними обмеженнями, пропорційними співвідношеннями та композицією об'ємів.

При роботі в межах параметричних підходів, архітектурна форма, її геометричні, конструктивні та просторові характеристики визначаються не як фіксовані величини, а як змінні параметри з заданими діапазонами варіацій. В умовах історично складеного середовища генеративне моделювання також дозволяє формалізувати окремі обмеження [6], що впливають з вимог збереження історичного образу, у вигляді чітко визначених параметрів і лімітів. Ці обмеження можуть бути як просторовими, і стосуватися висоти забудови,

пропорцій фасадів, орієнтації об'ємів, взаємодії з навколишніми будівлями, а також стосуватися контекстуальної відповідності, та передбачати допуск у застосуванні тих чи інших матеріалів і конструкцій, а також підтримку артикуляції фасадних осей, синхронізації з регульовальними лініями та формування візуально-функціональної замкнутості внутрішнього простору [7]. Подальша параметризація цих обмежень та інтеграція її у вигляді параметрів у єдину алгоритмічну модель створює підґрунтя для комплексного аналізу проєктних рішень без втрати контролю над історичним контекстом.

На відміну від традиційних методів проєктування, де архітектор вручну коригує значення характеристик в межах архітектурних рішень, і потім оцінює результат, генеративне моделювання передбачає швидке автоматичне формування ітерацій варіантів в межах заданих лімітів, та подальше їх опрацювання та оцінку відповідності згідно первинних проєктних цілей [8]. Таким чином, за допомогою генеративного моделювання можна оцінити значно ширший простір проєктних рішень. Зв'язки поміж геометрією будівель та її енергетичними показниками, параметрами комфорту, а також технічними установками та їх впливом на навколишнє архітектурне середовище часто мають нелінійний характер, при якій зміна одного вхідного параметра призводить до суттєвих змін у показниках, що формують критерії для оцінки енергоефективності проєкту, сукупний результат яких доволі часто складно передбачити інтуїтивно [9].

Формування енергоефективних будівель передбачає оцінку показників, що відображають взаємодію окремих частин будівлі з її навколишнім середовищем та перш за все, з його кліматологічними характеристиками. Генеративне моделювання дозволяє інтегрувати кліматичні параметри безпосередньо у процес проєктування, встановлюючи безпосередній зв'язок геометричних та технологічних характеристик будівлі з умовами її експлуатації [10]. Окремі характеристики будівлі, зокрема орієнтація фасадів, конфігурація об'ємів, співвідношення світлопрозорих елементів до площі фасаду, глибина приміщень, тип огороджуючих конструкцій з конкретним опором теплопередачі, тощо, таким чином, задаються як змінні, що реагують на кут падіння сонячних променів, потенційні зони затінення через навколишню забудову, на радіаційне навантаження тощо, та видає відповідні варіації результатів, що відображають, наприклад, температурні коливання, тривалість та інтенсивність денного освітлення, обсяг енергії для опалення та охолодження і т.д., за тих чи інших проєктних рішень.

Перевагою генеративного моделювання при проєктуванні в умовах історично складеного середовища є можливість ефективного поєднання в проєктному процесі жорстких контекстуальних обмежень з варіативним

пошуком рішень, в межах їх попередньо параметризованих змінних [11]. Логіка алгоритмічної обробки даних дозволяє відразу, на ранніх етапах проектування, виключати ті варіанти, що порушують ключові вимоги щодо збереження історичного контексту архітектурного середовища, при тім, відфільтровувати у подальше опрацювання ті допустимі конфігурації, що матимуть також потенціал з точки зору забезпечення параметрів енергоефективності.

Таким чином, процес генеративного моделювання в архітектурному проектуванні передбачає формування алгоритмічної моделі, що описує взаємозв'язки поміж вхідними проєктними та кліматологічними даними, аналізує задані параметри варіацій архітектурних рішень, та видає результат у вигляді конкретних вихідних характеристик об'єкта.

При генеративному моделюванні, архітектурний об'єкт розглядається як сукупність характеристик, що можуть бути інтерпритовані як параметричні дані, та мати свій потенційний робочий діапазон, відображений у вигляді конкретних лімітів [12]. Кожна така змінна характеристика є так званим «геномом», значення якого відповідає окремому змінному параметру: наприклад, висоті, співвідношенню пропорцій, орієнтації, окремих характеристик огорожуючих конструкцій тощо, та аналізується в межах заданого для нього діапазону, аби проаналізувавши вплив зміни окремих значень, сформувані вибірку конфігурацій архітектурної форми та окремих проєктних рішень.

Таким чином, генеративне моделювання набирає сценарного характеру, оскільки він видає не один кінцевий варіант, а генерує множину потенційних архітектурних рішень, кожне з яких оцінюється згідно відповідності попередньо визначених проєктних цілей. При формуванні енергоефективних будівель в межах історично складеного середовища, це дозволяє формувати вибірку потенційних архітектурних прийомів та проєктних рішень, що будуть проаналізовані як щодо їх впливу на енергофеективні характеристики, так і на відповідність щодо збереження цілісності архітектурного образу історичного середовища.

Висновки.

Формування енергоефективних будівель в межах історично складеного середовища є багатофакторною задачею, що вимагає комплексного підходу та вимагає одночасного врахування як історично-контекстуальних, так і кліматологічних та енергетичних чинників.

Традиційні методи архітектурного проектування, що базуються на лінійній послідовності процесу та інтуїтивності проєктанта у прийнятті рішень, та в обмеженому числі проєктних ітерацій не здатні забезпечити належного рівня опрацювання, через потребу забезпечити якнайбільшу ефективність

архітектурних рішень, в умовах обмежень при роботі в історичному середовищі.

Параметричні методи дозволяють формалізувати обмеження історично складеного середовища у вигляді змінних та лімітів, створюючи підґрунтя для комплексного аналізу потенційних проєктних ітерацій, з можливістю швидкого опрацювання варіацій. За параметричних методів у проєктному процесі будівля виступає динамічною системою, що миттєво реагує на зміну вхідних даних.

Генеративне моделювання є одним з найбільш ефективних серед параметричних методів, оскільки формує множину проєктних рішень на основі попередньо заданих параметрів та обмежень, та проводить їх оцінку на відповідність проєктним цілям. При цьому, виділяються якнайбільш ефективні варіанти, що при тому, при подальших перевірках, не порушують цілісності архітектурного образу історичного середовища. Подальше прийняття проєктних рішень відбувається більш обґрунтовано, оскільки передбачає попередній порівняльний аналіз альтернатив. Враховується не лише ефективність за енергетичними показниками, а й відповідність контекстуальним вимогам та регламенту історичного середовища.

Перевагою генеративного моделювання є не лише дослідження значно ширшої вибірки потенційних проєктних рішень, а й можливість виявити нелінійні зв'язки та залежності поміж формою будівлі, енергетичними показниками, контекстом та умовами середовища. Алгоритмічна логіка генеративного моделювання, при тім, дозволяє одразу відсіяти ті варіанти та конфігурації, що порушують вимоги щодо збереження історично складеного середовища.

Таким чином, генеративне моделювання систематизує складні проєктні взаємозв'язки, забезпечуючи комплексний підхід у проєктуванні та зберігаючи баланс поміж досягненням високої енергоефективності проєкту, та збереженням історичної та культурної цінності середовища.

Список джерел

1. Directive (EU) 2018/844 amending Directive (EU) 2010/31 on the energy performance of buildings and Directive (EU) 2012/27 on energy efficiency (2018) Official Journal L 156, [Electronic resource]. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>
2. Directive (EU) 2010/31 on the energy performance of buildings (2010), Official Journal L 153, [Electronic resource]. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>

3. Про енергетичну ефективність будівель. Закон України 22.06.2017 № 2118-VIII в редакції станом на 03.08.2025 [Electronic resource]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
4. Про охорону культурної спадщини. Закон України від 08.06.2000 № 1805-III у редакції станом на 31.10.2025 [Electronic resource]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text>
5. ДБН В.1.2-11:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність
6. Кащенко Т.О., Кордяка Р.М. Сучасні вимоги до енергоефективної реновації історичних будівель. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. Київ: КНУБА, 2024. Вип. 68. С. 260–267. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.260-267>
7. Dang M., van den Dobbelen A., Voskuilen P. A Parametric Modelling Approach for Energy Retrofitting Heritage Buildings: The Case of Amsterdam City Centre. *Energies*, 2024. Vol. 17. P. 994. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17050994>
8. Chang M., Shih S.G. A Hybrid Approach of Dynamic Programming and Genetic Algorithm for Multi-criteria Optimization on Sustainable Architecture Design. *Proceedings of CAD'14, Hong Kong, June 23–26, 2014*, p. 66–68. DOI: [10.14733/cadconfP.2014.66-68](https://doi.org/10.14733/cadconfP.2014.66-68)
9. Gigliarelli E., Calcerano F., D'Uffizi F., Di Biccari C., Mangialardi G., Campari M. From Heritage BIM to BPS, A Computational Design-Based Interoperability Approach. *Proceedings of Building Simulation 2019, Rome, Italy, 2–4 September 2019*, p. 129–136. DOI: [10.26868/25222708.2019.210442](https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210442)
10. Alexakis K., Benekis V., Kokkinakos P., Askounis D. Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review. *Energy and Buildings*, 2025. Vol. 328, p. 115216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115216>
11. Кащенко Т.О., Колісник Р.М. Методики дослідження стану енергоефективності історичної забудови. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. Київ: КНУБА, 2023. Вип. 65. С. 282 – 290. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.282-290>
12. Freitas J. de S., Cronemberger J., Soares R. M., Amorim C. N. D. Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug. *Renewable Energy*, 2020. Vol. 160, Pp. 1468–1479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.137>

post graduate student **Roksolana Kordyiaka**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

GENERATIVE MODELLING IN THE FORMATION OF ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS IN THE HISTORICALLY BUILT ENVIRONMENT

Annotation text. The formation of energy-efficient buildings within a historically built environment is a challenging task that must use complex multifunctional methods, taking into account a wide range of interrelated parameters. At the same time, the design of energy-efficient buildings is mostly aimed at achieving maximum results in terms of energy supply and productivity, and the application of certain practices will often face the impossibility of using a certain type of intervention due to restrictions on the historical character and potential violation of the integrity of the historical image. The article considers the features of the application of parametric methods in the formation of energy-efficient buildings in the conditions of a historically complex environment. The article also outlines the essence of the parameterization of design variables to create operable input data in the architectural design system. The article describes the advantages of the generative modeling method, and the features of its interaction with multifactorial factors in the formation of energy-efficient buildings, and the features of the formalization of design requirements when working with a historically complex environment. The process of forming a sample of potential design solutions and their further assessment of compliance with the specified design requirements is considered as well.

Keywords: energy-efficient buildings; historically built environment; parametric methods; generative modelling.

REFERENCES

1. Directive (EU) 2018/844 amending Directive (EU) 2010/31 on the energy performance of buildings and Directive (EU) 2012/27 on energy efficiency (2018) Official Journal L 156, [Electronic resource]. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj> {in English}
2. Directive (EU) 2010/31 on the energy performance of buildings (2010), Official Journal L 153, [Electronic resource]. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj> {in English}
3. On Energy Efficiency of Buildings. Law of Ukraine No. 2118-VIII dated 22 June 2017 (as amended on 08 August 2025) [Electronic resource]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> {in Ukrainian}

4. On Protection of Cultural Heritage. Law of Ukraine No. 1805-III dated 08 June 2000 (as amended on 31 October 2025) [Electronic resource]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/1805-14?lang=uk#Text> {in Ukrainian}
5. DNB.1.2.-11 (2021) Basic requirements for buildings and structures. Energy saving and energy efficiency [Osnovni vymohy do budivel' i sporud. Enerhozberezhennya ta enerhoefektyvnist'] {in Ukrainian}
6. Kashchenko, T., Kordyiaka, R. (2024). Suchasni vymogy do enerhoefektyvnoyi renovatsiyi istorychnykh budivel [Modern requirements for energy-efficient renovation of historical buildings]. *Suchasni problemi arhitektury ta mistobuduvannya*. Kyiv: KNUBA, Vip. 68, pp. 260–267. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.260-267> {in Ukrainian}
7. Dang, M., van den Dobbelen, A., Voskuilen, P. (2024). A Parametric Modelling Approach for Energy Retrofitting Heritage Buildings: The Case of Amsterdam City Centre. *Energies*, Vol. 17, p. 994. <https://doi.org/10.3390/en17050994> {in English}.
8. Chang, M., Shih, S.G. (2014). A Hybrid Approach of Dynamic Programming and Genetic Algorithm for Multi-criteria Optimization on Sustainable Architecture Design. *Proceedings of CAD'14, Hong Kong, June 23–26, 2014*, pp. 66–68. <https://doi.org/10.14733/cadconfP.2014.66-68> {in English}
9. Gigliarelli, E., Calcerano, F., D'Uffizi, F., Di Biccari, C., Mangialardi, G., & Campari, M. (2019). From Heritage BIM to BPS, A Computational Design-Based Interoperability Approach. *Proceedings of Building Simulation 2019, Rome, Italy, 2–4 September 2019*, pp. 129–136. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210442> {in English}.
10. Alexakis, K., Benekis, V., Kokkinakos, P., & Askounis, D. (2025). Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review. *Energy and Buildings*, Vol. 328, p. 115216. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115216> {in English}.
11. Kashchenko, T., Kolisnyk, R. (2023). Metodiki doslidzhennya stanu energoefektivnosti istorichnoyi zabudovi. [Methods of researching the state of historical buildings energy efficiency]. *Suchasni problemi arhitekturi ta mistobuduvannya*. Kyiv: KNUBA, Vip. 65. P. 282 – 290. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.282-290> {in Ukrainian}
12. Freitas, J. de S., Cronemberger, J., Soares, R. M., & Amorim, C. N. D. (2020). Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug. *Renewable Energy*, Vol. 160, pp. 1468–1479. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.137> {in English}