

УДК 72.01:004.94+519.17

Усенко В. Г.

*доктор технічних наук, професор кафедри будівництва та цивільної інженерії
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

valery_usenko@ukr.net

orcid.org/0000-0002-4937-6442

АДАПТИВНІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ТОПОЛОГІЧНОЇ ЗВ'ЯЗНОСТІ В АРХІТЕКТУРНИХ СИСТЕМАХ

© Усенко В. Г., 2025

<https://doi.org/10.32347/2519-8661.2025.33.300-305>

Анотація. У статті досліджується подальший розвиток концепції топологічної та функціональної зв'язності в архітектурних структурах через призму цифрового моделювання. Основна увага зосереджена на застосуванні алгоритмічних методів, параметричного дизайну та цифрових двійників для аналізу адаптивності простору. Запропоновано новий підхід до моделювання змін топологічних зв'язків у динамічному середовищі, з урахуванням зовнішніх впливів та сценаріїв використання. Результати сприяють розвитку гнучких архітектурних рішень, здатних до самоконфігурації й стійкого функціонування при змінних умовах.

Методологічні засади цифрового аналізу топологічної та функціональної зв'язності архітектурних структур розглянуто з позицій сучасного параметричного моделювання. Особливу увагу приділено формалізації просторових взаємозв'язків у вигляді графів, де вузли представляють просторові одиниці, а ребра — функціональні або навігаційні зв'язки. Обґрунтовано доцільність застосування графових метрик (центральність, кластеризація, щільність, середня довжина шляху) для кількісної оцінки ефективності конфігурацій простору.

Запропоновано новий підхід до аналізу адаптивності архітектурного середовища на основі динамічних цифрових моделей, що інтегрують інформацію про геометрію, сценарії використання та поведінкові патерни користувачів. У роботі продемонстровано, як симуляція змін просторових зв'язків — через додавання, видалення або переконфігурування елементів графа — дозволяє прогнозувати ефекти на навігацію, доступність і комунікаційні властивості середовища.

Інструментальна реалізація виконана з використанням програмних середовищ Grasshopper і Space Syntax Toolkit. Результати дослідження мають прикладне значення для проектування стійких і гнучких архітектурних рішень, зокрема в контексті житлового, громадського та урбаністичного планування. Представлена модель функціонує не лише як аналітичний засіб, а й як прогностичний інструмент для створення реактивних архітектурних систем нового покоління.

Ключові слова: архітектурна структура, комунікаційні зв'язки, взаємозалежність елементів, цифровий двійник, топологічна адаптивність, параметричне моделювання.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження полягає у розробці методів аналізу та оптимізації структурної зв'язності, що дозволить створювати ефективні, адаптивні та стійкі архітектурні системи. У попередньому дослідженні було сформульовано теоретичні засади

типологізації залежностей між архітектурними елементами. Проте наявні методи аналізу недостатньо враховують змінність середовища й потребу в динамічній перебудові структури без втрати її функціональної цілісності. Це особливо актуально у зв'язку з розвитком цифрових інструментів проектування, що відкривають можливості для глибшої інтеграції змінюваних сценаріїв у процес моделювання архітектурного середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед вагомих теоретичних основ, що вплинули на сучасне розуміння архітектурного проектування, слід відзначити концепцію «мови шаблонів», представлену в праці [1]. У ній акцентовано на важливості узгодженості, повторюваних рішень та гармонії в організації архітектурного середовища, що створює структурну єдність між елементами простору. Дослідження [2] розглядає архітектурні конфігурації крізь призму теорії графів, що дозволяє формалізувати просторові взаємозв'язки між приміщеннями, аналізувати їхню морфологію та виявляти залежності, що впливають на енергоспоживання. Цей підхід є важливою складовою формування принципів сталого проектування. Водночас актуальним є застосування математичних моделей для аналізу архітектурних структур. Використання графових методів у цьому контексті сприяє глибшому розумінню логіки планувальних рішень і оптимізації взаємного розташування функціональних зон. Графи виступають ефективним інструментом дослідження топологічних та функціональних властивостей середовища.

У межах цифрового моделювання архітектурних процесів особливу увагу привертає підхід, що ґрунтується на функціональних граматиках, розкритий у публікації [3]. Автор описує формальні правила та алгоритмічні методи генерації просторових форм, які дозволяють систематизувати процес прийняття проектних рішень. Такий підхід є ключовим у розвитку напрямку обчислювальної архітектури. Питання впливу створеного середовища на життєдіяльність людини розглядається у роботі В. Усенка та співавторів [4], де проаналізовано техногенні, соціальні та екологічні чинники формування штучного простору. Ці аспекти мають безпосередній вплив на фізіологічний і психологічний комфорт користувачів.

У ширшому культурному контексті важливим є дослідження [5], яке простежує, як культурні кліше трансформуються в архетипи, що формують колективне сприйняття та комунікаційні практики. Ці явища прямо впливають на інтерпретацію архітектурних образів і середовищ. У публікаціях [6] та [7] подано ґрунтовний огляд системного підходу як методології моделювання, аналізу та оптимізації складних структур у різних галузях, зокрема в архітектурному проектуванні. Автори описують концепції багаторівневої абстракції, управління інформаційною складністю, прийняття рішень в умовах невизначеності, що є релевантним для сучасного проектного мислення.

Мета статті. Розробити та обґрунтувати метод цифрового аналізу топологічної та функціональної зв'язності архітектурного середовища на основі параметричного моделювання, з урахуванням сценаріїв використання простору та змін його конфігурації для підвищення адаптивності й ефективності архітектурних рішень.

Виклад основного матеріалу. Геометричні та структурні параметри архітектурних об'єктів безпосередньо впливають на їхню стійкість, візуальну виразність та ергономічні властивості. У архітектурній практиці переважає використання евклідових геометричних форм, що характеризуються чіткими лініями, симетрією та простотою конструктивного втілення. Ці форми забезпечують зручність проектування, функціональність та раціональне використання простору. У сучасній архітектурі спостерігається зростаючий інтерес до неевклідової геометрії, яка дозволяє формувати складні криволінійні поверхні та об'ємні структури. Застосування таких геометричних рішень сприяє підвищенню просторової адаптивності, покращенню комфортності середовища та розширенню естетичних можливостей архітектурної композиції.

Геометричні залежності стосуються просторових параметрів, які визначають взаємне розташування об'єктів. До таких характеристик належать відстані між елементами, кутові співвідношення, масштабні пропорції, орієнтація в просторі, а також ступінь взаємопроникнення форм. Вони безпосередньо впливають на композицію, сприйняття структури та її відповідність

антропометричним вимогам. Топологічні залежності відображають зв'язність, суміжність і логічну доступність елементів незалежно від їхніх розмірів або форми. Такі характеристики є визначальними для організації переміщень, структури проходів і ступеня взаємної досяжності функціональних зон. Особливого значення ці аспекти набувають у застосуванні методів спейс-синтаксичного аналізу, який дозволяє оцінити інтегрованість окремих ділянок простору в межах ширшої архітектурної або урбаністичної структури. Функціональні залежності описують взаємодію між просторами згідно з їхнім призначенням. Вони зумовлюють логіку розміщення приміщень та взаємозв'язок між ними з урахуванням сценаріїв використання. Наприклад, у медичних закладах операційні блоки повинні безпосередньо межувати з палатами інтенсивної терапії для забезпечення швидкого доступу, тоді як у навчальних установах послідовність розташування аудиторій має враховувати потоки студентського переміщення протягом дня. Узгоджене використання різних типів залежностей у процесі проектування дозволяє формувати ефективні, зручні та адаптивні архітектурні системи, що відповідають сучасним функціональним, естетичним і експлуатаційним вимогам.

Просторове розташування елементів архітектурної системи суттєво впливає на їхні функціональні характеристики, зумовлюючи характер взаємодії між зонами, рівень їхньої доступності, зв'язності та комунікативного потенціалу. Відповідна конфігурація проходів, перегородок, дверних прорізів визначає можливості організації руху користувачів, впливає на сценарії експлуатації та функціональне зонування. Зміна геометрії внутрішніх маршрутів — зокрема, шляхом перепланування стін або перенесення входів — здатна трансформувати просторові взаємозв'язки між приміщеннями, змінити напрямки потоків переміщення та спричинити переосмислення призначення окремих ділянок простору, а також вплинути на їхнє візуальне та психологічне сприйняття.

Одним із визначальних аспектів функціональної організації архітектурного середовища є ступінь зв'язності між приміщеннями, що відображає рівень їхньої взаємодії та взаємної доступності. Просторове відокремлення окремих зон внаслідок порушення внутрішніх сполучень (наприклад, перекриття проходів, встановлення додаткових перегородок) може призвести до їхньої ізоляції та трансформації функціонального призначення. Зокрема, перехід від відкритого планування до фрагментованої структури обмежує мобільність користувачів, ускладнює переміщення та змінює характер експлуатації приміщень.

Натомість відновлення або цілеспрямоване посилення просторових зв'язків між функціональними блоками сприяє покращенню комунікаційних характеристик середовища, полегшує навігацію, забезпечує більшу гнучкість у використанні площі та підвищує рівень ергономіки. У контексті житлового проектування це, зокрема, проявляється в ефективній взаємодії між кухнею, їдальнею та вітальнею, що дозволяє формувати інтегрований простір спільного користування. У громадських будівлях оптимальний рівень зв'язності є критично важливим для розробки евакуаційних маршрутів, планування логістичних ланцюгів та організації потоків користувачів у межах складних багатофункціональних об'єктів.

Методологія цифрової моделі архітектурної структури будується у вигляді графа, де вузли — це просторові блоки, а ребра — топологічні зв'язки між ними. Розглянемо методологію побудови цифрової моделі архітектурної структури у вигляді графа. Ця модель є ефективним інструментом аналізу топологічної зв'язності. У ній моделі вузли (вершини) відповідають просторовим одиницям — приміщенням, зонам, функціональним блокам, а ребра (зв'язки) — можливим маршрутами переміщення, візуальним зв'язкам або логічним переходам між ними. Графи можуть бути орієнтованими, якщо враховується напрямок руху (наприклад, вхід/вихід), або неорієнтованими, коли зв'язок двосторонній. Ваги ребер можуть позначати фізичні характеристики (відстань, ширина проходу), часові (тривалість переходу), енергетичні (зусилля, необхідне для переміщення) або соціальні (кількість взаємодій між користувачами).

Імітація змін у середовищі (наприклад, закриття проходу чи перенесення функції) реалізується шляхом додавання, видалення або зміни ваги ребер. Таке переконфігурування дозволяє аналізувати вплив змін на всю структуру, виявляти ізольовані зони або оцінювати ефективність альтернативних

шляхів. Для кількісної оцінки ефективності та адаптивності просторових конфігурацій використовуються низка топологічних метрик, що базуються на аналізі структури графа. Середня довжина шляху (Average Path Length) визначає середню кількість кроків, необхідних для переходу між будь-якими двома вузлами в системі. Чим менше це значення, тим ефективніше організована структура переміщення. Оцінка зручності навігації в будівлі може бути застосовна в оптимізації розташування ключових функціональних зон. Центральність вузлів (Node Centrality) показує важливість кожного вузла в загальній системі зв'язків. Існують різні типи центральності (ступенева, наближення, посередництва), які оцінюють роль вузла як пересувного центру, комунікаційного посередника або локального хабу. Виявлення місць з найвищим навантаженням корисне для планування зон загального користування або сервісних блоків.

Коефіцієнт кластеризації (Clustering Coefficient) визначає, наскільки вузли схильні утворювати локальні групи зі щільними внутрішніми зв'язками. Це свідчить про потенціал для утворення автономних підсистем у аналізі соціальної взаємодії в офісах, навчальних закладах, торгових центрах, проектуванні груп приміщень з локальною функціональною єдністю. Щільність графа (Graph Density) відображає відношення кількості наявних зв'язків до максимально можливої кількості зв'язків між вузлами. Чим вища щільність, тим більше альтернативних маршрутів і менша залежність від окремих вузлів. Цей показник потрібний для оцінювання стійкості архітектурної мережі, планування систем з високою доступністю й відмовостійкістю.

У таблиці 1 наведено основні топологічні метрики, які застосовуються для аналізу просторової організації архітектурного середовища на основі графових моделей. Кожна метрика описує певний аспект зв'язності та має практичне значення у проектуванні адаптивних і стійких архітектурних систем.

Таблиця 1.

Метрики графового аналізу архітектурної структури

Метрика	Опис	Практичне застосування
Середня довжина шляху	Середня кількість кроків між будь-якими двома вузлами	Навігація, оптимізація переміщень
Центральність вузлів	Визначає ключові точки в системі зв'язків	Розміщення хабів, сервісних зон
Коефіцієнт кластеризації	Оцінює щільність локальних підмереж	Групування зон, соціальна організація
Щільність графа	Показує насиченість зв'язків у всьому графі	Стійкість системи, альтернативні маршрути

Зазначені метрики є основою для аналізу простору, дозволяючи кількісно описати складність, гнучкість і ефективність архітектурної структури, а також прогнозувати вплив змін у конфігурації на загальну функціональність.

У практиці моделювання використовуються середовища Grasshopper + Space Syntax Toolkit, які дозволяють будувати й аналізувати архітектурні графи в інтерактивному режимі. Це забезпечує можливість створення реактивних структур, які автоматично адаптуються до заданих параметрів, що змінюються в реальному часі. Цей підхід не лише покращує якість проектних рішень, а й відкриває шлях до створення адаптивного, гнучкого та аналітично обґрунтованого архітектурного середовища. Зміни у функціональних сценаріях імітуються шляхом динамічного переконфігурування ребер графа. Кожна ітерація такого переконфігурування оцінюється за допомогою метрик ефективності: середня довжина маршруту, кількість ізольованих вузлів, коефіцієнт взаємодії зон. Використання інтерактивних цифрових моделей архітектурного середовища, які відтворюють структурні,

функціональні та поведінкові характеристики об'єкта в реальному або прогнозованому часі, відкриває нові можливості для аналізу та прогнозування просторових трансформацій.

Моделі цього типу базуються на комплексі даних, що включають інформацію про геометрію об'єкта, аналітику переміщення, сценарії експлуатації та соціальні патерни взаємодії користувачів із середовищем. Вони використовуються як на етапі проектування, так і в процесі управління архітектурними структурами, забезпечуючи гнучкий інструмент для прийняття рішень та підвищення ефективності організації простору. Моделі можуть "вчитися" з історичних даних переміщення, створюючи гіпотетичні сценарії майбутніх конфігурацій. Це дозволяє архітектурним об'єктам реагувати на навантаження, інтенсивність використання, або навіть поведінкові моделі користувачів.

Висновки. Розвиток методів цифрового моделювання відкриває новий рівень у дослідженні топологічної зв'язності архітектурних структур. Поєднання графового аналізу, параметричних інструментів та сценарного підходу дозволяє створювати адаптивні, стійкі та взаємозалежні простори. Такі моделі є не лише аналітичними, але й прогностичними інструментами для архітекторів нового покоління.

Бібліографія

1. Александер, К. (2020). *Як будувати на віки. Архітектура поза часом* (пер. Микола Климчук). Київ: Основи. ISBN 978-966-500-864-4.
2. Steadman, P. (1973). Graph-theoretic representation of architectural arrangement. *Architectural Research and Teaching*, 2(3), 161–172.
3. Mitchell, W. J. (1991). *Functional grammars: An introduction*. MIT Press.
4. Usenko, V., Zinenko, T., & Zinenko, A. (2018). Research features of the artificial environment of human vital activity. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 555–558. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14588>
5. McLuhan, M., & Watson, W. (2011). *From Cliché to Archetype*. Gingko Press.
6. Klir, G. J. (1985). *Architecture of systems problem solving*. Plenum Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9224-6>
7. Dekkers, R. (2014). *Applied Systems Theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10846-9>

Bibliography

1. Alexander, C. (2020). *The Timeless Way of Building* (trans. Mykola Klymchuk). Kyiv: Osnovy. ISBN 978-966-500-864-4.
2. Steadman, P. (1973). Graph-theoretic representation of architectural arrangement. *Architectural Research and Teaching*, 2(3), 161–172.
3. Mitchell, W. J. (1991). *Functional grammars: An introduction*. MIT Press.
4. Usenko, V., Zinenko, T., & Zinenko, A. (2018). Research features of the artificial environment of human vital activity. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 555–558. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14588>
5. McLuhan, M., & Watson, W. (2011). *From Cliché to Archetype*. Gingko Press.
6. Klir, G. J. (1985). *Architecture of systems problem solving*. Plenum Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9224-6>
7. Dekkers, R. (2014). *Applied Systems Theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10846-9>

Valery Usenko

*Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building and Civil Engineering
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”*

valery_usenko@ukr.net

orcid.org/0000-0002-4937-6442

ADAPTIVE APPROACHES TO TOPOLOGICAL CONNECTIVITY ANALYSIS IN ARCHITECTURAL SYSTEMS

© Usenko V.H., 2025

Abstract. *This article explores the further development of the concept of topological and functional connectivity in architectural structures through the lens of digital modeling. The primary focus is on the application of algorithmic methods, parametric design, and interactive digital modeling environments to analyze the spatial adaptability of architectural systems. A new approach is proposed for simulating changes in topological connections within dynamic environments, taking into account external influences and usage scenarios. The results contribute to the advancement of flexible architectural solutions capable of self-reconfiguration and stable functioning under variable conditions.*

The methodological foundations of digital analysis of topological and functional connectivity in architectural structures are considered from the standpoint of contemporary parametric modeling. Particular attention is paid to the formalization of spatial relationships in the form of graphs, where nodes represent spatial units and edges denote functional or navigational connections. The paper substantiates the relevance of using graph-based metrics—such as centrality, clustering, density, and average path length—for quantitative assessment of spatial configurations.

A novel approach is introduced for analyzing the adaptability of architectural environments using dynamic digital models that integrate data on geometry, usage scenarios, and user behavior patterns. The study demonstrates how simulating changes in spatial connections—through the addition, removal, or reconfiguration of graph elements—enables the prediction of effects on navigation, accessibility, and communication efficiency within the environment.

The proposed framework is implemented using Grasshopper and the Space Syntax Toolkit. The results have practical significance for designing resilient and flexible architectural solutions, particularly in the context of residential, public, and urban planning. The model serves not only as an analytical tool but also as a predictive instrument for creating responsive architectural systems of the next generation.

Keywords: *architectural structure, communication links, element interdependence, interactive digital modeling, topological adaptability, parametric modeling.*