

DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2025.72.45-54>

УДК 72.01:721

Дорохіна Ганна Ігорівна,

*кандидат архітектури, доцент кафедри теорії архітектури
Київського національного університету будівництва і архітектури*

dorokhina.gi@knuba.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0003-2348-1743>

Галат Софія Едуардівна,

*аспірантка кафедри теорії архітектури
Київського національного університету будівництва і архітектури*

halat_se-2023@knuba.edu.ua

<https://orcid.org/0009-0005-6295-9246>

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТАНОВЛЕННЯ БІОНІЧНОЇ АРХІТЕКТУРИ

Анотація: У статті досліджуються теоретичні засади біонічної архітектури як самостійного та окремого напрямку в сучасному архітектурному дискурсі. Біонічна архітектура ставить за мету інтеграцію природних процесів у саму логіку архітектурного проектування. Йдеться не про поверхневе копіювання природи, а про засвоєння її глибинних принципів та адаптивних стратегій за для створення інноваційного, сталого та витривалого середовища.

У дослідженні розглядаються філософські, наукові й технологічні основи, що сприяли становленню біоніки як концептуального та практичного підходу. Філософські роздуми про саморегулятивні системи природи, наукові спостереження за біологічною адаптивністю, а також технологічні досягнення в галузях матеріалознавства, обчислень і цифрового виробництва утворюють підґрунтя цього архітектурного напрямку.

Особливу увагу приділено систематизації біонічної архітектури за різними класифікаційними критеріями. Серед них – джерело натхнення (біологічні організми, екосистеми, природні явища), ступінь інтеграції природних принципів (від формальних аналогій до глибокої функціональної інтеграції), функціональні цілі (оптимізація, адаптивність, стійкість, енергоефективність) і типи відтворюваних природних процесів (патерни росту, механізми самовідновлення, динаміка потоків тощо).

Крім того, стаття розглядає біонічну архітектуру в міждисциплінарному контексті, залучаючи синергетику, морфогенез, теорію складності та обчислювальний дизайн. Такий ширший аналітичний підхід підкреслює складність і багатогранність біонічного підходу, а також його потенціал у

трансформації архітектурної практики через глибину симбіозу між штучним середовищем і природними динамічними процесами.

Ключові слова: біонічна архітектура; морфогенез; самоорганізація; синергетика; інтегративні структури.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зміни клімату, ресурсної кризи та перегляду принципів сталого розвитку виникає нагальна потреба у переосмисленні архітектурних підходів. Традиційні методи проєктування вже не забезпечують належної адаптивності, стійкості та ефективності створюваного середовища. У цьому контексті особливого значення набуває біонічна архітектура, яка передбачає не просто наслідування природних форм, а інтеграцію фундаментальних принципів природних процесів у логіку архітектурного проєктування. Однак, попри зростаючий інтерес до цієї тематики, системне осмислення теоретичних основ біонічної архітектури, її класифікаційних критеріїв та міждисциплінарних зв'язків залишається недостатньо опрацьованим у науковому дискурсі. Відтак, актуальним є поглиблене дослідження філософських, наукових і технологічних засад формування біонічної архітектури як окремого напрямку, що має потенціал до трансформації архітектурної практики в бік інтегративного й адаптивного розвитку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Історія біонічної архітектури бере початок ще до введення терміна «біоніка», однак саме дослідження Фрая Отто [1] у XX столітті стали точкою відліку для наукового підходу до природних форм. Його експерименти з мильними плівками та натягнутими поверхнями довели, що природа формує конструктивно ефективні структури, які можуть стати основою архітектури. Це стало основою розуміння архітектурної форми як результату фізичних сил, а не лише творчого задуму.

У вітчизняному науковому полі важливий внесок у розробку біонічної тематики здійснили Жежеря О. М. [2-4], який проаналізував еволюцію біоніки у світовій архітектурі та дизайні XX – початку XXI ст., а також дослідив біонічні засоби формоутворення в сучасному дизайні; Крижанівський О. А. і Співак І. Р. [5], які систематизували біонічні принципи в архітектурі та дизайні на стику практичних і теоретичних підходів.

Ідеї Отто розвинув Майкл Вайнсток [7, 8], запропонувавши теорію морфогенезу — підхід, за яким форма виникає з внутрішньої логіки середовища. Його моделі базуються на біологічних структурах, фракталах, колективній поведінці. У свою чергу, Ахім Менгес сформулював концепцію «матеріальної екології» [9] — форми, що виникають з поведінки матеріалу, моделюваної

цифровими засобами. Це дозволяє створювати структури, що реагують на умови середовища, подібно до живих організмів.

Теоретичну базу підсилили роботи Александра Єнса [10] і Хосе Луїса Бенітеса [11], які розглядають архітектуру як біосистему, що є одночасно фізичною й інформаційною. Бенітес також досліджує можливості цифрового управління змінною архітектурною поведінкою (data-driven design).

Вагомий внесок зробили й Чарльз Дженкс [12] і Герман Хакен [13]. Дженкс підкреслив важливість самоорганізації та складності, а Хакен розробив синергетику — інструмент опису складних систем, який сьогодні застосовується в архітектурному моделюванні.

Нарешті, дослідження Weinstock, Menges, Hensel [14] сформували школу емергентного дизайну, де поєднуються морфогенез, цифрова симуляція, біоінформатика. Їхні проєкти в ICD демонструють, як архітектура може імітувати поведінку природних систем — клітин, тканин, комах.

Сучасна біонічна архітектура — це вже не експерименти, а міждисциплінарна наукова платформа, яка поєднує фізику, біологію, цифрові технології, роботизацію, філософію складності й екологічне мислення. Вона є відповіддю на виклики XXI століття — від енергетичної кризи до потреби в сталих, чутливих до середовища рішеннях.

Метою публікації є системне виявлення теоретичних передумов становлення біонічної архітектури як цілісного напрямку з виокремленням філософських, наукових та класифікаційних засад.

Основна частина. Біонічна архітектура — це не просто стиль, а концептуальна зміна архітектурного мислення, що базується не на евристичних, а на природних алгоритмах самоорганізації, росту та адаптації систем. Це міждисциплінарний підхід, що виник на перетині біології, синергетики, фізики складних систем, кібернетики та цифрового дизайну, і трансформує архітектуру від об'єктного до процесного, від статичного до динамічного.

На відміну від модернізму (функція), постмодерну (семантика) чи параметризму (обчислюваність), біоніка спирається на онтологічне розуміння природи як системи, що саморозвивається. Тут архітектор виступає фасилітатором взаємодії матеріалу, енергії, інформації та середовища, а форма виникає внаслідок цих процесів [15].

Класифікація біонічної архітектури, запропонована у статті (табл. 1), має на меті систематизувати основні вектори, за якими розвивається біонічне мислення в архітектурі. Для створення цієї роботи були застосовані методологічні основи системного аналізу описані Лавриком Г. І. [6]. Класифікація може бути розширена та доповнена протягом подальшого наукового дослідження теоретичних засад біонічної архітектури.

Таблиця 1. Класифікація біонічної архітектури за ключовими критеріями [1-4, 9, 11-15]

Критерій класифікації	Тип біонічної архітектури	Характеристика	Представники/Приклади
За джерелом біологічного натхнення	Механічна біоніка	Імітація механічних властивостей природних форм (стійкість, легкість)	Frei Otto (Olympic Stadium Munich)
	Структурна біоніка	Оптимізація форми через природні принципи розподілу навантажень	Knippers & Speck (ICD/ITKE Pavilion)
	Морфогенетична біоніка	Формоутворення на основі біологічних моделей росту та еволюції	Michael Weinstock (Morphogenesis studies)
За рівнем інтеграції природних процесів	Пасивна біоніка	Імітація природних форм без активної адаптації	Архітектура "натхненна природою"
	Активна біоніка	Вбудована адаптивність та зміна форми залежно від умов	Achim Menges (Adaptive facades)
За функціональною метою	Морфологічна біоніка	Естетична інтерпретація природних форм	Santiago Calatrava (Milwaukee Art Museum)
	Функціональна біоніка	Використання природних принципів для підвищення функціональності	Grimshaw Architects (Eden Project)
За типом процесів	Біоніка самоорганізації	Системи, що самостійно змінюються або еволюціонують	Weinstock (Self-organizing architecture)

Сучасні напрями розширюють потенціал біонічної архітектури у таких сферах:

- 1) 3D-друк із біоматеріалів — створення «живих» оболонок;
- 2) мікробіоніка — фасади, що самовідновлюються;
- 3) сингулярні структури — архітектура як частина кібербіологічної системи міста.

Таким чином, біонічна архітектура постає як нова епістема, де архітектор працює з алгоритмами, матеріалами та середовищем одночасно. Вона є відповіддю на енергетичну кризу, урбаністичну фрагментацію та екологічну деградацію, пропонуючи не форму, а поведінку, не об'єкт, а процес, не образ, а систему.

У біонічній архітектурі ключовим є поняття середовища, у якому «живе» архітектура. За Г. І. Лавриком [5] це середовище охоплює сукупність природних,

техногенних та антропогенних факторів, що визначають умови функціонування та розвитку архітектурного об'єкта (табл. 2). Біоніка, як системний підхід, не ізолює архітектуру від контексту, а розглядає її як частину динамічного середовища, де взаємодіють природа, технології та людина.

Таблиця 2. Фактори, що впливають на формування біонічної архітектури [1-5]

Тип факторів	Зміст	Приклади / Орієнтири
Природні	Клімат, географія, біосфера, природні ресурси, екосистеми	Терморегуляція, біоморфні форми, інсоляція
Техногенні	Матеріали, конструкції, цифрові технології, енергетичні системи	3D-друк, алгоритмічне моделювання, оболонки
Антропогенні	Соціальні потреби, культура, поведінка користувачів, правові норми	Поведінкова архітектура, фасад як інтерфейс

Ці класифікаційні ознаки та фактори разом формують базову модель аналізу біонічної архітектури як системного, багатовимірного підходу до простору, де природа не є об'єктом імітації, а джерелом архітектурної логіки.

Водночас теоретичні передумови, що лягли в основу становлення біонічної архітектури, стають дедалі відчутнішими в конкретних архітектурних практиках. Це проявляється не лише в концептуальному рівні, а й у матеріальних, технологічних та функціональних рішеннях. Сучасна біонічна архітектура втілює кожен із зазначених класифікаційних векторів у формі просторових, конструктивних, екологічних і містобудівних інновацій, які оперують не об'єктом, а взаємодією.

Так, структурна оптимізація в біонічній архітектурі ґрунтується на принципах природного розподілу напружень у живих тканинах. При моделюванні несучих систем враховується спосіб, у який в природі скелети, стовбури дерев чи панцирі адаптуються до змін навантажень, мінімізуючи витрати матеріалу. Такий підхід дозволяє створювати легкі, але надзвичайно міцні конструкції, що формуються не як геометричні об'єкти, а як результат силових полів. Роботи Отто, а пізніше Кніперса і Спека у рамках ICD/ITKE демонструють, як біонічне мислення перетворюється на нову інженерну логіку.

Архітектурна оболонка в біонічній архітектурі не виконує лише роль межі між середовищем і внутрішнім простором — вона стає активною мембраною, що взаємодіє з кліматом, фільтрує, адаптується. Замість традиційних фасадів використовуються структури з поведінковими властивостями, які регулюють проникнення світла, повітря, тепла, як це реалізовано у проєкті Theme Pavilion,

EXPO 2012 Yeosu Korea (рис. 1), де форма фасаду реагує на сонячне опромінення без жодного двигуна (рис. 2).

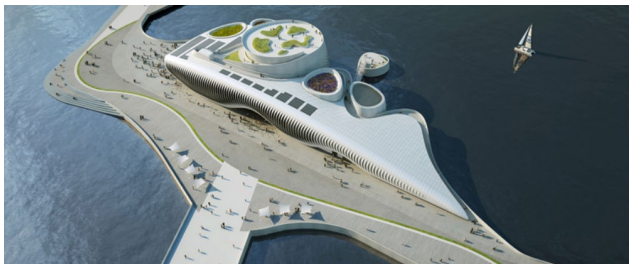


Рис. 1 Theme Pavilion, EXPO 2012 Yeosu Korea. Вид зверху. Бюро: SOMA ZT GmbH Головний архітектор / засновник: Matthias Lohmann

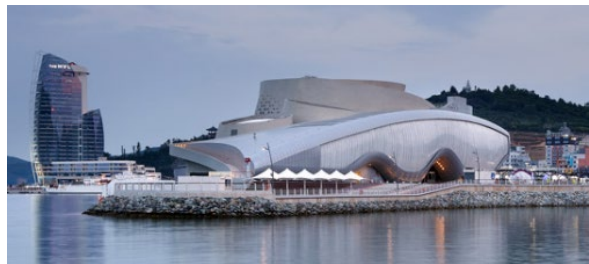


Рис. 2 Theme Pavilion, EXPO 2012 Yeosu Korea. Фасад. Бюро: SOMA ZT GmbH Головний архітектор / засновник: Matthias Lohmann

Біонічне проектування матеріальних систем орієнтоване не на створення матеріалів з фіксованими властивостями, а на їхню змінність. Орієнтація волокон, вологість, пластичність, щільність — усе це моделюється й оптимізується на основі властивостей живих тканин. Застосування подібних принципів дозволяє створювати адаптивні матеріальні системи, в яких функція розподіляється по всьому об'єму, а не прив'язується до окремих елементів. Саме така логіка простежується у роботах Охман з матеріальної екології [16], де функціональність формується не через додаткові технології, а через матеріал як інтелектуальне середовище.

Терморегуляційна ефективність у біонічній архітектурі не копіює окремі механізми з природи, а розглядає енергетичний баланс як систему обміну — подібно до теплообміну між живим організмом і його середовищем. Архітектура більше не протистоїть клімату, а адаптується до нього через зміну форми, текстури, пористості оболонки. Це видно в практиках архітекторів, що використовують алгоритмічні симуляції природного охолодження і вентиляції, зокрема у біонічних павільйонах, які «дихають» і «охолоджуються» природним шляхом [9, 14].

Композиція простору у біонічній архітектурі трансформується: замість осьової, центричної чи модульної структури виникає динамічна топологія, яка змінюється залежно від функції, руху та інсоляції. Простір плине, подібно до розвитку клітинної маси чи міграції потоків у біологічному середовищі, створюючи нові сценарії співжиття людини й архітектури.

На містобудівному рівні замість моделі «вулиця–будівля–площа» з'являється міський організм: кожен елемент функціонує як клітина чи орган, а комунікаційні й інфраструктурні мережі наслідують нейронні чи судинні

системи, оптимізуючи рух, зв'язок і енергопостачання. Окрему роль відіграє естетика біонічної архітектури, що виникає не з композиційного стилю, а з алгоритмів — її краса не задана, а виведена. Подібно до фракталів, спіралей, нелінійних ритмів у природі, архітектурна форма в біоніці має внутрішню гармонію, породжену співвідношенням частин, напруженнями, симетріями, що не є прямолінійними. Це новий тип краси — краси логіки, а не стилізації.

Біонічна архітектура пропонує нове розуміння функції: вона не просто задовольняє потребу, а перебуває у постійній взаємодії з тілом, рухом, ритмами життя. Інтерфейс між людиною і простором у цьому випадку нагадує сенсорні системи живих організмів — він реагує, адаптується, прогнозує. Це формує середовище, в якому користувач не просто мешкає, а стає частиною живої системи — не спостерігачем, а співтворцем.

Усе це свідчить, що біонічна архітектура — це не лише архітектурна відповідь на виклики часу, а й теоретично обґрунтована концептуальна рамка, в якій еволюція, складність, адаптація й саморегуляція утворюють нову парадигму простору. Саме ці теоретичні передумови — біологічні, філософські, інженерні й цифрові — і стали основою становлення біонічної архітектури як однієї з найперспективніших архітектурних моделей XXI століття.

Висновки. Виконане дослідження дозволяє сформулювати низку теоретичних положень щодо становлення біонічної архітектури як цілісного науково-дисциплінарного напрямку. По-перше, біонічна архітектура не є лише стилістичним або образним наслідуванням природи. Її основу становить інтеграція природних процесів — морфогенезу, самоорганізації, структурної оптимізації — в архітектурне проектування. По-друге, джерелами біоніки є синергетика, морфогенез, теорія складності та еволюційні процеси. По-третє, типологічна класифікація виявляє багатовимірність біоніки: за джерелом натхнення, рівнем інтеграції, функціональністю та характером процесів. По-четверте, біонічна архітектура є результатом еволюції мислення про архітектуру — від раціоналізму до складних взаємодій природи, матеріалу та середовища. І нарешті, подальші дослідження мають бути спрямовані на розвиток цифрової біоніки, обчислювальних матеріалів, робототехніки та адаптивних систем.

Список літератури

1. Otto F. Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal. Stuttgart: Edition Axel Menges, 1995. 128 p.
2. Жежеря О. М. Біоніка у світовій архітектурі та дизайні XX – поч. XXI ст. // Ukrainian Art Discourse. 2023. № 6. С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.32782/uad.2023.6.4>
3. Жежеря О. М. Біонічні засоби формоутворення в сучасному дизайні // Вісник Львівської національної академії мистецтв. 2021. Вип. 46. С. 114–122.
4. Жежеря О. М. Біоніка у світовій архітектурі та дизайні XX – поч. XXI ст. // Ukrainian Art Discourse. 2023. № 6. С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.32782/uad.2023.6.4>
5. Крижанівський О. А., Співак І. Р. Біонічні принципи в архітектурі та дизайні // Теорія та практика дизайну. 2023. Вип. 29–30. С. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2023.29-30.8>
6. Лаврик Г. І. Основи системного аналізу в архітектурних дослідженнях і проектуванні : підручник для студ. вищ. навч. закладів. – Київ : КНУБА, 2002. – 200 с.
7. Weinstock M. Morphogenesis and the Mathematics of Emergence // Architectural Design. 2004. Vol. 74, No. 3. 10–17 p.
8. Weinstock M. Morphogenesis and the Mathematics of Emergence // Architectural Design. 2004. Vol. 74, No. 3. 10–17 p.
9. Menges A. Integral Computational Design for Integrative Material Systems // Architectural Design. 2012. Vol. 82, No. 2. 56–63 p.
10. Jens A. Bionic Architecture: Learning from Nature. Basel : Birkhäuser, 2012. 160 p.
11. Benítez, J. L. (2018). Bionics and Architecture: Intersections and Innovations. Cham: Springer. 251 p.
12. Jencks Ch. The Architecture of the Jumping Universe: A Polemic: How Complexity Science is Changing Architecture and Culture. London : Academy Editions, 1995. 128 p.
13. Haken H. Synergetics: An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology. Berlin : Springer, 1983. 356 p.
14. Hensel M., Menges A., Weinstock M. Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture. London : Routledge, 2010. 208 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315881294>
15. Rasch B., Otto F. Form Follows Nature: Eine Geschichte der Bionik in der Architektur. Stuttgart : Edition Axel Menges, 2006. 192 p.
16. Oxman N. Material Ecology // Design Issues. 2021. Vol. 37, No. 1. 83–84 p. DOI: https://doi.org/10.1162/desi_r_00626

References

1. Otto, F. (1995). *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. Stuttgart: Edition Axel Menges. (in English)
2. Zhezheria, O. M. (2023). Bionika u svitovii arkhitekturi ta dyzaini XX – poch. XXI st. [Bionics in World Architecture and Design of the 20th – Early 21st Centuries]. *Ukrainian Art Discourse*, (6), 45–52. DOI: <https://doi.org/10.32782/uad.2023.6.4> (in Ukrainian)
3. Zhezheria, O. M. (2021). Bionichni zasoby formoutvorennia v suchasnomu dyzaini [Bionic Means of Form Creation in Contemporary Design]. *Visnyk Lvivskoi natsionalnoi akademii mystetstv* [Bulletin of the Lviv National Academy of Arts], (46), 114–122. (in Ukrainian)
4. Kryzhanivskiyi, O. A., & Spivak, I. R. (2023). Bionichni pryntsypy v arkhitekturi ta dyzaini [Bionic Principles in Architecture and Design]. *Teoriia ta praktyka dyzainu* [Theory and Practice of Design], (29–30), 72–81. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2023.29-30.8> (in Ukrainian)
5. Lavryk, H. I. (2002). *Osnovy systemnoho analizu v arkhitekturnykh doslidzhenniakh i proiektuvanni* [Fundamentals of Systems Analysis in Architectural Research and Design] (Pidruchnyk dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv [Textbook for University Students]). Kyiv: KNUBA. (in Ukrainian)
6. Weinstock, M. (2004). Morphogenesis and the mathematics of emergence. *Architectural Design*, 74(3), 10–17. (in English)
7. Menges, A. (2012). Integral computational design for integrative material systems. *Architectural Design*, 82(2), 56–63. (in English)
8. Jens, A. (2012). *Bionic Architecture: Learning from Nature*. Basel: Birkhäuser. (in English)
9. Benítez, J. L. (2018). *Bionics and Architecture: Intersections and Innovations*. Cham: Springer. (in English)
10. Jencks, C. (1995). *The Architecture of the Jumping Universe: A Polemic: How Complexity Science is Changing Architecture and Culture*. London: Academy Editions. (in English)
11. Haken, H. (1983). *Synergetics: An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Berlin: Springer. (in English)
12. Hensel, M., Menges, A., & Weinstock, M. (2010). *Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture*. London: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315881294> (in English)
13. Rasch, B., & Otto, F. (2006). *Form Follows Nature: Eine Geschichte der Bionik in der Architektur*. Stuttgart: Edition Axel Menges. (in German)

14. Oxman, N. (2021). Material ecology. *Design Issues*, 37(1), 83–84. DOI: https://doi.org/10.1162/desi_r_00626 (in English)

Abstract

Hanna Dorokhina, Doctor of Philosophy, Department of Architectural Theory, Kyiv National University of Construction and Architecture

Sofiia Halat, postgraduate student, Department of Architectural Theory, Kyiv National University of Construction and Architecture

Theoretical foundations of the formation of bionic architecture

The article explores the theoretical foundations of bionic architecture as an independent and distinct direction within contemporary architectural discourse. Bionic architecture aims to integrate natural processes into the very logic of architectural design. This is not about superficial imitation of nature, but rather the assimilation of its fundamental principles and adaptive strategies to create innovative, sustainable, and resilient environments.

The study examines the philosophical, scientific, and technological underpinnings that have contributed to the formation of bionics as both a conceptual and practical approach. Philosophical reflections on self-regulating systems in nature, scientific observations of biological adaptability, and technological advancements in materials science, computation, and digital fabrication form the basis of this architectural paradigm.

Particular attention is given to the systematization of bionic architecture through various classification criteria, including the source of inspiration (biological organisms, ecosystems, natural phenomena), the degree of integration of natural principles (from formal analogies to deep functional integration), functional objectives (optimization, adaptability, sustainability, energy efficiency), and the types of replicated natural processes (growth patterns, self-repair mechanisms, flow dynamics, etc.).

Furthermore, the article positions bionic architecture within an interdisciplinary context, drawing on synergetics, morphogenesis, complexity theory, and computational design. This broader analytical approach highlights the complexity and multifaceted nature of the bionic method, as well as its potential to transform architectural practice through a profound symbiosis between the built environment and natural dynamic processes.

Keywords: bionic architecture; morphogenesis; self-organization; synergetics; integrative structures.