

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СОБОЛЬ ДЕНИС ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 69.003:69.05:004.94:620.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНСТРУМЕНТАРІЙ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЦИФРОВОГО СУПРОВОДУ
ЕНЕРГОАДАПТИВНИХ ПРОЄКТІВ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Д.В.Соболь

Науковий керівник: Приходько Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту в будівництві Київського національного університету будівництва та архітектури

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Соболь Д.В. - Інструментарій організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». — Київський національний університет будівництва і архітектури. — Київ, 2026.

Дисертацію присвячено розробці інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів, спрямованого на інтеграцію сучасних цифрових технологій із управлінськими та технологічними рішеннями у будівництві. Запропонований науково-прикладний комплекс орієнтований на застосування в умовах енергоощадних девелоперських проєктів. Концептуальною основою дослідження виступає цифрова енергоадаптивна модель організації будівництва, що забезпечує поєднання високої точності планування із можливостями цифрової координації процесів.

Нагальність проведення дослідження обумовлена комплексом чинників, серед яких — потреба у підвищенні енергоефективності та цифрової зрілості будівельної галузі в умовах модернізації та післявоєнного відновлення, а також зростання значущості енергоадаптивних девелоперських проєктів як пріоритетного напрямку сталого розвитку, що поєднує економічну доцільність, екологічність і соціальну відповідальність. Вимагає уваги й необхідність переорієнтації організаційно-технологічних моделей на цифрові принципи управління та ресурсозбереження, що актуалізує створення нового науково-практичного інструментарію. Інтегрування цифрових технологій — BIM-моделювання, аналітики даних, систем автоматизованого моніторингу — з відновлюваними джерелами енергії забезпечує підвищення точності планування, узгодженості рішень та ефективності девелоперського процесу. Таким чином, поєднання потреб у цифровізації та енергоощадності визначає

об'єктивну необхідність розробки інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів.

У першому розділі дисертації сформовано сучасні концептуально-теоретичні орієнтири організації будівництва в умовах реалізації енергоадаптивних девелоперських проєктів. У межах розділу здійснено системне узагальнення наукових підходів до трактування понятійного апарату будівельного девелопменту, уточнено зміст ключових категорій і поглиблено розуміння сутності цифрово-керованої, енергоадаптивної організаційно-технологічної моделі, яка розглядається як базис формування новітніх виробничо-управлінських рішень. Особливу увагу приділено визначенню взаємозалежностей між інформаційними, енергетичними та технологічними характеристиками сучасного будівництва, що дозволило обґрунтувати принципи їх інтеграційної взаємодії в межах єдиного цифрового контуру управління. Концептуальні положення розділу ґрунтуються на засадах сталого розвитку, цифрової трансформації галузі та енергоменеджменту як ключового напрямку підвищення результативності будівельних процесів. Енергоадаптивні проєкти розглядаються як комплекс інновацій, що поєднують енергоощадні технології, цифрові системи контролю, оптимізовані логістичні рішення та управлінські інструменти ресурсозбереження. Обґрунтовано, що цифровізація будівництва забезпечує можливість високоточного планування енергоспоживання, скорочення тривалості життєвого циклу об'єкта, зростання продуктивності та мінімізації втрат. На основі викладених теоретичних положень сформульовано наукову гіпотезу: підвищення ефективності енергоадаптивних проєктів досягається шляхом трансформації традиційних оргтехнологічних моделей у цифрово-керовані системи управління, що інтегрують BIM, BEMS, IoT, аналітику даних та модернізовані механізми організаційно-технологічного забезпечення.

У другому розділі дисертаційної роботи здійснено розроблення та наукове обґрунтування методичного базису інструментарію організаційно-

технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних девелоперських проєктів. У межах розділу визначено принципи, на яких ґрунтується формування функціонально-цифрової системи управління, зокрема положення енергоменеджменту, концепції енергоощадного девелопменту та цифровізації виробничо-управлінських процесів. Методична частина дисертації вибудована на поєднанні системного аналізу для декомпозиції функцій і процедур управління, моделювання для побудови цифрових структур та алгоритмів керування енергоспоживанням, а також економіко-математичних та імітаційних підходів для оцінки ефективності та енергоадаптивності прийнятих рішень. Доповнюючими є експертно-аналітичні, порівняльні та графоаналітичні методи, що забезпечують комплексність дослідження та можливість багатовимірної оцінки результатів. Особливу увагу приділено впровадженню механізмів енергоменеджменту в операційні системи окремих проєктів із подальшою їх інтеграцією в єдиний цифровий простір мультипроєктного девелопера. У роботі обґрунтовано та запропоновано оновлену систему критеріїв оцінювання «успіху проєкту», яка включає показники ефективності, енергоощадності, результативності та доповнюється репутаційно-іміджевими характеристиками, що розширює підхід до аудиту результатів реалізації об'єктів. Наголошено, що така система дозволяє оцінювати проєкт не лише в контексті економічних та технічних параметрів, а й з урахуванням енергетичних, екологічних, соціальних та управлінських аспектів. Окремо опрацьовано ризикові складові девелоперського середовища досліджуваних проєктів будівництва та підходи до їх оцінювання: від короткострокових фінансово-ринкових ризиків до довгострокових соціально-екологічних загроз із залученням незалежної експертизи. Розділ систематизує комплекс різномірних критеріїв — екологічність, довговічність і надійність житлового ресурсу, стабільність проєктного середовища, якість взаємодії виконавців і постачальників, ремонтпридатність і замінність елементів, а також повноту контролю девелопером усіх фаз реалізації. Усі ці параметри підсумовано в інтегральному

PLM-критерію, що відображає стабільне зростання вартості життєвого циклу проєкту з урахуванням енергоощадного чинника та часу, закріплюючи методичну основу подальшої розробки інструментарію цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи представлено ключові аналітичні та прикладні результати дослідження, спрямовані на розроблення та впровадження інструментарію цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів. Центральним елементом розділу є формування цифрово-керованої архітектури моделювання будівництва, розробленої на базі удосконаленої енергоадаптивної моделі нового типу, що інтегрує мережеві «вершинно-робітні» моделі, алгоритми енергоаудиту, PLM-підхід та принципи інтегрованого управління проєктом. Створений інструментарій забезпечує повну цифрову керованість життєвого циклу — від концепції та проєктування до введення об'єкта в експлуатацію, що дозволяє формувати цифрові двійники енергоощадних будівель і синхронізувати параметри управління між усіма учасниками девелоперського процесу. Впровадження запропонованих рішень сприяє підвищенню прозорості, гнучкості та керованості процесів будівництва відповідно до парадигми Construction 5.0. Завершальна частина розділу присвячена створенню прикладного програмного комплексу, який ґрунтується на сформованих у дослідженні методичних положеннях. Розроблені програмні модулі забезпечують цифрове профілювання девелоперського проєкту, формування структур взаємодії його стейкхолдерів та побудову інформаційного середовища управління. Важливим результатом стало виділення системи індикаторів функціональної конкурентоспроможності енергоадаптивного проєкту та його організаційного середовища — показників, що враховують енергетичні, економічні, технологічні та управлінські параметри.

Провідною інновацією дослідження, що визначає його наукову унікальність, є створення комплексного інструментарію цифрово-керованого моделювання процесів організації будівництва та середовища

енергоадаптивного проекту, який забезпечує цілісне управління життєвим циклом об'єкта від проєктної підготовки до введення в експлуатацію. На його основі вперше сформовано модуль організаційного цифрового адміністрування — практичне ядро системи супроводу, що уможливорює масштабове впровадження моделі в реальні умови сучасного будівельного девелопменту. У процесі дослідження було вдосконалено організаційно-технологічну модель будівництва з урахуванням вимог енергоощадності, цифровізації та інтегрованого управління, що дозволило відобразити специфіку підготовки інвестиційно-будівельного циклу й реалізації проєкту в умовах енерго-адаптації. Запропоновані рішення забезпечують відтворення багаторівневих сценаріїв організації робіт, інтеграцію енерго-менеджменту та BIM-технологій, адаптивне управління ресурсами й формування цифрових двійників об'єктів, що підвищує результативність та керованість девелоперських проєктів нового покоління.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у формуванні принципово нового концепту цифрової організації та підготовки будівництва в межах енергоадаптивних девелоперських проєктів, що забезпечує перехід від традиційних моделей управління до формалізованого, діджитал-орієнтованого та енергоефективного формату реалізації інвестиційно-будівельного циклу. У роботі створено інноваційний інструментарій цифрово-керованого моделювання, який розширює можливості стратегічного планування, прискорює прийняття рішень, підвищує керованість процесів і забезпечує зниження енерговитрат на всіх стадіях девелопменту. Удосконалено тип, структуру та аналітичний базис сіткової організаційно-технологічної моделі, яка набула нового змісту як адаптивний механізм управління ресурсами та потоками в проєктах зі змінними параметрами енергоощадності. Запропоновано цифрово-керовану мережеву модель нового покоління, що поєднує BIM-аналітику, автоматизований моніторинг і параметричне планування, формує цифровий простір комунікацій між учасниками та дозволяє репродукувати сценарії управління будівництвом у

режимі енергоадаптації. Завдяки цьому створено науковий фундамент і практичний алгоритм організаційно-технологічного девелопменту, здатного забезпечувати конкурентність і стійкість енергоадаптивних будівельних проєктів нового покоління.

Удосконалено:

- *архітектоніку та функціональну концепцію організаційно-технологічних моделей будівництва в контексті енергоадаптивних девелоперських проєктів*, що дало змогу забезпечити баланс між швидкістю зведення індустріальних об'єктів і їх довготривалою енергоефективністю. Модель визначено не лише як механізм керування потоками та ресурсами, а як координаційну основу, що синхронізує процеси проєктування, виготовлення конструкцій, монтажу та експлуатації об'єкта. У її структуру інтегровано цифрові системи моніторингу, BIM-аналітику, параметричне моделювання та сценарне прогнозування енергоспоживання. Запропоновано диференціацію моделей на централізовані та децентралізовані, що підвищує відповідність проєктних рішень регіональним умовам і технологічній складності. Це створює основу для впровадження технологій енергоадаптивного будівництва з підвищеною цифровою керованістю життєвого циклу;

- *критерійно-оцінювальний апарат вибору організаційних рішень у девелоперських проєктах*, що дозволило перейти від традиційної логіки оцінки рентабельності до інтегрованої моделі багатофакторного аналізу. Нова система критеріїв включає не лише економічні показники, а й екологічні, соціальні, енергетичні та цифрово-аналітичні параметри, які визначають життєздатність і конкурентоспроможність будівельних проєктів у довгостроковій перспективі. В основу оцінювання закладено принцип цифрової підтримки ухвалення рішень через використання AI-алгоритмів, великих даних та сценарного моделювання ризиків. Це забезпечує високоточне прогнозування результатів проєкту, мінімізує фактор невизначеності та підсилює стійкість девелоперської моделі в умовах

ресурсних та ринкових коливань. Такий підхід формує нову методологію вибору оптимальної організаційної конфігурації циклу будівництва;

- *конструктив та аналітичний каркас організаційно-технологічної мережевої моделі будівництва* шляхом зміни її типології, формату та аналітичної структури, що забезпечило розширення функціоналу моделі від класичної сіткової схеми до повноцінного цифрового механізму управління інвестиційно-будівельним циклом. Нова модель сформована як системоутворюючий інструмент девелопменту, який охоплює стадії планування, підготовки, зведення та експлуатації, відображає ресурсну динаміку та змінну енергоефективність об'єкта. Інструментально інтегровано можливість формування багатоваріантних сценаріїв, що дозволяє оцінювати технологічні рішення у режимі прогнозування та адаптивного регулювання. Таким чином, модель перетворюється на універсальний цифровий каркас організації будівництва, який підвищує точність управлінських рішень, скорочує тривалість циклу та зменшує втрати енергії в процесах виконання робіт.

Набуло подальшого розвитку:

- *науково-методичний підхід до класифікації та управління ризиками будівельно-інвестиційних проєктів* із врахуванням їх впливу на ефективність реалізації енергоадаптивних об'єктів. Розроблена автором система деталізує фінансові, технічні, правові, екологічні, соціальні, організаційні та політичні ризики, а також демонструє їх конкретні прояви в умовах сучасних девелоперських проєктів. Це дозволяє інтегрувати ризик-орієнтоване планування в цифрову модель управління, підвищуючи точність прогнозів та оперативність прийняття рішень. Такий підхід забезпечує більш комплексне та адаптивне реагування на невизначеності в процесі реалізації проєкту;

- *сутність поняття «цифрове адміністрування циклом девелопменту в енергоадаптивних будівельних проєктах»*, яке в рамках дослідження визначено як провідну дефініцію управлінської парадигми цифровізації. У цьому контексті цифрове адміністрування трактується як системне

впровадження інформаційно-аналітичних та цифрових технологій у всі етапи життєвого циклу проєкту, включно з плануванням, організацією робіт, координацією ресурсів і контролем реалізації. Такий підхід дозволяє інтегрувати управлінські процеси з технологічними та організаційними складовими, забезпечуючи прозорість прийняття рішень і підвищення ефективності девелоперського процесу. Крім того, цифрове адміністрування створює умови для адаптивного реагування на ризики та невизначеності, підвищує енергоефективність будівельних рішень та сприяє комплексному управлінню середовищем реалізації проєкту як тимчасового підприємства. В результаті запропонована дефініція забезпечує методологічну основу для розробки інструментарію організаційно-технологічного супроводу енергоадаптивних проєктів, формує концептуальні підвалини цифрової трансформації девелоперських процесів та інтеграції цифрових моделей у практику управління.

Результати проведеного наукового дослідження знайшли практичне втілення у діяльності провідних будівельних, девелоперських та інвестиційних компаній, зокрема Інститут місцевого розвитку, ТОВ «Марстон-Груп» та ТОВ «Альфа-сервіс», які реалізують енергоадаптивні проєкти. У практичній діяльності цих підприємств було впроваджено розроблений автором аналітичний інструментарій формування життєвого циклу девелопменту для моделювання процесів ЕАП та комплексних програм з організаційно-технологічного адміністрування проєктів. Використання цього інструментарію забезпечило підвищення ефективності управління ресурсами, координації робіт та контролю реалізації проєктів, сприяючи інтеграції цифрових рішень у корпоративні бізнес-процеси та формуванню системного підходу до управління енергоадаптивними будівельними об'єктами.

Ключові слова: енерго-адаптовані проєкти (ЕАП), організаційно-технологічне забезпечення, цифровий супровід організації будівництва, життєвий цикл ЕАП, девелопмент ЕАП, цифрове ризик-орієнтоване адміністрування ЕАП.

ABSTRACT

Sobol D.V. - Toolkit for organizational and technological support and digital support of energy-adaptive projects. — Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 19 "Architecture and Construction" in the specialty 192 "Construction and Civil Engineering". — Kyiv National University of Construction and Architecture. — Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of a toolkit for organizational and technological support and digital support of energy-adaptive projects, aimed at integrating modern digital technologies with management and technological solutions in construction. The proposed scientific and applied complex is oriented towards application in the conditions of energy-saving development projects. The conceptual basis of the research is a digital energy-adapted model of construction organization, which provides a combination of high planning accuracy with the capabilities of digital process coordination.

The urgency of conducting the study is due to a set of factors, including the need to increase energy efficiency and digital maturity of the construction industry in the context of modernization and post-war recovery, as well as the growing importance of energy-adaptive development projects as a priority direction of sustainable development, combining economic feasibility, environmental friendliness and social responsibility. Attention is also required to reorient organizational and technological models to digital principles of management and resource conservation, which actualizes the creation of new scientific and practical tools. The integration of digital technologies - BIM modeling, data analytics, automated monitoring systems - with renewable energy sources ensures increased planning accuracy, consistency of decisions and efficiency of the development process. Thus, the combination of needs for digitalization and energy saving determines the objective need to develop tools for organizational and technological support and digital support of energy-adaptive projects..

The first section of the dissertation forms modern conceptual and theoretical guidelines for the organization of construction in the context of the implementation of energy-adapted development projects. Within the framework of the section, a systematic generalization of scientific approaches to the interpretation of the conceptual apparatus of construction development was carried out, the content of key categories was clarified, and the understanding of the essence of the digitally controlled, energy-adaptive organizational and technological model, which is considered as the basis for the formation of the latest production and management solutions, was deepened. Particular attention is paid to determining the interdependencies between the information, energy and technological characteristics of modern construction, which made it possible to substantiate the principles of their integration interaction within a single digital management contour. The conceptual provisions of the section are based on the principles of sustainable development, digital transformation of the industry and energy management as a key direction for increasing the effectiveness of construction processes. Energy-adapted projects are considered as a set of innovations that combine energy-saving technologies, digital control systems, optimized logistics solutions and resource-saving management tools. It is substantiated that the digitalization of construction provides the possibility of high-precision planning of energy consumption, reducing the duration of the object's life cycle, increasing productivity and minimizing losses. Based on the theoretical provisions outlined, a scientific hypothesis was formulated: increasing the efficiency of energy-adaptive projects is achieved by transforming traditional organizational-technological models into digitally controlled management systems that integrate BIM, BEMS, IoT, data analytics and modernized mechanisms of organizational and technological support.

In the second section of the dissertation, the methodological basis of the organizational and technological support toolkit and digital support of energy-adaptive development projects were developed and scientifically substantiated. The section defines the principles on which the formation of a functional-digital management system is based, in particular the provisions of energy management,

the concept of energy-saving development and digitalization of production and management processes. The methodological part of the dissertation is built on a combination of system analysis for the decomposition of management functions and procedures, modeling for the construction of digital structures and algorithms for energy consumption management, as well as economic-mathematical and simulation approaches for assessing the effectiveness and energy adaptability of decisions made. Complementary are expert-analytical, comparative and graph-analytical methods that ensure the complexity of the study and the possibility of multidimensional assessment of the results. Particular attention is paid to the implementation of energy management mechanisms in the operating systems of individual projects with their subsequent integration into a single digital space of a multi-project developer. The paper substantiates and proposes an updated system of criteria for assessing "project success", which includes indicators of efficiency, energy saving, effectiveness and is supplemented by reputational and image characteristics, which expands the approach to auditing the results of the implementation of facilities. It is emphasized that such a system allows the project to be assessed not only in the context of economic and technical parameters, but also taking into account energy, environmental, social and management aspects. The risk components of the development environment of the studied construction projects and approaches to their assessment are separately studied: from short-term financial and market risks to long-term social and environmental threats with the involvement of independent expertise. The section systematizes a complex of heterogeneous criteria - environmental friendliness, durability and reliability of the housing resource, stability of the project environment, quality of interaction between contractors and suppliers, maintainability and replaceability of elements, as well as complete control by the developer of all phases of implementation. All these parameters are summarized in an integral PLM criterion, which reflects the stable growth of the project life cycle cost, taking into account the energy saving factor and time, establishing the methodological basis for further development of the toolkit for digital support of energy-adapted projects.

The third section of the dissertation presents key analytical and applied research results aimed at developing and implementing a toolkit for digital support of energy-adapted projects. The central element of the section is the formation of a digitally controlled architecture for construction modeling, developed on the basis of an improved energy-adapted model of a new type, which integrates networked “top-down” models, energy audit algorithms, PLM approach and principles of integrated project management. The created toolkit provides full digital control of the life cycle — from concept and design to commissioning of the facility, which allows you to form digital twins of energy-efficient buildings and synchronize management parameters between all participants in the development process. The implementation of the proposed solutions contributes to increasing the transparency, flexibility and manageability of construction processes in accordance with the Construction 5.0 paradigm. The final part of the section is devoted to the creation of an applied software package, which is based on the methodological provisions formed in the study. The developed software modules provide digital profiling of the development project, the formation of interaction structures of its stakeholders and the construction of an information management environment. An important result was the identification of a system of indicators of the functional competitiveness of the energy-adapted project and its organizational environment - indicators that take into account energy, economic, technological and management parameters.

The leading innovation of the study, which determines its scientific uniqueness, is the creation of a comprehensive toolkit for digitally controlled modeling of construction organization processes and the environment of the energy-adapted project, which provides integrated management of the life cycle of the object from design preparation to commissioning. On its basis, the organizational digital administration module was first formed - the practical core of the support system, which enables the scaled implementation of the model in the real conditions of modern construction development. During the research, the organizational and technological model of construction was improved, taking into account the requirements of energy efficiency, digitalization, and integrated management, which

allowed reflecting the specifics of preparing the investment and construction cycle and implementing the project in terms of energy adaptation. The proposed solutions provide the reproduction of multi-level scenarios of work organization, the integration of energy management and BIM technologies, adaptive resource management and the formation of digital twins of objects, which increases the effectiveness and manageability of new generation development projects.

The scientific novelty of the dissertation work lies in the formation of a fundamentally new concept of digital organization and construction preparation within the framework of energy-adapted development projects, which ensures the transition from traditional management models to a formalized, digitally-oriented and energy-efficient format for the implementation of the investment and construction cycle. The work has created an innovative toolkit of digitally controlled modeling, which expands the capabilities of strategic planning, accelerates decision-making, increases the manageability of processes and ensures a reduction in energy consumption at all stages of development. The type, structure, and analytical basis of the network organizational and technological model have been improved, which has acquired a new meaning as an adaptive mechanism for managing resources and flows in projects with variable energy saving parameters. A digitally controlled network model of a new generation has been proposed, which combines BIM analytics, automated monitoring and parametric planning, forms a digital space of communications between participants and allows reproducing construction management scenarios in the energy adaptation mode. Thanks to this, a scientific foundation and a practical algorithm for organizational and technological development have been created, capable of ensuring the competitiveness and sustainability of new generation energy-adaptive construction projects.

Improved:

- - *architectonics and functional concept of organizational and technological construction models* in the context of energy-adaptive development projects, which made it possible to ensure a balance between the speed of construction of industrial facilities and their long-term energy efficiency. The model is defined not only as a

flow and resource management mechanism, but also as a coordination framework that synchronizes the processes of design, manufacturing of structures, installation and operation of the facility. Digital monitoring systems, BIM analytics, parametric modeling and scenario forecasting of energy consumption are integrated into its structure. A differentiation of models into centralized and decentralized ones is proposed, which increases the compliance of design solutions with regional conditions and technological complexity. This creates the basis for the implementation of energy-adaptive construction technologies with increased digital life cycle control;

- *a criteria-based evaluation system for choosing organizational solutions in development projects*, which allowed us to move from the traditional logic of assessing profitability to an integrated model of multifactor analysis. The new system of criteria includes not only economic indicators, but also environmental, social, energy and digital-analytical parameters that determine the viability and competitiveness of construction projects in the long term. The evaluation is based on the principle of digital support for decision-making through the use of AI algorithms, big data and scenario risk modeling. This ensures highly accurate forecasting of project results, minimizes the uncertainty factor and enhances the stability of the development model in conditions of resource and market fluctuations. This approach forms a new methodology for choosing the optimal organizational configuration of the construction cycle;

- - *a constructive and analytical framework of the organizational and technological network model of construction* by changing its typology, format and analytical structure, which ensured the expansion of the functional potential of the model from a classic grid scheme to a full-fledged digital mechanism for managing the investment and construction cycle. The new model is formed as a system-forming development tool that covers the stages of planning, preparation, construction and operation, reflects resource dynamics and variable energy efficiency of the facility. The tool integrates the ability to form multivariate scenarios, which allows evaluating technological solutions in the forecasting and

adaptive regulation mode. Thus, the model turns into a universal digital framework for organizing construction, which increases the accuracy of management decisions, reduces the cycle duration and reduces energy losses in the processes of work execution.

Further development has been made:

- a scientific and methodological approach to classifying and managing risks of construction and investment projects, taking into account their impact on the efficiency of implementing energy-adapted facilities. The system developed by the author details financial, technical, legal, environmental, social, organizational and political risks, and also demonstrates their specific manifestations in the conditions of modern development projects. This allows you to integrate risk-based planning into a digital management model, increasing the accuracy of forecasts and the speed of decision-making. This approach provides a more comprehensive and adaptive response to uncertainties in the process of project implementation;

- the essence of the concept of "digital administration of the development cycle in energy-adapted construction projects", which is identified as the leading definition of the management paradigm of digitalization within the framework of the study. In this context, digital administration is interpreted as the systematic implementation of information and analytical and digital technologies in all stages of the project life cycle, including planning, organization of work, coordination of resources and implementation control. This approach allows you to integrate management processes with technological and organizational components, ensuring transparency of decision-making and increasing the efficiency of the development process. In addition, digital administration creates conditions for adaptive response to risks and uncertainties, increases the energy efficiency of construction solutions and promotes comprehensive management of the project implementation environment as a temporary enterprise. As a result, the proposed definition provides a methodological basis for developing a toolkit for organizational and technological support of energy-adaptive projects, forms the conceptual foundations of the digital

transformation of development processes and the integration of digital models into management practice.

The results of the conducted scientific research have found practical implementation in the activities of leading construction, development and investment companies, in particular Institute of Local Development, Marston Group LLC and Alfa Service LLC, which implement energy-adapted projects. In the practical activities of these enterprises, the analytical toolkit developed by the author for the formation of the development life cycle for modeling EAP processes and complex programs for organizational and technological project administration was implemented. The use of this toolkit ensured an increase in the efficiency of resource management, work coordination and control of project implementation, contributing to the integration of digital solutions into corporate business processes and the formation of a systematic approach to the management of energy-adapted construction objects.

Keywords: energy-adapted projects (EAP), organizational and technological support, digital support for construction organization, EAP-life cycle, EAP-development, digital risk-oriented EAP-administration.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах

1. Соболь Д.В. Цифрові інструменти моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2025. – № 2(56). – С. 14–27. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).14-27](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).14-27) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348040/334962>
2. Чуприна Ю., Соболь Д., Сібіковський О., Педько Ю. Систематизація базових дефініцій стосовно формування концептуально-теоретичного базису інформаційного забезпечення процесів організації будівництва // Будівельне виробництво. – 2025. – № 78. – С. 39–50. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.39-50> Посилання: <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/521/253> (Особистий внесок здобувача полягає у систематизації та формалізації дефініцій і концептуальних положень інформаційного забезпечення організації будівництва з урахуванням цифровізації та автоматизації управлінських процесів)
3. Соболь Д.В. Архітектура технічних рішень для проєктів із підвищеними вимогами до енергоефективності // Управління розвитком складних систем. – 2025. – № 64. – С. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.206-216> Посилання: <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-64/206-216.pdf>
4. Козак А.А., Соболь Д.В., Молодько О.В., Боштан А.В. Еволюція підходів до оцінки ефективності будівельно-інвестиційних проєктів // Просторовий розвиток. – 2025. – № 13. – С. 308–323. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.13.308-323> Посилання: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2513.pdf> (Особистий внесок здобувача полягає в удосконаленні науково-методичного підходу оцінювання функціональної ефективності будівельно-інвестиційних проєктів із урахуванням ризиків, цифрової трансформації та стратегічного управління).
5. Соболь Д.В. Організаційно-технічні моделі реалізації проєктів з

підвищеною енергетичною адаптивністю в умовах індустріалізації будівництва // Просторовий розвиток. – 2025. – № 15. – С. 482–492. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.482-492> Посилання: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2515.pdf>

6. Сібіковський О., Сокуров А., Коваленко В., Соболев Д. Інноваційний принцип трансформацій суб'єктів інвестування та будівництва через сучасні методи реінжинірингу // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2025. – № 1(55). – С. 148–166. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).148-166](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).148-166) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/326942/316774> (Особистий внесок здобувача полягає у розвитку підходів до реінжинірингу процесів у будівництві та інвестуванні через інтеграцію BIM, цифрових технологій і методів стратегічного управління).

7. Тугай О., Горбач М., Малихін М., Соболев Д., Дегтярьова І. Оцінка ефективності удосконалених інструментів проведення організаційної підготовки зосередженого будівництва // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2022. – № 1(50). – С. 93–100. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(1\).93-100](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(1).93-100) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/269170/264660> (Особистий внесок здобувача полягає у удосконаленні інструментів організаційної підготовки будівництва на основі інформаційного та геоінформаційного моделювання для підвищення ефективності процесів).

8. Козак А., Соболев Д., Данілов С., Оксенчук Р., Шаршун Ф. Концептуалізація енергоадаптивних будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2022. – № 2(49). – С. 305–319. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).305-319](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).305-319) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342154/330046> (Особистий внесок здобувача полягає у концептуалізації енергоадаптивних будівельних проєктів із урахуванням принципів сталого розвитку, цифрової трансформації, BIM та

енергозбереження).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

тези доповідей на конференціях

9. Соболь Д.В. Розгортання управлінських структур та ролей у впровадженні енергоадаптивних будівельних програм // Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України: матеріали круглого столу. – Київ: КНУБА, 2023. – С. 25. <https://lnk.ua/FL4IPeGIId>

10. Соболь Д.В. Інтеграція будівельних процесів із системами контролю та автоматизації енергоспоживання // Енергоощадні машини і технології: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КНУБА, 2024. – С. 44. <https://lnk.ua/wmbp18Yos>

11. Соболь Д.В., Поліщук О.В. Цифрові технології та інструменти моніторингу в управлінні енергоадаптивними проектами у ущільненій забудові // Проблеми генезису економіки інтелектуально-інноваційного капіталу: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КНУБА, 2025. – С. 857–860. https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5_11_2025.pdf

12. Соболь Д.В. Організаційно-технологічне та цифрове забезпечення інструментального моніторингу енергоадаптивних будівельних проєктів // Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України: матеріали VIII Міжнар. конф. – Київ: Ліра-К, 2025. – С. 742–744 <https://repository.knuba.edu.ua/items/d0b87d1f-fb32-4375-8961-42e490aeda9b>

13. Соболь Д.В., Коломієць В.В. Цифровий та організаційно-технічний інструментарій оптимізації енергоадаптивних будівельних проєктів // Архітектура, будівництво, дизайн: виробництво, інформатизація, менеджмент: матеріали Міжнар. наук.-техн. форуму. – Київ: Ліра-К, 2025. – С. 526–527. <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНЕ БАЧЕННЯ ТА ІНФРАСТРУКТУРА ЕНЕРГОАДАПТИВНИХ ПРОЄКТІВ У СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ.....	33
1.1. Концептуалізація енергоадаптивних будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації.....	33
1.2. Організаційно-технологічні моделі реалізації проєктів з підвищеною енергетичною адаптивністю в умовах індустріалізації будівництва.....	47
1.3. Цифрові інструменти моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень.....	62
Висновки до 1-го розділу.....	77
РОЗДІЛ 2. ІНСТРУМЕНТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОАДАПТИВНИМИ ПРОЄКТАМИ НА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ РІВНІ.....	81
2.1. Архітектура технічних рішень для проєктів із підвищеними вимогами до енергоефективності	81
2.2. Розгортання управлінських структур та ролей у впровадженні енергоадаптивних будівельних програм.....	101
2.3. Інтеграція будівельних процесів із системами контролю та автоматизації енергоспоживання.....	121
Висновки до 2-го розділу	139
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА, СУПРОВІД ТА АНАЛІТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ЕНЕРГОАДАПТИВНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	143
3.1. Визначення ефективності цифрових платформ для енергетичного супроводу будівельних проєктів.....	143
3.2. Аналітична верифікація параметрів енергоадаптивності на етапах експлуатації та модернізації.....	158
3.3. Розробка рекомендацій щодо підвищення стійкості, керованості та цифрової прозорості життєвого циклу енергоефективних рішень.....	170
Висновки до 3-го розділу.....	184
ВИСНОВКИ.....	188
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92
ДОДАТКИ.....	207

ВСТУП

Актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена комплексом глибинних трансформацій, що відбуваються у світовій та вітчизняній будівельній галузі під впливом енергетичних, кліматичних, цифрових і соціально-економічних викликів. В умовах глобальної енергетичної нестабільності, зростання вартості енергоресурсів, посилення вимог до вуглецевої нейтральності та екологічної безпеки особливої значущості набуває впровадження принципів енергоефективності та цифрової зрілості у процеси проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів нерухомості.

Для України дана проблематика має додатковий стратегічний вимір, обумовлений потребами післявоєнного відновлення, масштабної реконструкції зруйнованої інфраструктури, житлового фонду та об'єктів соціального призначення. Відновлення має відбуватися не за моделями минулого, а на засадах сучасних енергоощадних, ресурсоефективних та цифрово-керованих рішень. Саме тому енергоадаптивні будівельні проєкти сьогодні розглядаються не лише як технічна альтернатива традиційному будівництву, а як стратегічний інструмент сталого розвитку територій, економіки та соціальної сфери.

Енергоадаптивні проєкти поєднують у собі екологічну доцільність, економічну ефективність та соціальну відповідальність, формуючи нову архітектуру взаємодії між забудовником, державою, бізнесом і кінцевими користувачами. Їх реалізація передбачає раціональне використання енергії, інтеграцію відновлюваних джерел, зменшення тепловтрат, зниження експлуатаційних витрат, підвищення комфортності та безпечності середовища проживання. Водночас досягнення зазначених результатів неможливе без глибокої трансформації *організаційно-технологічних моделей управління будівельними проєктами*.

Традиційні підходи до організації будівництва, що ґрунтуються на фрагментарному управлінні, відокремленості стадій життєвого циклу та слабкій інтеграції учасників процесу, не забезпечують належного рівня

адаптивності до енергоефективних і цифрових викликів. У цьому контексті актуалізується потреба *в переналаштуванні організаційно-технологічних моделей на принципи цифровізації та енергоорієнтованого управління*, що дозволяє створювати автономні, інтелектуальні та ресурсозберігаючі будівельні об'єкти.

Цифрова трансформація будівництва, що реалізується через впровадження технологій BIM, BEMS, IoT, великих даних, цифрових двійників та автоматизованого моніторингу, відкриває нові можливості для точного енергетичного моделювання, прогнозування споживання ресурсів, узгодження дій стейкхолдерів і підвищення керованості девелоперських процесів. Інтеграція цифрових інструментів з технологіями відновлюваної енергетики формує якісно новий формат будівельного виробництва, що відповідає концепціям Construction 5.0, Smart Building та Green Development.

Попри значний науковий доробок у сфері цифровізації будівництва, енергозбереження та девелопменту, проблема формування цілісного інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів залишається недостатньо вирішеною. Наявні підходи здебільшого розглядають окремі аспекти — або цифрові технології, або енергоменеджмент, або організаційне управління — без формування інтегрованої міждисциплінарної системи, орієнтованої на весь життєвий цикл проєкту.

У зв'язку з цим особливої науково-методичної значущості набуває розроблення комплексного інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних будівельних проєктів, здатного забезпечити інтеграцію енергетичних, технологічних і управлінських рішень у єдину цифрову систему. Практична актуальність дисертаційної роботи полягає у можливості використання її результатів у діяльності девелоперських компаній, проєктних і підрядних організацій при реалізації енергоефективних та «зелених» проєктів. Запропоновані підходи створюють підґрунтя для підвищення керованості, інвестиційної

привабливості та конкурентоспроможності будівельних проєктів. В умовах післявоєнної відбудови України це забезпечує формування енергетично стійкої, економічно ефективної та цифрово зрілої моделі розвитку будівельної галузі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в руслі науково-дослідних і науково-пошукових напрямів, що реалізуються у Київському національному університеті будівництва і архітектури та в Академії будівництва України (відділення «Менеджмент та організація будівництва»), і є складовою розвитку наукових досліджень у сфері цифрової трансформації управління будівельними та девелоперськими проєктами, впровадження енергоефективних рішень і вдосконалення сучасних організаційно-технологічних систем будівництва. Наукові результати дисертації сформовано з урахуванням напрацювань, отриманих у межах виконання теми «Розбудова сучасного аналітичного інструментарію девелоперського управління підрядним будівництвом» (№0115U000860), у процесі якої апробовано авторські підходи до інтеграції цифрових сенсорних мереж, хмарної інфраструктури та засобів аналітики даних для здійснення моніторингу технічного стану будівельних об'єктів і параметрів їх енергетичної результативності. Як важлива складова науково-дослідної теми «Розвиток управлінської взаємодії інституційних учасників девелоперських проєктів» (№0121U111793) у дисертації використано авторські розробки, спрямовані на створення систем раннього цифрового виявлення потенційно небезпечних відхилень у функціонуванні будівельних систем та інженерних мереж із застосуванням технологій штучного інтелекту, комп'ютерного зору, BIM-моделювання та автоматизованої обробки інформації, що надходить від IoT-сенсорів і безпілотних платформ. Отримані рішення стали науково-методичною основою для формування модуля цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів. У межах науково-дослідної роботи «Вдосконалення аналітичного апарату обґрунтування формату девелопменту для проєктів будівництва» (№W4-14-b, Академія будівництва

України) були використані результати авторських досліджень, спрямовані на інформаційно-аналітичне оцінювання технічного та енергетичного стану будівельних конструкцій в умовах експлуатації, реконструкції та дії надзвичайних чинників. Зазначені напрацювання стали основою для розроблення прикладного інструментарію оцінювання життєвого циклу та залишкового енергетичного ресурсу об'єктів у складі енергоадаптивних будівельних проєктів. Таким чином, результати дисертаційного дослідження логічно інтегруються в систему фундаментальних і прикладних наукових досліджень у галузі цифровізації будівництва, енергоменеджменту та організаційно-технологічного забезпечення девелоперських проєктів, забезпечуючи їх подальший науковий розвиток і практичне впровадження в умовах формування енергоадаптивного будівництва.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні та науковому обґрунтуванні комплексного інструментарію організаційно-технологічного забезпечення й цифрового супроводу енергоадаптивних будівельних проєктів, спрямованого на інтеграцію сучасних цифрових технологій з прогресивними організаційно-технологічними рішеннями управління будівництвом. Створений інструментарій орієнтований на вимоги енергоефективного будівництва, принципи сталого розвитку та сучасний формат будівельного девелопменту. Його концептуальною основою є цифрова енергоадаптивна організаційно-технологічна модель, що забезпечує поєднання високої точності технологічного планування з перевагами цифрової координації процесів. Запровадження запропонованого інструментарію дає змогу підвищити рівень узгодженості дій учасників проєкту, обґрунтованість управлінських рішень, точність прогнозування та ефективність використання ресурсів. Реалізація поставленої мети сприятиме зростанню енергоефективності будівництва, підвищенню інвестиційної привабливості девелоперських проєктів та формуванню передумов для сталого розвитку й післявоєнного відновлення будівельної галузі України.

З метою реалізації поставленої мети в дисертаційному дослідженні розв'язано такі наукові та прикладні завдання:

1) систематизувати передумови та наукові підходи до оновлення моделей організації будівництва з урахуванням принципів енергоменеджменту, цифрової трансформації та сталого девелопменту;

2) визначити й науково обґрунтувати склад універсальних і спеціалізованих компонентів методичного базису, які забезпечують енергоефективність і цифрову сумісність процесів управління енергоадаптивними проєктами;

3) дослідити фактори впливу, ризики та масштаби можливих відмов у процесі реалізації енергоадаптивних проєктів у середовищі вітчизняного будівельного девелопменту;

4) сформувати аналітико-прикладні компоненти комбінованого інструментарію моделювання, цифрового супроводу та організаційного адміністрування енергоощадних девелоперських проєктів;

5) обґрунтувати систему показників та методичний порядок оцінювання конкурентоспроможності підприємств-виконавців у контексті впровадження енергоадаптивних технологій.

6) розробити й адаптувати інтегрований цифровий програмний продукт для практичної реалізації енергоадаптивних девелоперських проєктів на основі комбінованого підходу до організації будівництва стосовно досліджуваних проєктів.

Об'єктом дослідження є процеси організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу девелоперських проєктів, орієнтованих на енергоадаптивне середовище реалізації. **Предметом дослідження** виступають теоретико-методичні засади, моделі та інструментарій цифрового опису й організаційно-технологічного моделювання енергоадаптивних будівельних проєктів у системі сучасного девелопменту.

Методи дослідження. Провідними складовими методологічної бази дисертаційного дослідження є принципи енергоменеджменту, енергоощадного

будівельного девелопменту, цифрової трансформації та сталого розвитку. Методологічний апарат роботи сформовано на засадах системного, процесного та цифрово-орієнтованого підходів до організації та управління енергоадаптивними проєктами. Метод системного аналізу використано для структуризації функцій, процесів і взаємозв'язків між елементами організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів. Методи моделювання застосовано для побудови цифрових організаційно-технологічних структур, алгоритмів управління та формування цифрових двійників об'єктів будівництва.

Економіко-математичні та імітаційні методи використано для кількісного оцінювання варіантів організаційно-технологічних рішень, аналізу їх енергоефективності, адаптивності та стійкості до змін зовнішнього середовища. Експертно-аналітичні методи залучено для обґрунтування управлінських рішень в умовах неповної інформації та багатокритеріального вибору. Порівняльний аналіз використано для зіставлення традиційних і цифрово-орієнтованих моделей управління будівельними проєктами. Графоаналітичні методи застосовано для візуалізації структур процесів, енергетичних потоків і логіки цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів. Сукупність використаних методів забезпечила наукову обґрунтованість, комплексність і практичну спрямованість отриманих результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробленні інноваційного інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних девелоперських проєктів, який дозволяє формалізовано планувати, організовувати та контролювати будівельні процеси. Запропонований інструментарій забезпечує функціонально-операційне та організаційно-технологічне моделювання процесів управління, цифрового супроводу й координації дій усіх учасників життєвого циклу будівельного проєкту. Його структура інтегрує методи аналітики, цифрової візуалізації, енергоменеджменту та імітаційного

моделювання, що дозволяє відтворювати повний життєвий цикл енергоадаптивних об'єктів у єдиному цифровому середовищі. Розроблені цифрово-адаптовані моделі забезпечують підвищення точності планування, ефективності ресурсного використання, енергоощадності та керованості процесів у межах девелоперських проєктів. Інтеграція аналітичних і цифрових компонентів дозволяє створювати адаптивні системи управління, які реагують на змінні параметри експлуатації та зовнішні фактори ризику. Запропонований інструментарій сприяє підвищенню конкурентоспроможності девелоперських систем нового покоління та забезпечує науково-методичну основу для практичного впровадження енергоефективних, цифрово керованих рішень у сучасному будівельному девелопменті.

На підставі отриманих у дисертації результатів:

Удосконалено:

- *архітектоніку та функціональну концепцію організаційно-технологічних моделей будівництва у межах енергоадаптивних девелоперських проєктів*, що дозволило забезпечити оптимальний баланс між швидкістю зведення індустріальних об'єктів і їх довготривалою енергоефективністю. Модель розглядається не лише як механізм управління потоками та ресурсами, а як координаційна основа, що синхронізує процеси проєктування, виготовлення конструкцій, монтажу та експлуатації. У її структурі інтегровано цифрові системи моніторингу, BIM-аналітику, параметричне моделювання та сценарне прогнозування енергоспоживання. Запропоновано диференціацію моделей на централізовані та децентралізовані, що підвищує відповідність проєктних рішень регіональним умовам та технологічній складності і створює підґрунтя для впровадження енергоадаптивних технологій з високим рівнем цифрової керованості життєвого циклу об'єкта;

- *критеріально-оцінювальний апарат вибору організаційних рішень у девелоперських проєктах*, що забезпечив перехід від традиційної оцінки рентабельності до інтегрованої багатофакторної моделі. Система критеріїв

включає економічні, екологічні, соціальні, енергетичні та цифрово-аналітичні параметри, що визначають життєздатність і конкурентоспроможність проєктів у довгостроковій перспективі. В основу оцінювання покладено принцип цифрової підтримки ухвалення рішень із використанням AI-алгоритмів, великих даних та сценарного моделювання ризиків. Це забезпечує точне прогнозування результатів проєкту, мінімізує невизначеність та підсилює стійкість девелоперської моделі в умовах ресурсних і ринкових коливань, формуючи нову методологію вибору оптимальної організаційної конфігурації циклу будівництва;

- *конструктив та аналітичний каркас організаційно-технологічної мережевої моделі будівництва*, шляхом зміни її типології, формату та аналітичної структури, що розширило функціональні можливості моделі від класичної сіткової схеми до комплексного цифрового механізму управління інвестиційно-будівельним циклом. Модель виступає системоутворюючим інструментом девелопменту, охоплюючи стадії планування, підготовки, зведення та експлуатації, відображаючи ресурсну динаміку та змінну енергоефективність об'єкта. Інтегровано можливість формування багатоваріантних сценаріїв, що дозволяє оцінювати технологічні рішення у режимі прогнозування та адаптивного регулювання. Завдяки цьому модель перетворюється на універсальний цифровий каркас організації будівництва, що підвищує точність управлінських рішень, скорочує тривалість циклу та мінімізує енергетичні втрати при виконанні робіт.

Набуло подальшого розвитку:

- науково-методичний підхід до класифікації та управління ризиками будівельно-інвестиційних проєктів із врахуванням їх впливу на ефективність реалізації енергоадаптивних об'єктів. Запропонована автором система деталізує фінансові, технічні, правові, екологічні, соціальні, організаційні та політичні ризики, а також демонструє їх конкретні прояви у сучасних девелоперських проєктах. Це дозволяє інтегрувати ризик-орієнтоване планування в цифрову модель управління, підвищуючи точність прогнозів,

оперативність прийняття рішень та забезпечуючи більш комплексне й адаптивне реагування на невизначеності в процесі реалізації проєкту;

- *сутність поняття «цифрове адміністрування циклом девелопменту в енергоадаптивних будівельних проєктах», яке визначено у межах дослідження як ключову дефініцію управлінської парадигми цифровізації. У цьому контексті цифрове адміністрування трактовано як системне впровадження інформаційно-аналітичних та цифрових технологій на всіх етапах життєвого циклу проєкту, включно з плануванням, організацією робіт, координацією ресурсів та контролем реалізації. Такий підхід інтегрує управлінські процеси з технологічними й організаційними складовими, забезпечує прозорість ухвалення рішень і підвищує ефективність девелоперського процесу. Крім того, цифрове адміністрування створює умови для адаптивного реагування на ризики та невизначеності, сприяє підвищенню енергоефективності будівельних рішень і забезпечує комплексне управління середовищем реалізації проєкту як тимчасового підприємства. Запропонована дефініція формує методологічну основу для створення інструментарію організаційно-технологічного супроводу енергоадаптивних проєктів та концептуальні підвалини цифрової трансформації девелоперських процесів із інтеграцією цифрових моделей у практику управління.*

Практична цінність дослідження полягає у створенні комплексного прикладного інструментарію супроводу енергоадаптивних проєктів (ЕАП), який забезпечує формалізоване моделювання процесів організації будівництва протягом усього життєвого циклу об'єкта. Розроблений інструментарій сумісний із BIM-технологіями, має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і орієнтований на керівний та середній рівні управління тимчасових організацій девелоперського типу, забезпечуючи ефективне планування, координацію та контроль процесів реалізації ЕАП. Результати наукового дослідження успішно інтегровані у практику провідних будівельних, девелоперських та інвестиційних компаній, зокрема Інститут місцевого розвитку, «Марстон-Груп» та «Будівельна фірма «Альфа-сервіс», які впроваджують

енергоадаптивні проекти. У рамках практичної діяльності цих підприємств застосовано авторський аналітичний інструментарій формування життєвого циклу девелопменту для моделювання процесів ЕАП, а також комплекс програм для організаційно-технологічного адміністрування проєктів. У зазначених компаніях впроваджено авторський комплекс прикладних програм, що забезпечує багаторівневе цифрове моделювання профілю будівельного девелоперського проєкту, взаємодії всіх стейкхолдерів та структури цифрового середовища. Особлива увага приділена розробці системи індикаторів для оцінювання функціональної конкурентоспроможності енергоадаптивного проєкту та його девелоперського середовища. Комплекс програм реалізує багатозарову цифрову візуалізацію життєвого циклу ЕАП і функцій управління, що завершується створенням модуля організаційного цифрового адміністрування, орієнтованого на практичне застосування в умовах енергоадаптивного будівництва. Використання інструментарію та комплексу програм дозволило в практичній діяльності вищезазначених компаній підвищити ефективність управління ресурсами, координації робіт і контролю реалізації проєктів, сприяючи інтеграції цифрових рішень у корпоративні бізнес-процеси та формуванню системного підходу до управління енергоефективними будівельними об'єктами.

Публікації. Передумови та наукова гіпотеза дослідження, його ключові етапи, отримані результати та сформульовані висновки всебічно представлені у 13 наукових роботах, серед яких 8 статей опубліковано у виданнях, включених до переліку фахових журналів, затверджених ДАК МОН України.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження виконано здобувачем самостійно. Всі наукові положення, отримані результати, сформульовані висновки та розроблені рекомендації, викладені у роботі та подані на захист, становлять безпосередній результат власної наукової діяльності автора. Детальний опис авторського внеску наведено у переліку опублікованих наукових праць.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дослідження були представлені на 5 наукових конференціях, семінарах та інших спеціалізованих заходах, де отримали схвалення фахової спільноти. Інформація про відповідні заходи наведена у списку опублікованих праць.

Опис структури та обсягу роботи. Структура дисертаційної роботи визначена логікою викладення досліджуваних завдань, послідовністю етапів наукового дослідження та отриманими результатами. Робота містить анотації, перелік публікацій здобувача за темою дисертації, зміст, вступ, 3 розділи, висновки, список використаної літератури із 112 найменувань та додатки на 9 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 215 сторінок друкованого тексту, основного тексту 169 сторінок, включаючи 22 таблиці та 45 рисунків, що ілюструють основні положення та результати дослідження.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНЕ БАЧЕННЯ ТА ІНФРАСТРУКТУРА ЕНЕРГОАДАПТИВНИХ ПРОЄКТІВ У СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ

1.1. Концептуалізація енергоадаптивних будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації

У сучасних умовах розвитку будівельної галузі актуалізується необхідність підвищення енергоефективності, раціонального використання ресурсів та зменшення негативного впливу на довкілля. Це обумовлює формування нових підходів до організації будівництва, орієнтованих на інтеграцію енергетичних, інформаційних та технологічних процесів. Одним із таких підходів є концепція енергоадаптивних будівельних проєктів, що базується на принципах сталого розвитку та цифрової трансформації [56; 88].

Наукова проблема полягає у відсутності інтегрованої організаційно-технологічної моделі управління енергоадаптивними будівельними проєктами, яка забезпечує узгоджену взаємодію інформаційних, енергетичних і виробничих процесів у межах єдиного цифрового середовища. Існуючі підходи до організації будівництва характеризуються фрагментарністю та недостатнім рівнем інтеграції цифрових і енергетичних компонентів, що обмежує ефективність реалізації проєктів [67; 72].

Енергоадаптивні будівельні проєкти розглядаються як комплексні системи, спрямовані на оптимізацію енергоспоживання, підвищення енергетичної автономності об'єктів і зниження експлуатаційних витрат. Вони передбачають інтеграцію інженерних рішень, енергоефективних матеріалів, систем автоматизації та цифрових технологій управління [31; 54].

Концептуалізація таких проєктів тісно пов'язана з положеннями сталого розвитку, які передбачають баланс між економічними, екологічними та соціальними аспектами функціонування будівель. У цьому контексті енергоадаптивні проєкти орієнтуються на зниження викидів CO₂, ефективно

використання ресурсів, застосування екологічно безпечних матеріалів та впровадження відновлюваних джерел енергії [73; 82].

Важливу роль у формуванні енергоадаптивних проєктів відіграє регуляторне поле, яке визначає вимоги до енергоефективності будівель. Національні нормативи, зокрема ДБН В.2.6-31:2021 [77], ДСТУ EN ISO 50001:2022 [80], а також Закон України «Про енергетичну ефективність» [81], формують основу для впровадження енергоефективних рішень. На міжнародному рівні визначальне значення має директива EPBD [23], що регламентує перехід до будівель з майже нульовим енергоспоживанням. Додатково застосовуються системи екологічної сертифікації LEED і BREEAM, які забезпечують комплексну оцінку сталості будівель [44; 59].

Цифрова трансформація будівництва є ключовим фактором підвищення ефективності енергоадаптивних проєктів. Використання технологій BIM дозволяє формувати інформаційну модель будівлі, яка інтегрує дані про її конструктивні, технологічні та енергетичні характеристики [63]. Системи управління енергоспоживанням (BEMS) забезпечують моніторинг і оптимізацію енергетичних процесів у режимі реального часу [15; 11]. Застосування IoT та цифрових двійників створює передумови для переходу до інтелектуальних систем управління будівництвом, орієнтованих на аналіз даних та прогнозування [21; 28].

Узагальнення сучасних підходів дозволяє сформувати концепцію цифрово-керованої енергоадаптивної організації будівництва, яка базується на інтеграції інформаційної, енергетичної та технологічної підсистем у межах єдиного цифрового середовища управління.

На рисунку 1.1 подано концептуальну модель цифрово-керованої енергоадаптивної організації будівництва, яка відображає взаємозв'язок основних компонентів цієї системи.

Енергоадаптивні будівельні проєкти, як частина сталого розвитку, сприяють зниженню негативного впливу будівництва на навколишнє середовище, зокрема через раціональне використання енергії, збереження

природних ресурсів та підвищення комфорту користувачів. Такі проекти є важливим кроком у напрямку до сталого майбутнього, де економія ресурсів, зменшення енергоспоживання та екологічність стають основними пріоритетами [88].



Рисунок 1.1 Основні аспекти концептуалізації енергоадаптивних будівельних проектів (Джерело: розроблено автором на основі [63])

Цифровізація процесів проектування і управління будівництвом дає можливість не лише покращити точність і ефективність проектів, а й оптимізувати енергоспоживання, знижуючи витрати та збільшуючи термін служби будівель. Завдяки новітнім технологіям в проектуванні та управлінні енергією, енергоадаптивні будівельні проекти стають важливими не лише для економії витрат, а й для забезпечення високих екологічних стандартів у будівництві.

Розвиток технологій відновлювальної енергії є важливим аспектом у досягненні сталого розвитку в будівельному секторі. Використання сонячних панелей, геотермальних систем опалення та вітрових турбін у комбінації з енергоефективними будівельними матеріалами дозволяє значно знизити енергоспоживання будівель і забезпечити енергетичну автономність. Ці технології стають дедалі більш доступними завдяки їх інтеграції в сучасні будівельні проекти, що дає можливість забезпечити високий рівень

енергетичної ефективності, знижуючи потребу в традиційних енергетичних ресурсах.

Крім того, важливим аспектом є цифрові інструменти, такі як системи керування енергією будівель (BEMS), які дозволяють здійснювати реальний моніторинг енергоспоживання в реальному часі. Ці системи здатні автоматично регулювати параметри клімату в будівлі, такі як температура, освітлення і вентиляція, що дозволяє не тільки знизити витрати на енергію, але й забезпечити високий рівень комфорту для користувачів [15]. Завдяки такій інтеграції технологій, енергоадаптивні будівельні проєкти стають не тільки економічно вигідними, а й екологічно чистими, сприяючи досягненню цілей сталого розвитку на рівні місцевих та глобальних ініціатив.

У контексті регуляторного поля, важливо, щоб енергоадаптивні будівельні проєкти відповідали не тільки національним стандартам, а й міжнародним вимогам. Зелені сертифікації, такі як LEED або BREEAM, є важливими інструментами для підтвердження відповідності будівлі високим екологічним стандартам. Вони не лише підтверджують екологічність будівлі, але й дають змогу отримати фінансові пільги або знижки на страхування, що робить такі проєкти ще більш привабливими для інвесторів і замовників. Крім того, встановлення чітких вимог до енергоефективності будівель і проєктів на державному рівні сприяє підвищенню екологічної відповідальності в будівельному секторі [33].

Цифрова трансформація в будівельному секторі дозволяє оптимізувати не лише проєкти, але й процеси їх реалізації. Використання BIM-технологій (Building Information Modeling) для моделювання енергоефективності будівельних проєктів на ранніх етапах дозволяє передбачити енергетичні потреби будівлі та оптимізувати використання ресурсів. Це дозволяє значно зменшити витрати на енергію, підвищити термін служби будівель і забезпечити комфортні умови для експлуатації об'єктів.

У межах дослідження уточнено зміст поняття «енергоадаптація будівельного проєкту», під яким пропонується розуміти інтегрований процес організаційно-технологічного та інформаційного забезпечення будівництва, спрямований на адаптацію об'єкта до змінних умов енергоспоживання шляхом

використання цифрових технологій, енергоефективних рішень та управління життєвим циклом.

Енергоадаптивні будівельні проекти — це концепція, яка орієнтується на використання інноваційних технологій для значного зниження енергоспоживання та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Це включає такі аспекти, як використання відновлювальних джерел енергії, енергоефективні матеріали, розумні системи управління енергоспоживанням та багато інших інноваційних рішень.

У своєму дослідженні Кенет Уоррен у своїй книзі зазначав, що основними принципами енергоадаптивних будівель є оптимізація споживання енергії та інтеграція відновлювальних джерел енергії, що дозволяє будівлям досягти високої енергетичної автономії [42]. Він підкреслює важливість енергоефективних технологій на етапах проектування і будівництва для досягнення сталого розвитку та підвищення енергоефективності будівель.

Вільям Стюарт у своїй праці виділяє, що інтеграція сонячних панелей, геотермальних систем опалення та вітрових турбін у будівельні проекти не лише забезпечує енергетичну ефективність, але й має потенціал для зниження викидів CO₂. Водночас він наголошує, що підвищення енергоефективності має значний економічний ефект, оскільки знижує витрати на енергоспоживання будівель в перспективі, роблячи їх більш прибутковими для інвесторів і екологічно чистими для мешканців [37].

William Stewart зазначає важливість цілісного підходу до проектування будівель з урахуванням екологічних аспектів. Він пропонує використовувати зелені сертифікації, такі як LEED або BREEAM, що стають основою для енергоадаптивних проектів, допомагаючи не тільки знизити енергоспоживання, а й покращити якість повітря, екологічну стійкість та комфорт для користувачів будівель [70].

Нижче представлена таблиця 1.1, що ілюструє ключові підходи та етапи реалізації енергоадаптивних будівельних проектів, а також їхню важливість для підвищення енергоефективності в будівництві.

Підходи та етапи енергоадаптивних будівельних проєктів

Підхід / Етап	Опис	Вплив на енергоефективність будівель
Зниження енергоспоживання	Використання ізоляційних матеріалів та енергоефективних технологій	Зниження потреби в опаленні та кондиціонуванні
Відновлювальні джерела енергії	Встановлення сонячних панелей, вітрових турбін, геотермальних систем	Підвищення енергетичної автономії та зниження викидів CO ₂
Інтелектуальні системи управління енергією	Впровадження BEMS (Building Energy Management Systems)	Оптимізація споживання енергії в реальному часі
Сталий дизайн та планування	Врахування екологічних факторів на етапі проєктування	Покращення комфорту і зниження витрат на експлуатацію
Зелені сертифікації	Отримання сертифікацій LEED, BREEAM	Підвищення вартості будівлі, зниження експлуатаційних витрат

(Джерело: розроблено автором на основі [70])

Інтеграція відновлювальних джерел енергії у будівельне середовище не лише підвищує енергоефективність, але й суттєво знижує залежність від традиційних енергетичних джерел. Такі технології, як сонячні панелі, геотермальні системи опалення та вітрові турбіни, надають будівлям енергетичну автономність, що особливо важливо в умовах глобальних змін у ринках енергоносіїв. Це дозволяє не лише зменшити витрати на енергоспоживання, але й покращити екологічні показники будівлі, що є важливою складовою концепції сталого розвитку.

З метою виявлення обмежень існуючих підходів до організації будівництва доцільно провести їх порівняльний аналіз.

У таблиці 1.2 наведено порівняльний аналіз підходів до організації будівництва в умовах цифрової трансформації та енергоадаптації.

Таблиця 1.2.

Порівняльний аналіз підходів до організації будівництва в умовах цифрової трансформації та енергоадаптації

Критерій	Традиційний підхід	BIM-орієнтований підхід	Енергоадаптивний цифровий підхід
Концепція управління	Ієрархічна, функціональна	Інформаційно-інтегрована	Системно-інтегрована, адаптивна
Роль інформації	Фрагментарна, документальна	Централізована цифрова модель	Інтегрована в реальному часі (IoT, аналітика)
Управління енергоспоживанням	Практично відсутнє	Частково враховується на стадії проектування	Інтегроване управління (BEMS, моніторинг, прогнозування)
Рівень цифровізації	Низький	Середній	Високий (BIM + IoT + AI + аналітика)
Інтеграція систем	Відсутня	Часткова (в межах BIM)	Повна (BIM, BEMS, IoT, ERP, DSS)
Адаптивність до змін	Низька	Обмежена	Висока (динамічне реагування систем)
Управління життєвим циклом	Розділене по етапах	Частково інтегроване	Повністю інтегроване (LCC, LCA)
Прийняття рішень	Інтуїтивне / експертне	На основі BIM-моделі	Data-driven (аналітика, прогнозування)
Врахування невизначеності	Мінімальне	Часткове	Інтегроване (сценарний аналіз, цифрові моделі)
Організаційна структура	Жорстка	Частково гнучка	Гнучка, мережева, цифрово-керована
Взаємодія учасників	Дискретна	Інформаційна координація	Цифрова екосистема взаємодії
Енергоефективність	Не є пріоритетом	Частково враховується	Ключовий критерій управління
Рівень ризиків	Високий	Середній	Знижений за рахунок прогнозування
Продуктивність	Середня	Вища за рахунок BIM	Максимізована через цифрову інтеграцію
Основні обмеження	Відсутність інтеграції	Обмежена енергетична складова	Високі вимоги до цифрової інфраструктури

Джерело: розроблено автором.

Проведений аналіз показує, що традиційні та BIM-орієнтовані підходи не забезпечують комплексної інтеграції енергетичних і інформаційних процесів, що обумовлює необхідність переходу до цифрово-керованих моделей управління будівництвом [67].

Важливим напрямом енергоадаптації є інтеграція відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних панелей, геотермальних систем та вітрових установок, що забезпечують підвищення енергетичної автономності будівель і зниження залежності від традиційних джерел енергії [1; 70; 8].

Інтеграцію відновлюваних джерел енергії в енергоадаптивні будівельні проекти представлено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 Інтеграція відновлювальних джерел енергії в енергоадаптивні будівельні проекти (Джерело: розроблено автором на основі [59])

Інтеграція відновлювальних джерел енергії в енергоадаптивні будівельні проекти дозволяє не тільки підвищити енергетичну автономність будівель, але й знижує експлуатаційні витрати на енергоспоживання. Такі технології сприяють значному зниженню викидів CO₂ та інших шкідливих газів, що робить будівлі більш екологічно чистими та відповідними до вимог сталого розвитку. Відновлювальні джерела енергії також покращують економічну вигоду для інвесторів та власників будівель, оскільки значно знижують витрати на енергію в довгостроковій перспективі, а також можуть забезпечити

фінансові пільги або пільгові кредити на будівельні проекти, що відповідають екологічним стандартам [8].

Інтеграція цих технологій у будівельні проекти має також важливе значення для підвищення конкурентоспроможності підприємств на ринку. Будівлі, що сертифіковані за зеленими стандартами (LEED, BREEAM), стають привабливими для інвесторів і орендарів, оскільки їх експлуатація зазвичай є більш економічною, а їх екологічний рейтинг забезпечує додаткові переваги на ринку нерухомості.



Рисунок 1.3. Концептуальна модель цифрово-керованої енергоадаптивної організації будівництва

З метою систематизації нормативної бази енергоефективності доцільно узагальнити ключові стандарти та їх вплив на проектування.

На рисунку 1.1 представлено концептуальну модель цифрово-керованої енергоадаптивної організації будівництва, яка відображає інтеграцію ключових технологічних та управлінських компонентів у межах єдиного цифрового контуру.

У верхньому рівні моделі представлено базові цифрові технології, зокрема BIM як інформаційну основу проєктування та управління даними, IoT та системи моніторингу як інструменти збору та передачі інформації у реальному часі, а також аналітичні системи і DSS, що забезпечують підтримку прийняття управлінських рішень.

Зазначені компоненти формують єдиний цифровий контур управління, який забезпечує узгоджену взаємодію всіх елементів системи та створює інформаційне середовище для координації процесів будівництва.

У межах цифрового контуру функціонують три взаємопов'язані підсистеми: інформаційна, енергетична та технологічна. Інформаційна підсистема відповідає за управління даними та інформаційними потоками, енергетична — за моніторинг і оптимізацію енергоспоживання, а технологічна — за реалізацію будівельних процесів і впровадження технічних рішень.

Інтеграція зазначених підсистем забезпечує формування організаційно-технологічної моделі будівництва, яка характеризується адаптивністю, цифровою керованістю та орієнтацією на підвищення ефективності реалізації проєктів. Результатом функціонування моделі є досягнення енергоадаптації будівництва, що проявляється у зниженні енергоспоживання, підвищенні ефективності використання ресурсів та забезпеченні сталого розвитку будівельних девелоперських проєктів.

Запропонована модель є теоретичною основою подальшого розроблення методичного інструментарію управління енергоадаптивними будівельними проєктами. Інтеграція відновлювальних джерел енергії в будівельні проєкти є невід'ємною частиною переходу до екологічно чистого будівництва, що має на меті не тільки збереження ресурсів та зниження витрат, а й створення більш зелених і екологічно відповідальних будівель.

У контексті сучасної архітектурно-будівельної практики, формування енергоадаптивного середовища перестає бути факультативним вектором розвитку і дедалі частіше виступає як вимога, закріплена на рівні регуляторних документів. Національні стандарти, зокрема ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова

ізоляція будівель", ДСТУ ISO 50001:2021 "Системи енергетичного менеджменту", а також міжнародні документи на зразок ISO 52000-1:2017 щодо загальних принципів енергоефективності будівель, зумовлюють не лише вимоги до конструкційних рішень, а й визначають підходи до оцінки життєвого циклу енергоспоживання будівлі [10, 11]. Таке регуляторне поле формує передумови для проектної уніфікації, яка поєднує матеріально-технічні параметри з довготривалою стратегією сталого розвитку. Водночас встановлено, що існуючі підходи до організації будівництва не забезпечують комплексної інтеграції енергетичних та інформаційних аспектів, що обмежує можливості підвищення ефективності будівельних девелоперських проєктів.

Значний вплив на проектування справляють також міжнародні екологічні ініціативи, що інтегрують енергоефективність у ширший контекст ESG-критеріїв (екологічних, соціальних та управлінських показників). Наприклад, стандарти LEED та BREEAM не тільки задають жорсткі параметри теплоізоляції чи рекуперації, а й передбачають оцінку будівлі з точки зору її впливу на місцеву екосистему, якість повітря всередині, ефективність використання водних ресурсів, логістику матеріалів, а також дотримання принципів "green procurement". Проектування, що орієнтується на ці стандарти, потребує від замовника та підрядника глибокого знання нормативної бази та інтеграції відповідного цифрового супроводу для перевірки відповідності в реальному часі. У структурі сучасного регуляторного впливу на проектування енергоадаптивних будівель спостерігається складна взаємодія між державними нормами, міжнародними стандартами та добровільними сертифікаційними ініціативами [44]. Для кращого розуміння цих зв'язків доцільно звернутися до рисунка 1.4, яке охоплює ключові напрями нормування, інструменти реалізації, а також механізми моніторингу та сертифікації.

Водночас процес реалізації енергоадаптивних рішень вимагає перетворення самого процесу будівництва. Нормативні обмеження, що стосуються викидів парникових газів, утилізації будівельних відходів, а також обов'язковість використання сертифікованих енергоощадних матеріалів, вимагають не тільки технологічного, а й управлінського оновлення.

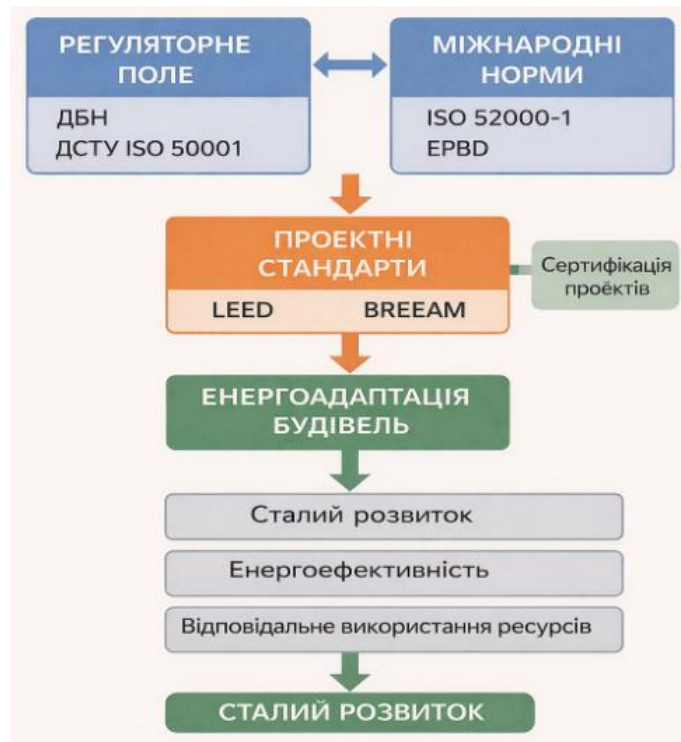


Рисунок 1.4. Система взаємозв'язків між регуляторним полем, проектними стандартами і енергоадаптацією будівлі (Джерело: розроблено автором на основі [44])

Будівельні компанії змушені впроваджувати моделі цифрового дублювання, BIM-платформи для оптимізації матеріалопотоків, а також застосовувати LCA-аналіз (оцінку життєвого циклу) для прорахунку ефективності систем кондиціонування, освітлення, вентиляції ще на етапі проектування.

У європейському контексті особливої ваги набувають директиви ЄС, зокрема Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), які зобов'язують держави-члени розробити дорожні карти щодо перетворення будівель на "нульові споживачі енергії" (Nearly Zero-Energy Buildings, NZEB). Україна, адаптуючи своє законодавство до норм ЄС, вже заклала у свої ДБН та ДСТУ низку механізмів, які забезпечують поступовий перехід до таких будівель. Це передбачає обов'язковість проведення енергоаудиту для великих об'єктів, визначення класів енергоефективності, а також створення єдиного державного реєстру енергетичних сертифікатів [23]. Наявна нормативна база, яка регулює питання енергоефективності, охоплює низку документів різного рівня – від державних стандартів до міжнародних екологічних протоколів. Вони істотно впливають на етапи проектування, вибору матеріалів, впровадження

інженерних рішень та здійснення будівельного контролю. Для систематизації та порівняльного аналізу основних характеристик таких стандартів варто представити їх у таблиці 1.3, що дозволить чітко виокремити їх функціональне призначення, рівень дії та сфери застосування.

Подальша інтеграція стандартів вимагає побудови цифрової інфраструктури регуляторного моніторингу, де кожен етап – від концепції до введення в експлуатацію – супроводжується автоматизованою верифікацією на відповідність енергетичним критеріям. Зокрема, такі інструменти як EnergyPlus або DesignBuilder використовуються для моделювання споживання енергії в залежності від обраних архітектурних рішень. Інтеграція цих даних у BIM-середовище дозволяє отримувати прогнозовані енергетичні паспорти об'єкта, що полегшує подальшу сертифікацію за міжнародними схемами.

Таблиця 1.3.

Основні нормативи енергоефективності та їхній вплив на проектування будівель

Норматив/стандарт	Ключові положення	Рівень дії
ДБН В.2.6-31:2021	Тепловий опір огорожувальних конструкцій	Національний (Україна)
ДСТУ ISO 50001:2021	Системи енергетичного менеджменту	Національний/Міжнародний
ISO 52000-1:2017	Загальні принципи оцінки енергетичних характеристик будівель	Міжнародний
EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)	Вимоги щодо NZEB та мінімального рівня енергетичної ефективності	Наднаціональний (ЄС)
LEED (v4.1)	Комплексна оцінка сталості: енергія, вода, матеріали, внутрішнє середовище	Міжнародний (добровільний)
BREEAM International	Європейська система екологічної оцінки сталості будівель	Міжнародний (добровільний)

(Джерело: розроблено автором на основі [23])

У практиці енергоадаптивного проектування після визначення нормативної бази ключову роль відіграє здатність адаптувати архітектурні рішення під задані енергоефективні параметри. Тут критично важливими стають такі технічні характеристики, як коефіцієнт теплопередачі

огороджувальних конструкцій, коефіцієнт інсоляції, а також індекси теплового комфорту, які регламентуються в межах стандартів ISO 7730 та ASHRAE 55.

З метою систематизації нормативної бази енергоефективності доцільно узагальнити ключові стандарти та їх вплив на проектування.

При цьому використання новітніх матеріалів — фазозмінних ізоляторів, наноструктурованих теплоізоляційних покриттів, подвійного скління з інертними газами — дозволяє досягати високого коефіцієнта енергозбереження навіть у проектах з нетиповими архітектурними формами [6]. Однак без жорсткого дотримання вимог сертифікації жодна з інновацій не матиме юридичного або економічного ефекту, зокрема під час залучення «зеленого» фінансування.

Водночас значна частина нормативів вимагає не тільки проектної, а й експлуатаційної відповідності. Так, згідно з вимогами ISO 50002:2014 (енергоаудит), енергоефективність повинна підтверджуватися не лише на етапі розрахунків, а й у процесі фактичного використання будівлі. Це означає, що розробники зобов'язані проектувати системи контролю, які забезпечують збір, збереження і аналіз даних упродовж усього життєвого циклу будівлі [35]. Такі системи, зокрема BEMS (Building Energy Management Systems), інтегруються з системами обліку тепла, електроенергії, вентиляції та освітлення, створюючи умови для адаптивного реагування на відхилення споживання енергії від запроєктованих показників.

Не менш важливою є роль держави у створенні стимулів для впровадження енергоефективних стандартів. У сучасних умовах набувають актуальності програми фінансування будівництва через «зелені облігації», пільгове кредитування енергоефективних об'єктів, а також державні субсидії на сертифікацію за міжнародними системами. Закон України «Про енергетичну ефективність» (№ 1817-IX), а також Постанова Кабінету Міністрів № 995 «Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності» стали основою для запуску повноцінної політики енергозбереження [81]. Такі заходи не тільки знижують вартість входу до енергоадаптивних проєктів, а й стимулюють компанії до інституціоналізації процесів сталого будівництва.

У цьому контексті стає зрозуміло, що регуляторне поле — це не лише інструмент обмеження, а й ресурс для модернізації. Його ефективне використання дозволяє будівельним компаніям отримати конкурентну перевагу як у вигляді зниження експлуатаційних витрат, так і шляхом підвищення репутаційного капіталу. У проєктах девелопменту житла або комерційної нерухомості сертифікати LEED або BREEAM можуть стати ключовими аргументами для інвестора чи покупця. Крім того, компанії, що дотримуються таких стандартів, демонструють відповідальність перед суспільством і природним середовищем, що відповідає очікуванням сучасного ESG-орієнтованого ринку.

Іншою стороною інтеграції нормативних стандартів у процес будівництва є необхідність навчання персоналу, адаптації проєктних інститутів, перепрофілювання постачальників матеріалів. Багато виробників повинні сертифікувати свою продукцію згідно з європейськими нормами, аби мати змогу постачати її для будівництва NZEB-об'єктів [93]. Водночас проєктні бюро мають впроваджувати практики «інтегрованого проєктного моделювання» (Integrated Design Process), коли архітектори, інженери, екологи, енергетики та девелопери працюють спільно над досягненням енергетичних цілей ще на етапі концептуального проєктування. Енергоадаптація повинна реалізовуватись на всіх етапах життєвого циклу об'єкта — від проєктування до експлуатації, що забезпечує зниження енергоспоживання, підвищення ефективності управління та скорочення витрат.

1.2. Організаційно-технологічні моделі реалізації проєктів з підвищеною енергетичною адаптивністю в умовах індустріалізації будівництва

У контексті сучасної індустріалізації будівництва все більшої актуальності набуває розробка й імплементація організаційно-технологічних моделей, здатних забезпечити високу енергетичну адаптивність будівельних об'єктів. Енергетична адаптивність у даному випадку розглядається як властивість будівлі гнучко реагувати на зміни зовнішнього середовища,

параметрів енергопостачання, а також запитів користувачів упродовж усього життєвого циклу. Індустріалізація створює передумови для формування модульних конструктивних систем, автоматизованих виробничих процесів і синхронізованих логістичних ланцюгів, які дозволяють інтегрувати технології енергозбереження вже на етапі заводської підготовки.

Одним із ключових викликів є забезпечення балансу між швидкістю зведення індустріальних об'єктів та їхньою довготривалою енергоефективністю. У цьому сенсі організаційно-технологічна модель виступає не лише як система управління ресурсами і процесами, але і як координаційна структура, що пов'язує етапи проектування, виробництва та експлуатації. На практиці це означає, що проекти з підвищеною енергетичною адаптивністю мають інтегрувати системи моніторингу енергоспоживання, адаптивного освітлення, автоматизованої вентиляції та рекуперації, що вимагає створення технічно скоординованих інфраструктур із підвищеним рівнем цифровізації. Цифрова складова, зокрема використання BIM і CIM (City Information Modelling), забезпечує попереднє моделювання сценаріїв взаємодії будівлі з енергетичною мережею та погодними умовами [12].

У зв'язку з цим актуальним постає поділ організаційно-технологічних моделей на централізовані (з акцентом на єдину керуючу платформу і типові рішення для серійного виробництва) та децентралізовані (з орієнтацією на адаптацію під специфіку ділянки, регіону або індивідуальних енергетичних сценаріїв). Централізовані моделі, як правило, реалізуються на основі заводської збірки енергоефективних модулів, у яких уже вбудовано відповідне інженерне обладнання [16]. Натомість децентралізовані підходи потребують динамічного управління інформаційними потоками і часто застосовуються у випадках складних забудов, багаторівневої реконструкції або інтеграції в історичне середовище. Як видно на рисунку 1.5., сучасні організаційно-технологічні моделі реалізації проектів з підвищеною енергетичною адаптивністю базуються на багаторівневій інтеграції цифрових, виробничих та управлінських компонентів, що дозволяє забезпечити гнучкість будівництва, енергоефективність і відповідність нормативним вимогам уже на етапі індустріального планування.



Рисунок 1.5. Організаційно-технологічні моделі реалізації енергоадаптивних проєктів (Джерело: розроблено автором на основі [16])

Завдяки індустріальному підходу вдається досягти стандартизації елементів, зниження витрат на будівництво та підвищення якості виконання енергозберігаючих рішень. Наприклад, технології prefab (prefabrication) дозволяють на етапі проєктування включити в конструкцію готові блоки із вже змонтованими системами тепlopостачання, теплоізоляції, сонячними панелями або вентиляційними каналами з рекуператорами. Це скорочує кількість етапів на будмайданчику, мінімізує помилки монтажу та підвищує точність реалізації енергоадаптивних рішень, що суттєво впливає на довгострокову експлуатаційну ефективність об'єкта.

Індустріалізоване будівництво у поєднанні з концепцією енергоадаптивності породжує необхідність трансформації не лише технічних параметрів будівель, а й усієї парадигми управління проєктами. Поступово відбувається перехід від традиційного каскадного управління до гнучких моделей, які базуються на концепції «розумного середовища», що здатне самостійно оптимізувати енергоспоживання в залежності від режиму

експлуатації, кількості людей у приміщенні, погодних умов або цін на електроенергію [89]. У цих умовах організаційно-технологічна модель повинна включати цифровий близнюк об'єкта (Digital Twin), що моделює не лише фізичні характеристики споруди, але й її поведінку в умовах змінного навантаження та різних сценаріїв експлуатації.

Інформаційно-керована енергетика стає важливим шаром у структурі будівельного процесу. Такі моделі дозволяють керувати не окремими будівлями, а цілими мікрорайонами як єдиною енергетичною екосистемою. Наприклад, у межах децентралізованої моделі реалізації в будівництві можуть використовуватись локальні сонячні станції, малі вітрові установки, системи акумулювання енергії та управління піковими навантаженнями [85]. Усі ці компоненти координуються через інтелектуальні системи розподілу, що поєднують будівлі у загальну мережу споживання та виробництва енергії, створюючи передумови для формування енергонезалежних кластерів.

Зміна парадигми також вимагає інституційної адаптації. Традиційна роль генпідрядника трансформується в роль координатора цифрових потоків, відповідального за забезпечення інтеграції між виробничими модулями, енергетичними платформами, системами автоматизації та користувацькими інтерфейсами. Технічний нагляд тепер не обмежується фіксацією фізичних дефектів — він включає моніторинг відповідності програмного забезпечення, протоколів енергетичних обмінів і навіть кіберзахисту енергетичної інфраструктури. З'являються нові спеціалізовані ролі: координатори BIM-інфраструктури, оператори LCA-аналітики, консультанти з ESG-сертифікації.

Окрему увагу слід приділити питанням фінансування проєктів з підвищеною енергетичною адаптивністю. Їх реалізація вимагає суттєвих початкових інвестицій, які згодом окуповуються за рахунок зниження експлуатаційних витрат. У зв'язку з цим дедалі більше забудовників звертаються до механізмів «зеленого» фінансування, зокрема зелених облігацій, енергетичних кредитних ліній, механізмів підтримки від міжнародних організацій (IFC, ЄБРР, UNDP), а також національних програм енергоефективності. Ці інструменти стимулюють імплементацію організаційно-технологічних моделей нового типу, що враховують не лише

будівельну логіку, але й логіку циркулярної економіки, в якій ресурси не споживаються, а перерозподіляються з урахуванням максимальної віддачі на одиницю витрат [92].

Поняття моделі реалізації проєктів з підвищеною енергетичною адаптивністю в умовах індустріалізації будівництва охоплює комплексну організаційно-технологічну систему, яка поєднує високі стандарти енергоефективності з технологіями заводського виготовлення будівельних елементів, автоматизованими системами управління ресурсами та цифровими платформами моніторингу. Така модель передбачає поетапну інтеграцію енергозберігаючих рішень у виробничі цикли будівельного підприємства — від етапу проєктування до експлуатації, з особливою увагою до здатності будівлі адаптуватися до змін навколишнього середовища, енергетичних умов і поведінки користувачів.

Перші концептуальні підходи до таких моделей спостерігаються в працях Яна Ванегаса, професора Техаського університету (США), який ще у 1990-х роках запропонував бачити сталий будівельний проєкт як адаптивну систему, що інтегрує технологічні, соціальні й екологічні компоненти. Він наголошував, що моделі проєктної реалізації мають враховувати змінність умов використання будівлі, її вплив на довкілля та динаміку енергоспоживання впродовж усього життєвого циклу [56]. Ідеї Ванегаса лягли в основу інтегрованого підходу до управління проєктами будівництва, який широко застосовується в США та Європі.

У подальшому розвиток ідеї енергетичної адаптивності в умовах промислової забудови отримав нове трактування в дослідженнях Джонатана Клементса, британського інженера й дослідника з University College London. У 2000-х роках він зосередив увагу на системах кліматичного регулювання для офісних і комерційних будівель у мегаполісах, підкреслюючи значення сенсорних мереж, контролерів і прогновної аналітики для адаптації внутрішнього мікроклімату будівлі до зовнішніх умов. На його думку, такі моделі мають бути динамічними, тобто здатними до самоналаштування залежно від коливань температури, вологості, інсоляції тощо [48].

Таблиця 1.4 узагальнює еволюцію концепту від класичних інтеграційних стратегій до сучасних когнітивних підходів, що базуються на взаємодії штучного інтелекту, сенсорики та автоматизованого управління в індустріальному середовищі.

Таблиця 1.4

Трактування моделей реалізації енергоадаптивних проєктів у науковій думці

Автор (українською)	Країна / період	Трактування поняття моделі
Ян Ванегас	США / 1990-ті роки	Модель як система інтеграції енергоощадних стратегій, технологій управління життєвим циклом і сталого розвитку.
Джонатан Клементс	Велика Британія / 2000-ті	Модель як адаптивна структура з кліматичним самоналаштуванням, сенсорним управлінням та прогнозною аналітикою.
Маї Хассель	Ізраїль – Німеччина / 2020-ті	Модель як кіберфізична когнітивна система, що здійснює динамічну енергетичну адаптацію до зовнішніх умов.

(Джерело: розроблено автором на основі [32, 48, 56,])

Новітній підхід до організаційно-технологічного структурування таких моделей можна знайти у працях Маї Хассель, ізраїльсько-німецької дослідниці, яка в своїх публікаціях запропонувала бачити енергоадаптивну будівлю як когнітивну одиницю, що здатна самостійно змінювати свій енергетичний профіль у відповідь на зовнішні зміни — від коливань вітру до збільшення навантаження на електромережу. Вона обґрунтовує важливість інтеграції кіберфізичних систем у структуру управління будівлею для досягнення високого рівня саморегуляції в енергетичній взаємодії об'єкта з навколишнім середовищем.

Подальший розвиток теорії моделей реалізації проєктів з підвищеною енергетичною адаптивністю в умовах індустріалізації демонструє зміщення акценту з поодиноких інженерних рішень до комплексних систем, які інтегрують архітектуру, автоматизацію, матеріалознавство, цифрові технології та управлінську методологію. Сучасні дослідники все частіше апелюють до терміну «енергоактивна система будівлі», під якою розуміється така організаційна і технічна структура об'єкта, що дозволяє йому не лише

мінімізувати енергетичні втрати, а й акумулювати, трансформувати та віддавати енергію в мережу за потреби. Це радикально змінює роль будівлі в енергетичному ланцюгу — із пасивного споживача на активного гравця [39].

Такий підхід вже апробується на прикладі реалізованих індустріальних житлових комплексів з пасивними й активними системами опалення, вентиляції, освітлення, з автономними джерелами енергії (сонячними панелями, тепловими насосами, гібридними вітрогенераторами), керованими за допомогою IoT-інфраструктури. Наприклад, у проєктах консорціуму "Smart Living Lab" у Швейцарії, де реалізуються будівлі, повністю оптимізовані під енергоадаптивні сценарії, впроваджується принцип мережевого реагування на енергетичні піки (Demand Response). Суть полягає в тому, що енергоспоживання будівлі автоматично знижується або змінюється у відповідь на сигнали енергетичної компанії, що дозволяє уникнути перевантаження мереж і знижує загальні витрати.

З огляду на вищезазначене, сучасні організаційно-технологічні моделі будівельних підприємств, що прагнуть реалізувати подібні об'єкти, мають будуватися на основі принципів: гнучкої цифрової архітектури, інтеграції енергоефективних компонентів у модульні виробничі процеси, безперервного моніторингу через SCADA або BMS-системи, а також функціональної взаємодії з системами міської інфраструктури. Це означає, що підприємство має володіти не лише виробничою спроможністю, але й відповідною IT-інфраструктурою, розробленою спільно з експертами в галузі енергоаудиту, автоматизації, кіберфізичних систем і міського енергоменеджменту.

Індустріалізовані процеси будівництва потребують також трансформації внутрішніх організаційних структур компаній. Необхідною умовою стає створення мультидисциплінарних команд, які можуть взаємодіяти на стику архітектурного проєктування, енергетичного моделювання та логістичного управління. Керівники проєктів повинні володіти навичками аналізу життєвого циклу будівлі (Life Cycle Analysis), вміти співпрацювати з постачальниками «зелених» матеріалів і розуміти нормативно-правову базу у сфері енергетичної сертифікації.

У процесі поглибленої індустріалізації будівництва формування проєктів із підвищеною енергетичною адаптивністю вимагає не просто впровадження окремих енергоощадних рішень, а створення цілісної організаційно-технологічної моделі, здатної синхронізувати всі учасники та ресурси в єдиному функціональному середовищі. Така модель повинна містити чітко структуровані компоненти, які взаємодіють між собою як у горизонтальній (всередині одного рівня), так і вертикальній площині (між процесними рівнями). Особливу увагу слід приділяти технологічному та комунікаційному зв'язку між цими компонентами в режимі реального часу, адже саме від цієї здатності залежить ефективність енергоадаптації в межах всього проєкту [65].



Рисунок 1.6. Ієрархія структурно-функціональних компонентів організаційно-технологічної моделі енергоадаптивного проєкту (Джерело: розроблено автором на основі [83])

Структурно-функціональні компоненти поділяються на три ключові рівні: стратегічний (керівний), техніко-операційний (виробничий) та функціонально-аналітичний (моніторингово-адаптаційний). Стратегічний рівень забезпечує загальне управління ресурсами, графіками, відповідністю до

стандартів енергоефективності та координує проектну діяльність через ERP-системи. Техніко-операційний рівень зосереджений на фізичній реалізації будівельного процесу, включаючи індустриальні технології виготовлення конструкцій, збірки модулів та встановлення інженерних систем.

Нарешті, функціонально-аналітичний рівень відповідає за верифікацію енергетичних параметрів, обробку даних з сенсорних систем, адаптацію до зміни умов та видачу коригуючих сигналів до базових рівнів [83]. Для кращого розуміння архітектури структурно-функціональної моделі та характеру взаємозв'язків між її рівнями доречно звернутися до рисунка 1.5, який ілюструє ключові функціональні блоки, логіку їх взаємодії та типові канали передачі даних у рамках проєкту. Він демонструє, яким чином відбувається вертикальна та горизонтальна інтеграція компонентів — від стратегічного планування до адаптивного регулювання енергетичних параметрів.

У межах такої моделі ключовою є концепція зворотного зв'язку, що реалізується через системи типу BMS (Building Management System), які поєднують аналітичний блок з виробничим контуром. Ці системи не тільки збирають інформацію про температуру, вологість, споживання енергії, а й автоматично регулюють роботу опалення, вентиляції, освітлення. Наприклад, при підвищенні температури в приміщенні понад заданий параметр, BMS надсилає команду до сенсорного контролера, який зменшує потік тепла або активує жалюзі. Такий підхід дозволяє скоротити витрати на експлуатацію й адаптувати будівлю до реальних умов споживання в конкретний момент часу [13].

Іншим важливим елементом взаємодії є хмарна платформа або єдина база даних, яка дозволяє усім компонентам моделі отримувати і передавати інформацію про стан об'єкта. Наприклад, зміна температурного режиму або порушення графіка постачання модулів фіксується аналітичним рівнем і миттєво передається до керівного рівня для ухвалення коригуючих рішень. Така інтеграція міжрівневої взаємодії забезпечує адаптивність у реальному часі, що є критично важливою умовою функціонування проєкту у змінних умовах зовнішнього середовища чи ринку енергоресурсів. Для формалізації й аналітичного представлення ролі кожного рівня в організаційно-технологічній

моделі важливо системно викласти їхні основні функції, інструменти та сфери відповідальності. Таблиця 1.4. надає порівняльний опис трьох базових рівнів такої моделі, висвітлюючи не лише їхню технічну наповненість, а й взаємозалежність у межах енергоадаптивного управління об'єктом.

Забезпечення міжрівневої взаємодії в моделі можливе тільки за наявності регламентованого інформаційного середовища та уніфікованої системи обміну даними. Наприклад, цифрові двійники будівель (Digital Twins) дозволяють не лише візуалізувати параметри об'єкта, а й моделювати варіанти реагування систем у випадку відхилення від планових значень. Вони працюють як віртуальна репліка реального об'єкта з динамічною оновлюваною інформацією, яка слугує платформою для прийняття рішень керівниками проекту або автоматизованими системами. Саме така візуалізація процесів у поєднанні з механізмами зворотного зв'язку формує стабільне, адаптивне і кероване середовище реалізації складних будівельних рішень [21].

Таблиця 1.5.

Функціональна структура рівнів організаційно-технологічної моделі енергоадаптивного проекту

Рівень	Основні функції	Інструменти / Технології
1. Стратегічний	Координація життєвого циклу проекту, управління нормативними та ресурсними планами	ERP-системи, PLM-платформи, сертифікаційні інтерфейси, хмарні керуючі середовища
2. Операційно-технічний	Реалізація будівельно-монтажних рішень, управління поставками та заводською збіркою	Індустріальні модулі, prefab-лінії, логістичні CRM, автоматизовані монтажні системи
3. Аналітико-контрольний	Обробка сенсорних даних, реагування на відхилення, забезпечення адаптивної дії	BMS, цифрові двійники (Digital Twins), SCADA, IoT-сенсори, аналітика LCA, штучний інтелект

(Джерело розроблено автором на основі [13])

Продовжуючи аналіз після таблиці, слід зазначити, що критичною умовою успішної реалізації організаційно-технологічної моделі енергоадаптивного проекту є побудова безперервного інформаційного контуру, що пов'язує стратегічне управління з техніко-виробничим та

аналітичним рівнями. Такий контур формується не лише через запровадження цифрових систем управління, а й через стандартизацію форматів даних, протоколів взаємодії та періодичності оновлення інформації. Якщо у процесі будівництва або експлуатації відсутній регламент передачі критичних параметрів — наприклад, показників енерговитрат або відхилень у температурному балансі — модель втрачає здатність до адаптації, і рівень її енергоефективності різко знижується [36].

Важливо підкреслити, що в умовах індустріального будівництва, де значна частина об'єктів збирається з готових елементів, взаємодія між цими компонентами моделі має бути не лише організаційною, але й технічно сумісною. Наприклад, енергетичні системи (теплові насоси, рекуператори, сонячні панелі), які інтегруються у збірні модулі, повинні мати уніфіковані інтерфейси для підключення до BMS або інших цифрових середовищ управління. Це означає, що технічна стандартизація має йти паралельно з організаційною інтеграцією, створюючи умови для гнучкого підключення, масштабування та переналаштування енергетичних систем під час змін у режимах експлуатації будівлі.

Окремої уваги заслуговує людський фактор у цій моделі. Міжрівнева взаємодія не буде повноцінною без належної підготовки персоналу, що відповідає за кожен із рівнів. Інженери техніко-виробничого контуру повинні мати навички роботи з цифровими засобами діагностики, монтажу енергоощадних систем і аналізу функціонування вузлів, тоді як персонал управлінського блоку має бути обізнаний із логікою зчитування даних, їхньою валідацією та інтерпретацією з метою коригування управлінських рішень. На цьому ґрунтується сучасна парадигма — перехід від лінійної моделі до динамічної організаційної структури, яка функціонує за принципом адаптивного реагування [46].

Сформована модель виступає не як жорсткий шаблон побудови енергоефективного об'єкта, а як гнучкий механізм, який змінюється разом з умовами, вимогами та технологічними можливостями підприємства. Такий підхід дозволяє зменшити ризики, пов'язані з коливаннями на енергетичних ринках, адаптуватися до оновлених регламентів енергоефективності, а також

підтримувати баланс між швидкістю будівництва, якістю систем та загальною стійкістю проєкту. Тому стратегія реалізації проєктів із підвищеною енергетичною адаптивністю повинна розглядатися як інтегральна частина індустріального підходу — не лише як набір технологій, а як цілісна модель сталого виробничо-енергетичного мислення.

У сучасних умовах прискореної індустріалізації будівництва й переходу до енергоадаптивних моделей реалізації проєктів, традиційна організаційна структура будівельного підприємства більше не відповідає вимогам ринку, якісного управління життєвим циклом об'єкта та динаміки енергоспоживання. Висока технологічна насиченість, цифрова інтегрованість та потреба в міжфункціональній взаємодії вимагають трансформації організаційного ландшафту підприємства у напрямку гнучкої, адаптивної, проєктно-орієнтованої архітектури [67]. Основною тенденцією стає відхід від ієрархічно-жорстких моделей до матрично-мережових конструкцій, де структурні підрозділи об'єднуються навколо проєктних цілей і взаємодіють на основі інформаційної синхронізації.

Ключовою передумовою такої трансформації є формування нового рівня управління — енергетичного інжинірингового ядра, яке поєднує функції аналітики, цифрового супроводу, контролю енергоспоживання, а також технологічної адаптації до змін зовнішнього середовища. Цей підрозділ не існує автономно, а інтегрується в контекст проєктного офісу, BIM-відділу, департаменту виробничо-технологічного супроводу та служби якості. Така структурна модель передбачає створення горизонтальних ліній управління між планово-аналітичними, виробничими та сервісними одиницями. У центрі — управління цифровими потоками, прогнозами навантаження, балансуванню споживання й оперативною реакцією на енергетичні збурення. Рисунок 1.7. показує взаємозв'язки між ключовими функціональними підрозділами.

Одним із найважливіших компонентів у цій трансформації є департамент цифрового моделювання та енергетичної координації. Цей підрозділ не тільки керує створенням та підтримкою цифрових двійників об'єктів, а й інтегрує дані з IoT-пристроїв, аналізує варіанти сценаріїв енергоспоживання та оптимізує параметри управління. У безпосередній координації з ним працює

BIM-група (Building Information Modeling), яка відповідає за формалізацію технічних даних, створення адаптивних шаблонів і логістику матеріалів з урахуванням енергетичних показників. Вони забезпечують цифровий каркас, на який проєкт навішується з точки зору аналітики та технічної реалізації.

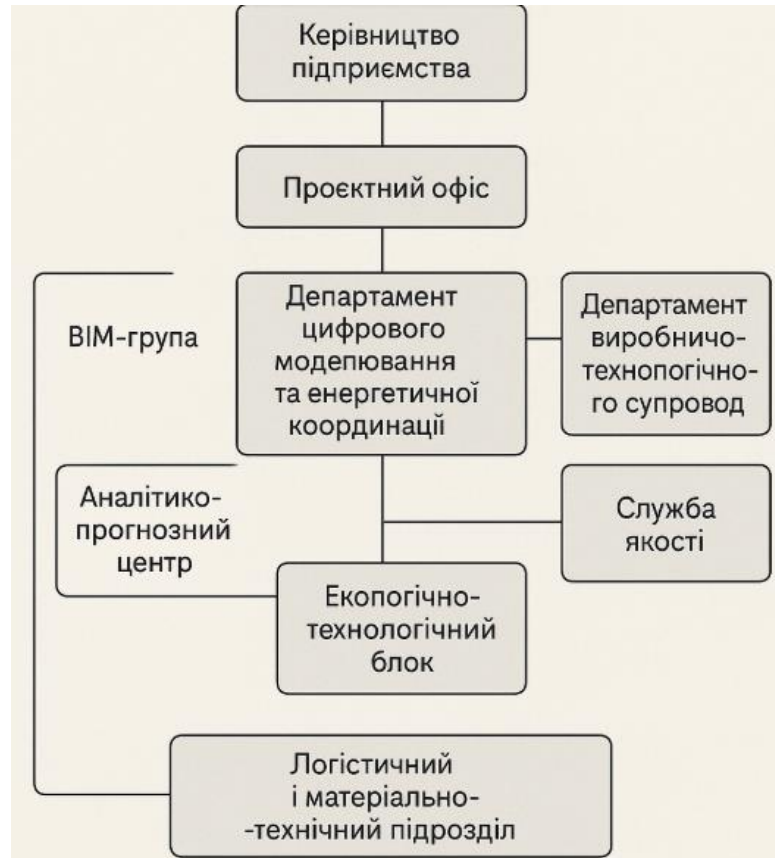


Рисунок 1.7. Модель трансформації організаційної структури будівельного підприємства для реалізації енергоадаптивних проєктів (Джерело: розроблено автором на основі [67])

Наступним елементом трансформаційної структури є відділ операційного енергоменеджменту, який контролює роботу інженерних систем у реальному часі. Його завдання полягає в інтеграції SCADA/BMS-рішень на рівні монтажу та налаштування, а також у співпраці з генеральним підрядником щодо вибору енергоощадного обладнання, перевірки сертифікатів відповідності та погодження змін у проєкті в разі відхилень від стандартів енергоефективності [38].

Він взаємодіє з екологічно-технологічним блоком, який відповідає за відповідність проєкту екологічним нормам, утилізацію, повторне використання матеріалів і дотримання принципів ESG. Трансформація організаційної структури будівельного підприємства в контексті реалізації

енергоадаптивних проєктів передбачає появу нових підрозділів і переосмислення ролей існуючих служб. У процесі адаптації до цифрової інфраструктури та підвищеної технологічної складності проєктів, основні функціональні одиниці підприємства зосереджуються навколо п'яти ключових структурних утворень, які формують ядро управління інноваційним будівельним середовищем. Наведена нижче таблиця 1.6. узагальнює зміст і завдання кожного з цих підрозділів.

Таблиця 1.6.

Ключові структурні підрозділи трансформованої організаційної моделі для енергоадаптивних проєктів

Назва підрозділу	Функціональні завдання
ВІМ-група	Формування інформаційних моделей будівель, налаштування шаблонів адаптивності, візуалізація енергетичних систем
Центр цифрового моделювання	Розробка цифрових двійників, агрегування даних з сенсорних мереж, аналіз варіативних сценаріїв енергоспоживання
Відділ операційного енергоменеджменту	Моніторинг та регулювання роботи інженерних систем, інтеграція SCADA/BMS, контроль сертифікації обладнання
Екологічно-технологічний блок	Забезпечення відповідності ESG-принципам, супровід утилізації та екологічної відповідальності будівель
Аналітико-прогнозний центр	Моделювання навантажень, розрахунок життєвого циклу споживання, створення KPI для проєктного управління

(Джерело: розроблено автором на основі [38])

Синергія між цими підрозділами досягається через формування єдиного цифрового інформаційного середовища, яке працює на платформі інтегрованого управління (Integrated Project Delivery – IPD). У межах цього середовища кожен підрозділ має свої права доступу до даних, передає аналітику у вигляді дашбордів та KPI-панелей, отримує сигнали про відхилення та рекомендації щодо реагування. Важливою умовою функціонування такого середовища є формування гнучких команд на базі крос-функціональної взаємодії, де спеціалісти працюють не у відриві, а в щоденному спільному аналітико-технологічному просторі [43]. Це дозволяє

оперативно вирішувати конфлікти, адаптувати проєкт до змін ринку або технічних обмежень, забезпечуючи стійкість та енергоадаптивність у реальному масштабі часу.

Успішна реалізація трансформаційної організаційної структури неможлива без формування нових принципів внутрішньої координації, що мають ґрунтуватися на прозорості обміну інформацією, спільному плануванні цілей і відповідальності за енергетичний результат на кожному рівні. На відміну від традиційного підходу, де енергоефективність здебільшого сприймається як обов'язок проєктувальника або енергетика, у новій моделі відповідальність за неї розподіляється між усіма задіяними ланками — від закупівель до монтажу, від прогнозу до експлуатації. Саме тому у центрі трансформованої структури має знаходитися не стільки технічна система, скільки культура енергетичної відповідальності як організаційна парадигма.

Важливим є запровадження методів постійного вдосконалення, зокрема використання підходів Lean Construction, Six Sigma та PDCA-циклів в управлінні енергоадаптивними проєктами. Вони дозволяють не лише ідентифікувати втрати або енергетичні вузькі місця, а й системно впливати на швидкість реагування структур, їхню узгодженість і чутливість до змін. Наприклад, щотижневі спринг-аналізи, які використовуються в підрозділі аналітико-прогнозного центру, дозволяють перераховувати навантаження в залежності від погодних умов чи графіків поставок, передаючи миттєві оновлення до монтажних бригад або керівників об'єктів [7]. Таким чином, організаційно-технологічні моделі реалізації енергоадаптивних будівельних проєктів у сучасних умовах зазнають трансформації від традиційних, фрагментованих підходів до інтегрованих цифрово-керованих систем. Така трансформація передбачає поєднання технологічних процесів, управлінських рішень і енергетичних параметрів у межах єдиного цифрового середовища, що функціонує на основі BIM-технологій, систем енергоменеджменту, IoT-інфраструктури та аналітики даних. У цьому контексті організаційно-технологічна модель виступає не лише як інструмент координації ресурсів і

процесів, а як цифрово-інтегрована система управління життєвим циклом проєкту, що забезпечує адаптивність до змін зовнішнього середовища, підвищення енергоефективності та узгодженість дій усіх учасників девелоперського процесу.

1.3. Цифрові інструменти моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень

У сучасному будівництві дедалі більшого значення набуває не лише зведення будівельних об'єктів, а й формування їхньої довгострокової енергоефективності, адаптивності до змін середовища та цифрової інтеграції в управлінські процеси. У цьому контексті виникає потреба у впровадженні комплексних цифрових інструментів, які здатні забезпечити моніторинг, аналітичне моделювання та супровід життєвого циклу будівлі — від початкового проєктування до експлуатації та модернізації. Цифрова трансформація цього процесу охоплює нові архітектури управління даними, розширення функцій інформаційних систем, а також систематизацію енергетичних і технологічних показників, що є критично важливими в умовах переходу до сталого будівництва.

Особливе місце в цьому процесі посідають енергоадаптивні будівельні рішення, які ґрунтуються на принципах реактивної взаємодії з навколишнім середовищем — таких як автоматизована вентиляція, розумне освітлення, управління кліматом на основі поведінкових сценаріїв користувачів тощо. Їхня ефективність напряму залежить від якості цифрового супроводу: наскільки точно і вчасно будівельна система здатна реагувати на зміни температури, вологості, навантаження або інших зовнішніх і внутрішніх факторів. З цією метою застосовуються сенсорні мережі IoT, SCADA-платформи, BIM-середовища, а також інструменти Big Data та Business Intelligence, що дозволяють будувати передбачувані моделі функціонування об'єкта та ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення [57].

Важливо підкреслити, що енергоадаптивні будівельні рішення в умовах цифрової трансформації розглядаються не як окремі технологічні інновації, а

як комплексна система, що поєднує енергоощадні технології, цифрові системи контролю, оптимізовані логістичні рішення та інструменти ресурсозбереження. Такий підхід забезпечує синхронізацію матеріальних, енергетичних та інформаційних потоків у межах реалізації будівельного проєкту, сприяючи підвищенню ефективності використання ресурсів, зниженню втрат і досягненню сталих показників функціонування об'єкта.

Моніторинг у цифровому середовищі перестає бути суто контрольним інструментом і перетворюється на активну складову процесного управління. Завдяки впровадженню систем реального часу, цифрові платформи здатні ідентифікувати відхилення, передбачати збої, ініціювати технічні або адміністративні дії на основі заздалегідь запрограмованих сценаріїв. У поєднанні з інструментами цифрового моделювання — зокрема BIM, Revit, Twinmotion, EnergyPlus або Green Building Studio — відкривається можливість не лише візуалізувати майбутню будівлю, а й змоделювати її енергетичну поведінку в різних кліматичних та експлуатаційних умовах. Таке моделювання стає основою для ухвалення рішень на етапі проєктування, що значно знижує ризики у майбутньому та підвищує економічну обґрунтованість будівництва.

Супровід життєвого циклу в цифровому форматі означає побудову єдиного інформаційного простору, де всі етапи — планування, будівництво, здача в експлуатацію, технічне обслуговування та оновлення — інтегруються в логічну й аналітичну систему. Завдяки впровадженню платформ типу BMS (Building Management Systems), ERP-систем у поєднанні з BI-модулями (наприклад, Power BI, Tableau), відбувається створення так званого "цифрового двійника" об'єкта, який у режимі реального часу дозволяє спостерігати, управляти та оптимізувати всі ключові показники [68]. Таким чином, цифрові інструменти перетворюються на головний засіб реалізації концепції сталого будівництва, де ефективність, безпечність, адаптивність та економічність не є результатом фінального аудиту, а постійно підтримуються завдяки гнучким технологіям аналізу та управління.

За такого підходу цифрові інструменти стають не лише технічним засобом, а й методологічною платформою для зміни всієї логіки реалізації будівельного проєкту. У межах цієї логіки традиційні розриви між фазами

будівництва зникають, натомість формується безперервний аналітичний цикл, де рішення приймаються на основі даних, що генеруються самою будівлею. Це, своєю чергою, забезпечує значно вищий рівень готовності об'єкта до змін, стійкість до зовнішніх впливів та відповідність сучасним критеріям енергоефективності. Наступні розділи буде присвячено поглибленому аналізу функцій цифрового моніторингу, практик моделювання та алгоритмів супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень.

Енергоадаптивне будівництво в умовах цифрової трансформації розглядається як системна концепція, яка поєднує принципи сталого розвитку, енергоефективності та технологічної чутливості об'єктів до змін зовнішнього і внутрішнього середовища. На відміну від традиційних моделей управління енергоспоживанням, енергоадаптивні підходи передбачають активну реакцію систем будівлі на коливання кліматичних, експлуатаційних або поведінкових факторів. Це означає не лише зменшення споживання енергоресурсів, а й забезпечення адаптаційної логіки — коли сама будівля, її конструктивні елементи та інженерні системи здатні змінювати режим функціонування у відповідь на нові умови.

Теоретико-методологічна основа цифрового моніторингу в такому будівництві ґрунтується на взаємозв'язку між трьома головними складовими: даними (Data), інтерпретацією (Analytics) та дією (Actuation). Згідно з цією логікою, цифрові сенсори фіксують вхідні сигнали про стан середовища — температуру, вологість, тиск, рівень CO₂, рівень освітлення, вібрації, а також поведінку користувачів (кількість людей у приміщенні, час перебування, траєкторії руху). Ці сигнали обробляються аналітичними модулями (BI-системи, алгоритми прогнозування, машинне навчання), після чого надходять до виконавчих блоків — систем опалення, вентиляції, освітлення або керування навантаженням, які коригують свої параметри у реальному часі [17].

Одним із ключових інструментів, що забезпечує функціонування такої системи, є сенсорні мережі з протоколами IoT, які працюють як у дротовому, так і у бездротовому форматах (LoRaWAN, Zigbee, NB-IoT). Завдяки цим протоколам можна досягти глибокої деталізації даних навіть у розгалужених об'єктах — від житлових будинків до інфраструктурних комплексів.

Інформація, отримана з таких сенсорів, передається до SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition) або BMS-платформ (Building Management Systems), які виступають інтеграторами та диспетчерськими центрами. Саме ці системи дозволяють централізовано аналізувати стан об'єкта, прогнозувати пікові навантаження, ідентифікувати критичні відхилення або планувати профілактичне обслуговування [4].

Сутність цифрового моніторингу в енергоадаптивному будівництві полягає не в одноразовому контролі, а в створенні континууму вимірювання, де інформація оновлюється з високою частотою і використовується як в короткостроковому, так і в довгостроковому стратегічному управлінні. У цьому контексті формуються дві моделі цифрового моніторингу: оперативна (real-time monitoring) і предиктивна (predictive monitoring). Перша забезпечує миттєве реагування на відхилення та нештатні ситуації, друга — дозволяє через історичні дані, моделі прогнозування й аналітичні панелі оцінювати майбутню поведінку об'єкта, формувати плани термореновації або оптимізації [17].

Інфраструктура цифрового моніторингу також передбачає багаторівневу архітектуру — від рівня фізичних сенсорів і локальних контролерів до хмарних платформ з API-інтеграціями, де проводиться централізований аналіз на основі наборів KPI: середнє споживання, пік навантаження, частота спрацьовування аварійного режиму, теплові втрати через огорожувальні конструкції тощо. Енергоадаптивні об'єкти, які функціонують на основі таких систем, демонструють не лише вищу енергоефективність, а й стабільність в умовах зовнішніх змін — наприклад, температурних коливань, змін тарифної політики чи дефіциту ресурсів [4].

Для наочного представлення структурної логіки цифрового моніторингу в енергоадаптивному будівництві представлено рисунок 1.8, яка ілюструє взаємозв'язок між сенсорними пристроями, цифровими платформами обробки даних та виконавчими системами управління. Вона відображає ключові етапи інформаційного потоку — від вимірювання параметрів середовища до автоматизованої дії — що є основою енергоадаптивного реагування в будівельному середовищі.

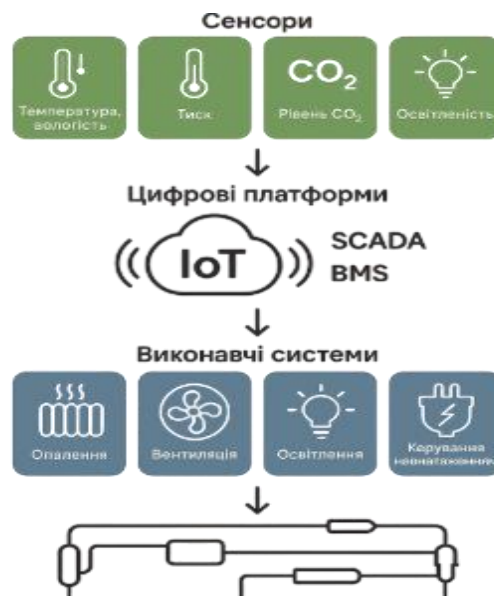


Рисунок 1.8. Архітектура цифрового моніторингу енергоадаптивного об'єкта (Джерело: розроблено автором на основі [17])

Експлуатаційна фаза життєвого циклу будівельного об'єкта є завершальною, але водночас найбільш тривалою і ресурсноємною складовою функціонування будь-якої інженерної системи. Вона охоплює період від моменту введення будівлі в експлуатацію після завершення будівельно-монтажних робіт і до її модернізації, реконструкції або виведення з обігу. У межах цієї фази здійснюється забезпечення безперебійної роботи всіх конструктивних та інженерних підсистем об'єкта, контроль за технічним станом, обслуговування, ремонт, а також аналіз ефективності використання ресурсів — енергетичних, матеріальних, водних, логістичних. Основними завданнями експлуатаційної фази є підтримання належного технічного стану об'єкта, безпечного середовища для перебування користувачів, забезпечення нормативного рівня комфорту (температура, вологість, освітлення, вентиляція), а також мінімізація витрат через раціональне використання ресурсів. Особливої актуальності ці завдання набувають в умовах функціонування енергоадаптивних будівель, де точність, адаптивність і швидкість реагування систем прямо впливають на енергоспоживання, екологічні характеристики та тривалість безаварійної експлуатації.

Ця фаза є найдовшою і водночас найвитратнішою в життєвому циклі будівельного об'єкта, саме тому ефективно її супроводження потребує точного, автоматизованого й адаптивного цифрового управління [90]. Сучасні цифрові

платформи, дашборди та аналітичні панелі трансформують підходи до обслуговування будівель, забезпечуючи не лише моніторинг поточних параметрів, а й виявлення відхилень, прогнозування майбутніх навантажень, прийняття рішень у режимі реального часу та оптимізацію ресурсів. Замість реактивного втручання у випадку збоїв, цифрові рішення дозволяють сформувати превентивну модель супроводу, яка орієнтована на запобігання ризикам, зниження втрат і підвищення енергоефективності.

Ключовим елементом такої системи є автоматизовані панелі моніторингу, що об'єднують дані з усіх підсистем об'єкта: опалення, вентиляції, кондиціонування, водопостачання, електрики, безпеки, навантаження тощо. Завдяки IoT-архітектурі та хмарним платформам (на кшталт AWS IoT, Microsoft Azure Digital Twins, Siemens Desigo CC) ці панелі можуть бути інтегровані в загальносистемні дашборди управління, доступні адміністрації об'єкта, операторам та сервісним підрядникам [28]. Така візуалізація дозволяє контролювати енерговитрати, споживання ресурсів, справність систем у реальному часі, а також виводити ключові KPI, порівнюючи їх із нормативними чи прогнозними значеннями.

Важливою інновацією експлуатаційного супроводу є інтеграція прогнозних модулів, які дозволяють на основі історичних даних і моделей машинного навчання передбачати пікові навантаження, потенційні збої, зношення обладнання або зміну поведінки користувачів. Наприклад, у разі погіршення погоди система може автоматично активувати додаткове обігрівання певних зон, перевірити стан герметизації вікон або запустити режим енергозбереження. Системи типу Energy Management Systems (EMS), які використовуються у поєднанні з BI-інструментами (Power BI, Qlik, Tableau), дозволяють формувати динамічні сценарії управління, ураховуючи зовнішні фактори — кліматичні зміни, зміну тарифів, очікувану кількість відвідувачів тощо. У центрі цієї архітектури перебуває інтелектуальний аналітичний дашборд, що синтезує великі обсяги даних у зрозумілі графіки, сигнали, звіти й алгоритми дій. Дашборди поділяються на стратегічні (для керівників і власників об'єктів), оперативні (для диспетчерів і технічного персоналу) та аналітичні (для фахівців з енергоаудиту, технічного

обслуговування, планування оновлень). Їх використання дозволяє не лише управляти поточним функціонуванням будівлі, а й коригувати стратегії її модернізації, розробляти інвестиційні програми, обґрунтовувати заходи енергоефективності.

Інтеграція цифрових систем у експлуатаційну фазу створює нову якість управління будівельними об'єктами — з підвищеною точністю, передбачуваністю, адаптивністю та прозорістю [28]. Для систематизації інструментів, які використовуються на цьому етапі, нижче наведено таблицю 1.6 з прикладами платформ, функцій і ефектів від їх застосування.

Наведена класифікація цифрових інструментів демонструє, як цифрові платформи впливають на ефективність експлуатаційного етапу життєвого циклу енергоадаптивного об'єкта. Від моніторингу в реальному часі до прогнозної аналітики — усі ці технології формують стійку цифрову інфраструктуру управління, що забезпечує максимальну продуктивність та мінімальні втрати.

Зазначимо також, що управління енергоефективністю сучасних будівельних об'єктів дедалі більше набуває характеристик даних, які потребують складної інтерпретації, багатофакторного аналізу та гнучкої адаптації до змін середовища. Інтеграція цифрових рішень у процес прийняття управлінських рішень дозволяє перетворити фрагментовані, нефільтровані потоки інформації на обґрунтовані сценарії дій. Особливо це стосується об'єктів енергоадаптивного типу, для яких точність, швидкість і аналітична глибина прийняття рішень мають визначальне значення як у короткотерміновій експлуатації, так і в довгостроковій стратегії модернізації [53].

Центральне місце в цій інтеграції займають системи Business Intelligence (BI), які об'єднують дані з десятків або сотень сенсорів, технічних блоків, комунальних показників, параметрів навколишнього середовища та поведінки користувачів.

Таблиця 1.7.

Цифрові інструменти супроводу експлуатаційної фази енергоадаптивних
будівель

Інструмент / платформа	Функціональне призначення	Приклад застосування	Ефекти
BMS (Building Management System)	Централізоване управління інженерними системами об'єкта	Desigo CC, Honeywell EBI	Автоматизація, скорочення витрат на обслуговування
SCADA-системи	Моніторинг та диспетчеризація технологічних процесів	Ignition, WinCC	Реакція на аварійні ситуації в реальному часі
BI-дошки (аналітичні дашборди)	Аналітика енерговитрат і продуктивності систем	Power BI, Tableau	Виявлення втрат, планування оптимізації
EMS (Energy Management System)	Управління енерговитратами та формування сценаріїв енергоспоживання	Schneider EcoStruxure, Energy Star Portfolio Manager	Зменшення пікових навантажень, енергозбереження
CMMS (управління техобслуговуванням)	Планування ремонтів, облік зношування, контроль витрат	Archibus, UpKeep	Профілактика збоїв, оптимізація графіків сервісу
Прогнозні модулі (AI/ML)	Передбачення відмов, оцінка ефективності майбутніх дій	Azure AI, IBM Watson IoT	Зниження аварійності, підтримка управлінських рішень
API-інтеграції з погодними сервісами	Динамічна адаптація режимів будівлі до кліматичних умов	OpenWeatherMap API, Climacell	Прогнозування змін і автоматичне переналаштування

(Джерело: розроблено автором на основі [28])

За допомогою платформ типу Power BI, QlikView, Tableau або Google Data Studio формується аналітичний ландшафт, що дозволяє не лише візуалізувати критичні індикатори, а й встановлювати залежності між ними, розраховувати тренди, сценарії розвитку, виявляти аномалії.

Одним із ключових напрямів такої аналітики є КРІ-індикатори енергоефективності. Це не лише базові показники (як-от споживання електроенергії на квадратний метр площі), а й комплексні інтегровані метрики — частота перевищення порогових значень температури в приміщеннях, тривалість роботи системи HVAC у піковому режимі, втрати тепла через

огороджувальні конструкції, динаміка споживання у прив'язці до зовнішніх умов. Коли такі дані поєднуються з погодинною інформацією про температуру, вологість, кількість людей у приміщенні або навіть тарифи на електроенергію — створюється унікальний аналітичний простір для прийняття рішень [24].

Цифрові сенсорні панелі та дашборди, з'єднані в одну систему ВІ, надають змогу не лише спостерігати за поточним станом об'єкта, а й моделювати різні варіанти реагування. Наприклад, якщо система фіксує зниження ефективності вентиляції при зростанні вологості, вона може автоматично запропонувати сценарій її адаптації або вказати на необхідність технічного огляду. У випадку перегріву окремих приміщень — формується попередження про неефективність розподілу теплового навантаження. Усі ці сигнали можуть відображатися як у вигляді інтерактивних графіків, так і в форматі дійових інструкцій або автоматично активованих процесів через АРІ інтеграцію з BMS-системами. Наведемо рисунок 1.9, який візуалізує взаємодію ВІ-платформ, сенсорних панелей, КРІ-індикаторів та управлінських сценаріїв у контексті ухвалення рішень щодо енергоефективності.

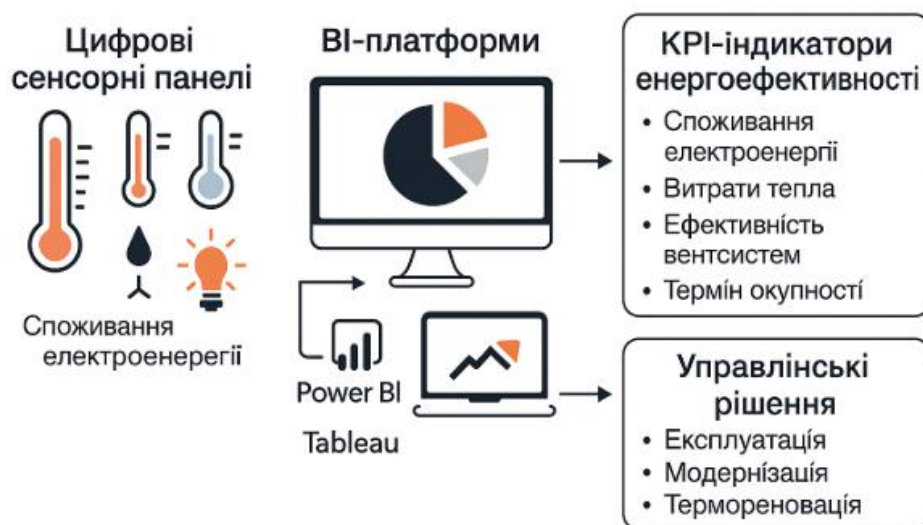


Рисунок 1.9. Цифрова аналітика в системі управління енергоефективністю (Джерело: розроблено автором на основі [24])

У випадках стратегічного планування (наприклад, термореновація будівлі, впровадження нових матеріалів, модернізація систем кондиціонування) ВІ-аналітика дозволяє змоделювати ефект від впровадження кожного рішення, визначити точку рентабельності, період окупності, екологічний ефект та взаємозв'язок із нормативними вимогами. Таким чином, цифрові системи

стають не лише джерелом інформації, а повноцінним інструментом data-driven management, який забезпечує стійкість об'єкта, оптимізацію ресурсів і підзвітність усіх процесів у межах експлуатаційного циклу.

Також інформаційне забезпечення життєвого циклу енергоадаптивного будівельного об'єкта базується на складній багаторівневій архітектурі цифрової взаємодії, у якій кожен модуль виконує специфічну роль, формуючи єдину безперервну екосистему прийняття рішень. Ця архітектура охоплює повний контур: від фізичних сенсорів, що реєструють динаміку середовища та поведінку користувачів, до систем аналітики, хмарного зберігання та виконавчих механізмів, які реалізують реакцію на основі інтерпретованих даних.

Першим рівнем є сенсорна мережа, яка охоплює датчики температури, вологості, CO₂, освітленості, шуму, вібрації, а також інфрачервоні лічильники присутності та навантаження. У межах енергоадаптивного підходу особливо важливими є мультисенсорні пристрої, здатні синхронно збирати кілька типів даних для зменшення затримок у прийнятті рішень [26]. Дані з таких сенсорів передаються до локального контролера або безпосередньо в дата-хаб — вузол первинної агрегації даних. Тут відбувається фільтрація шумів, формування пакетів, застосування базових алгоритмів порогового реагування (наприклад, аварійного сповіщення при перевищенні допустимих значень).

Наступний рівень — хмарна інфраструктура. Дані передаються через MQTT, HTTPS або AMQP-протоколи у централізовану систему зберігання та обробки (Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud IoT). У хмарі здійснюється зберігання великих обсягів інформації, інтеграція з зовнішніми джерелами (погодні сервіси, тарифні бази, геолокаційні дані) та запуск аналітичних модулів. Саме на цьому рівні починає діяти ядро цифрового супроводу: ВІ-алгоритми, моделі прогнозування, сценарні симуляції, машинне навчання для оптимізації рішень [26].

Разом із тим проведений аналіз показує, що наявні цифрові інструменти часто впроваджуються ізольовано: системи моніторингу не повною мірою інтегровані з організаційно-технологічним плануванням, ВІ-аналітика функціонує окремо від ВІМ-середовища, а експлуатаційні дані не завжди

використовуються для коригування проєктних і управлінських рішень. Це вказує на необхідність розроблення інтегрованого підходу, у межах якого цифрові засоби будуть поєднані в єдину систему підтримки життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень.

Аналітична панель — це інтерфейсна оболонка, через яку технічні спеціалісти, менеджери експлуатації, проєктні аналітики та власники об'єктів отримують доступ до реальних та історичних показників. У панелі виводяться інтерактивні графіки, теплові мапи, KPI-індикатори, сигнали тривоги, а також рекомендації щодо подальших дій. Модулі типу Power BI, Tableau, Zoho Analytics можуть бути кастомізовані під кожну роль у системі, забезпечуючи багаторівневу персоналізацію та контроль доступу.

На останньому рівні знаходяться виконавчі органи: системи керування мікрокліматом, освітленням, вентиляцією, доступом, безпекою. Вони реалізують інструкції, які надходять від аналітичних платформ через інтегровані API [26]. Відбувається або автоматичне спрацювання (наприклад, увімкнення аварійного провітрювання при перевищенні рівня CO₂), або напівавтоматичне — з участю диспетчера, якому система рекомендує оптимальні параметри.

Цифрова архітектура супроводу також вимагає дотримання стандартів обміну даними, серед яких особливо поширеними є BACnet, Modbus TCP, KNX, OPC UA, які забезпечують сумісність між різними пристроями й платформами. Надійність такої взаємодії ґрунтується на використанні протоколів безпеки — TLS/SSL-шифрування, двофакторна автентифікація, контроль доступу на основі ролей, постійний аудит транзакцій і журналювання подій.

Важливим елементом є також синхронізація версій конфігурацій і цифрових двійників будівель: при кожному оновленні проєктної або технічної документації ці зміни мають відображатися у відповідних модулях аналітики, щоб уникнути розбіжностей між віртуальними параметрами й фізичним станом об'єкта. Це досягається шляхом впровадження BIM-інтеграції з платформами типу Revit, Navisworks, які передають актуальні дані в реальному часі до інформаційної моделі об'єкта [66].

Оцінка ефективності цифрових інструментів, які впроваджуються у межах енергоадаптивного будівництва, має стратегічне значення для визначення доцільності інвестицій, підтвердження досягнення цільових показників та забезпечення обґрунтованості управлінських рішень. У сучасній практиці застосовується підхід, який ґрунтується на комплексному аналізі технічної, економічної, екологічної та операційної результативності цифрових рішень. Це дозволяє виявити не лише безпосередній ефект (зменшення енергоспоживання), а й опосередковані впливи: підвищення тривалості експлуатації інженерних систем, скорочення частоти аварій, зменшення витрат на технічне обслуговування тощо.

У межах цифрового підходу до управління енергоадаптивними об'єктами формується тісний взаємозв'язок між інформаційними, енергетичними та технологічними характеристиками будівлі. Інформаційні потоки забезпечують збір і передачу даних, енергетичні — відображають рівень споживання та ефективності використання ресурсів, а технологічні — визначають способи реалізації управлінських рішень. Їх інтеграція в єдиному цифровому контурі управління дозволяє забезпечити цілісність процесів, підвищити точність прогнозування та створити основу для адаптивного управління життєвим циклом об'єкта.

Одним із базових підходів до такого аналізу є розробка системи формалізованих КРІ, які дають змогу кількісно відстежувати ефективність функціонування цифрових платформ, модулів моніторингу, аналітичних панелей, виконавчих систем у реальному часі та в динаміці. Ці показники умовно поділяються на чотири групи: енергетичні, економічні, технічні та екологічні [79].

Енергетичні КРІ дозволяють оцінити зміну питомого споживання ресурсів до і після впровадження цифрових рішень. До них належать показники середньодобового енергоспоживання, енергетичної щільності на 1 м², коефіцієнта ефективності систем HVAC. Водночас економічні КРІ зосереджуються на таких аспектах, як економія витрат на обслуговування, зниження втрат при передачі ресурсів, скорочення витрат на аварійне усунення пошкоджень, а також рентабельність цифрових інвестицій.

Технічні КРІ охоплюють тривалість безперебійної роботи обладнання, кількість несправностей на одиницю часу, час реакції системи на відхилення, тривалість відновлення нормального режиму. Вони мають ключове значення при оцінці довгострокової надійності цифрової інфраструктури. Нарешті, екологічні КРІ — це показники зниження вуглецевого сліду, зменшення викидів CO₂, рівня використання невідновлюваних джерел енергії, відповідності критеріям екологічної сертифікації (наприклад, BREEAM, LEED) [49].

Нижче представлено таблицю 1.8. з прикладами ключових КРІ, які застосовуються для оцінювання ефективності цифрових інструментів у контексті енергоадаптивного управління будівельними об'єктами.

Таблиця 1.8.

Ключові КРІ для оцінювання ефективності цифрових інструментів в енергоадаптивному будівництві

Категорія КРІ	Показник	Мета оцінювання
Енергетичні	Середнє енергоспоживання на м ²	Визначення ефективності енергоспоживання
	Коефіцієнт використання систем вентиляції (COP)	Порівняння енерговіддачі до витрат
Економічні	Економія експлуатаційних витрат	Підтвердження скорочення витрат
	ROI цифрового рішення	Обґрунтування окупності цифрових систем
Технічні	Середній час безвідмовної роботи обладнання (MTBF)	Визначення технічної надійності систем
	Середній час відновлення після збою (MTTR)	Швидкість реагування на критичні відхилення
Екологічні	Скорочення викидів CO ₂	Аналіз екологічного ефекту від цифрового управління
	Рівень використання ВДЕ у структурі споживання	Підвищення екологічної відповідальності об'єкта

(Джерело: розроблено автором на основі [79])

Застосування зазначених КРІ дозволяє будівельним компаніям, девелоперам і операторам інфраструктури проводити системний аудит цифрових ініціатив, визначати реальні ефекти, виявляти зони неефективності та формувати довгострокову стратегію управління життєвим циклом енергоадаптивного об'єкта. Інтеграція таких показників у цифрові дашборди забезпечує прозорість, підзвітність і можливість оперативного реагування [97].

Сформована система КРІ має значення не лише для оцінювання поточного стану енергоадаптивного об'єкта, а й для побудови подальшого методичного інструментарію дослідження. Визначені енергетичні, економічні, технічні та екологічні показники можуть бути використані як критерії оцінювання ефективності організаційно-технологічних рішень, а також як база для вибору сценаріїв цифрового супроводу будівельного проєкту.

Таким чином, у межах розкриття цифрових інструментів моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень було сформовано системне уявлення про сучасні технологічні підходи до управління будівельними об'єктами на всіх фазах їх існування. Визначено, що цифрова трансформація енергоадаптивного будівництва базується на багаторівневій взаємодії сенсорних систем, хмарних платформ, аналітичних модулів і виконавчих механізмів, які формують єдиний інформаційний простір управління.

Окрему увагу було приділено аналізу інструментів експлуатаційного супроводу — від SCADA і BMS-систем до BI-панелей і прогнозних моделей, що дозволяють приймати адаптивні та обґрунтовані рішення у режимі реального часу. Показано, як інтеграція BI-середовищ (Power BI, Tableau), КРІ-метрик і сенсорних даних створює основу для гнучкого управління модернізацією, термореновацією та оптимізацією енергоспоживання. Також було сформовано архітектурну модель цифрової взаємодії, у якій узгоджено протоколи обміну, стандарти безпеки й аналітичну візуалізацію процесів.

Завершальним етапом стало формування формалізованої системи оцінювання ефективності цифрових рішень — через показники економії енергоресурсів, зниження вуглецевого сліду, тривалості безвідмовної експлуатації та окупності цифрових інвестицій. Це забезпечує методологічну базу для системного контролю, прогнозування та розвитку енергоадаптивного будівельного середовища відповідно до принципів сталості, технологічної чутливості та енергетичної ефективності.

У контексті предмета дослідження цифрові інструменти моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу слід розглядати не як допоміжні технічні засоби, а як структурний елемент організаційно-технологічної системи управління енергоадаптивними будівельними проєктами. Саме вони забезпечують збирання, оброблення та інтерпретацію даних, необхідних для координації рішень на етапах проєктування, реалізації, експлуатації та модернізації об'єкта.

Цифрові інструменти впливають не лише на технічний контроль параметрів будівлі, а й на організацію будівельного процесу загалом. Їх використання змінює підходи до планування робіт, координації учасників проєкту, диспетчеризації ресурсів, управління експлуатаційними режимами та прийняття рішень щодо модернізації об'єкта. Таким чином, цифровізація виступає чинником трансформації організаційно-технологічної структури будівництва в напрямі її більшої адаптивності, прозорості та інтегрованості.

Отже, дослідження цифрових інструментів у межах цього підрозділу спрямоване на обґрунтування інформаційно-аналітичної бази, необхідної для формування цифрово-керованої енергоадаптивної організаційно-технологічної моделі будівництва. Їх аналіз дозволяє визначити, які саме дані, функції та управлінські механізми мають бути інтегровані в систему управління для досягнення цільових параметрів енергоефективності та адаптивності будівельного об'єкта.

Життєвий цикл енергоадаптивного будівельного об'єкта в межах даного дослідження розглядається як інтегральний каркас, у межах якого поєднуються проєктні, будівельні, експлуатаційні та модернізаційні рішення. Такий підхід дозволяє відмовитися від фрагментарного розгляду окремих фаз і перейти до цілісної моделі управління, де цифрові інструменти забезпечують безперервність інформаційного супроводу та узгодженість рішень на всіх етапах існування об'єкта.

Таким чином, результати теоретичного дослідження засвідчили наявність методологічного розриву між сучасними вимогами до

енергоефективності та існуючими організаційно-технологічними підходами до управління будівництвом. Встановлено, що відсутність інтегрованих цифрово-керованих моделей, які поєднують BIM, BEMS, IoT та аналітичні системи, обмежує можливості підвищення ефективності енергоадаптивних будівельних проєктів.

Це зумовлює необхідність формування методичного підходу, який забезпечує узгоджену інтеграцію інформаційних, енергетичних та технологічних процесів у межах єдиного цифрового середовища управління.

З урахуванням зазначеного, у розділі 2 дисертації розроблено методичні положення формування цифрово-керованої енергоадаптивної організаційно-технологічної моделі будівництва, що забезпечує підвищення ефективності реалізації будівельних девелоперських проєктів в умовах невизначеності.

Висновки до розділу 1

1. Обґрунтовано нагальність дослідження в контексті модернізації будівельної галузі та її післявоєнного відновлення, що супроводжується зростанням вимог до енергоефективності та цифрової зрілості проєктів. Визначено, що енергоадаптивні проєкти виступають ключовим інструментом сталого розвитку, поєднуючи екологічні, економічні та соціальні пріоритети. Перехід до цифровізованих організаційно-технологічних моделей формує основу для створення автономних і ресурсозберігаючих об'єктів. Інтеграція BIM-технологій, аналітики даних і автоматизованого моніторингу з рішеннями у сфері відновлюваної енергетики підвищує узгодженість дій стейкхолдерів. У результаті забезпечується зростання загальної ефективності девелоперського процесу та стійкості будівельних проєктів

2. Доведена доцільність формування комплексного інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів будівництва. Доведено, що сучасні умови розвитку будівельної галузі вимагають інтеграції цифрових технологій з організаційно-технологічними рішеннями управління проєктами. Такий інструментарій забезпечує системну взаємодію між етапами планування, реалізації та

контролю будівельних процесів. Його застосування дозволяє підвищити узгодженість дій учасників проєкту та адаптувати управлінські механізми до вимог енергоефективності. Визначено, що поєднання цифрових і організаційно-технологічних компонентів є необхідною умовою підвищення результативності сучасного будівельного девелопменту.

3. Установлено, що базисом запропонованого інструментарію є концепція цифрової енергоадаптивної організаційно-технологічної моделі будівництва. Така модель поєднує детальне технологічне планування з можливостями цифрової координації та моніторингу проєктних рішень. Її впровадження спрямоване на забезпечення гнучкої адаптації будівельних процесів до вимог енергоощадних проєктів. Доведено, що цифрове середовище управління сприяє підвищенню точності планових розрахунків і якості управлінських рішень. Це створює передумови для зростання енергоефективності та керованості будівництва на всіх стадіях життєвого циклу об'єкта.

4. У першому розділі сформовано концептуально-теоретичний каркас дослідження, що ґрунтується на систематизації сучасних підходів до понятійного апарату будівельного девелопменту. Уточнено зміст і наукову роль цифрової енергоадаптивної організаційно-технологічної моделі як ключової категорії дослідження. Розкрито її інтеграційний характер, який поєднує технологічні процеси будівництва з енергетичними та інформаційними параметрами проєкту. Доведено, що ефективне управління сучасними будівельними проєктами можливе лише за умови синхронізації цих параметрів у межах єдиного цифрового середовища. Такий підхід створює теоретичне підґрунтя для подальшого розвитку цифрово орієнтованих моделей управління будівництвом.

5. Обґрунтовано, що концепція дослідження базується на поєднанні принципів сталого розвитку, цифрової трансформації та енергоменеджменту, що визначає міждисциплінарний характер роботи. Енергоадаптивні проєкти розглянуто як результат синтезу екологічних, технологічних і управлінських

інновацій, спрямованих на зниження енергоспоживання та раціоналізацію використання ресурсів. Визначено, що цифровізація будівельних процесів створює передумови для точного енергетичного планування та підвищення продуктивності реалізації проєктів. Сформульована наукова гіпотеза підтверджує доцільність трансформації традиційних організаційно-технологічних моделей у цифрово-керовані, енергоорієнтовані системи. Інтеграція BIM, BEMS, IoT і аналітики даних розглядається як ключовий механізм підвищення ефективності енергоадаптивних проєктів.

6. У даному розділі обґрунтовано стратегічну роль оцінювання ефективності цифрових інструментів в енергоадаптивному будівництві як основи для прийняття інвестиційно та управлінськи обґрунтованих рішень. Визначено доцільність застосування комплексного підходу до аналізу результативності цифрових рішень, який охоплює технічні, економічні, енергетичні та екологічні аспекти. Показано, що такий підхід дозволяє виявляти не лише прямі ефекти у вигляді зниження енергоспоживання, а й опосередковані результати — підвищення надійності систем, скорочення аварійності та витрат на експлуатацію. Це формує підґрунтя для системного управління ефективністю енергоадаптивних проєктів протягом усього життєвого циклу.

7. Впровадження формалізованої системи KPI є ключовим інструментом кількісної оцінки ефективності цифрових платформ і систем управління в енергоадаптивному будівництві. Запропонований поділ показників на енергетичні, економічні, технічні та екологічні забезпечує багатовимірне бачення результативності цифрової трансформації будівельних об'єктів. Інтеграція KPI у цифрові дашборди, BI-середовища та системи моніторингу реального часу підвищує прозорість, підзвітність і оперативність управлінських рішень. Сформована система оцінювання створює методологічну основу для прогнозування, контролю та стратегічного розвитку енергоадаптивного будівельного середовища відповідно до принципів сталого розвитку та енергоефективності.

8. У результаті проведеного аналізу встановлено, що сучасні енергоадаптивні будівельні проєкти формуються як інтегровані системи, у яких поєднуються енергетичні, технологічні, інформаційні та організаційно-управлінські компоненти. Це дозволяє розглядати їх як комплекс інновацій, що забезпечують досягнення цілей сталого розвитку, підвищення енергоефективності та цифрової зрілості будівельної галузі.

9. На основі узагальнення теоретичних положень, розглянутих у розділі, сформульовано наукову гіпотезу дослідження, яка полягає в тому, що підвищення ефективності енергоадаптивних будівельних проєктів досягається шляхом трансформації традиційних організаційно-технологічних моделей у цифрово-керовані системи управління, що інтегрують BIM-технології, системи енергоменеджменту, IoT-інфраструктуру, аналітику даних та модернізовані механізми організаційно-технологічного забезпечення.

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [100, 101, 104, 107, 112].

РОЗДІЛ 2. ІНСТРУМЕНТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОАДАПТИВНИМИ ПРОЄКТАМИ НА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ РІВНІ

2.1. Архітектура технічних рішень для проєктів із підвищеними вимогами до енергоефективності

У даному розділі розроблено та науково обґрунтовано авторський методичний базис інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів. Авторський підхід ґрунтується на поєднанні архітектурно-технічних, управлінсько-організаційних та цифрово-аналітичних компонентів у межах єдиної функціонально-цифрової системи управління.

Методичний базис інструментарію сформовано як цілісну систему взаємопов'язаних положень, моделей, критеріїв, процедур та цифрових механізмів, орієнтованих на забезпечення енергоефективності, адаптивності, керованості та цифрової прозорості життєвого циклу енергоадаптивного будівельного проєкту. У межах дослідження визначено принципи формування функціонально-цифрової системи управління енергоадаптивними проєктами, до яких віднесено: принцип системної інтеграції архітектурних, інженерних, інформаційних та енергетичних компонентів; принцип адаптивності до змін зовнішнього середовища та режимів експлуатації; принцип цифрової сумісності рішень у середовищах BIM, BMS, EMS, IoT та Digital Twin; принцип енергоефективності як базового критерію проєктування й управління; принцип безперервності цифрового супроводу протягом усього життєвого циклу об'єкта; принцип багатокритеріальності оцінювання результатів реалізації проєкту.

У межах даного дослідження під авторським методичним базисом інструментарію управління енергоадаптивними проєктами пропонується розуміти інтегровану систему принципів, моделей, цифрових механізмів та

управлінських процедур, яка забезпечує узгоджене функціонування архітектурно-технічних рішень, енергетичних систем, інформаційних потоків і організаційних структур у межах єдиного функціонально-цифрового середовища протягом усього життєвого циклу проекту.



Рисунок 2.1. Структура авторського методичного базису інструментарію управління енергоадаптивними проектами

Таблиця 2.1.

Принципи формування функціонально-цифрової системи управління енергоадаптивними проектами

Принцип	Сутність принципу	Практична реалізація в проекті
Системної інтеграції	Узгодження архітектурних, інженерних, управлінських та цифрових компонентів у межах єдиної системи	Інтеграція BIM, BMS, EMS, IoT у єдине інформаційне середовище управління
Адаптивності	Здатність системи змінювати параметри функціонування відповідно до зовнішніх і внутрішніх умов	Використання алгоритмів адаптивного керування, предиктивної аналітики, сценарного управління

Продовження таблиці 2.1.

Цифрової сумісності (інтероперабельності)	Забезпечення взаємодії між різними цифровими платформами та протоколами	Використання стандартів (BACnet, MQTT, IFC), інтеграція Digital Twin
Енергоефективності як базового критерію	Орієнтація всіх рішень на мінімізацію енергоспоживання при збереженні комфорту	Впровадження енергоменеджменту, KPI енергоефективності, BIPV, HVAC-оптимізації
Безперервності цифрового супроводу	Забезпечення управління на всіх етапах життєвого циклу проєкту	Використання BIM + Digital Twin від проєктування до експлуатації
Багаторівневості управління	Формування управління на стратегічному, тактичному та операційному рівнях	Розподіл ролей: стратегічні (девелопер), операційні (BMS), аналітичні (BI-системи)
Даних як основи прийняття рішень (data-driven)	Управління базується на реальних даних та аналітиці	Використання сенсорних мереж, BI-аналітики, дашбордів, KPI
Інформаційно-енергетичної взаємодії	Узгодження потоків енергії та інформації в єдиному циклі	Реалізація інформаційно-енергетичних циклів (BMS + SCADA + IoT)
Модульності та масштабованості	Можливість розширення системи без зміни базової архітектури	Додавання нових модулів (ВДЕ, накопичувачі, AI)
Управління ризиками та стійкості	Забезпечення стабільності системи при відхиленнях	Впровадження Predictive Maintenance, сценарного аналізу, FMEA

Сукупність зазначених принципів забезпечує формування функціонально-цифрової системи управління як методичної основи реалізації енергоадаптивних будівельних проєктів.

Наукове обґрунтування авторського методичного базису здійснено на основі поєднання системного аналізу, моделювання, економіко-математичних та імітаційних підходів.

- Наукова новизна запропонованого підходу полягає в тому, що:
- вперше сформовано цілісний методичний базис управління енергоадаптивними проєктами як інтегровану функціонально-цифрову систему;
 - запропоновано об'єднання архітектурно-технічних, енергетичних та управлінських рішень у єдиному цифровому контурі управління;
 - забезпечено поєднання системного аналізу, економіко-математичного моделювання та імітаційних підходів у рамках єдиного інструментарію;
 - розроблено структуру інструментарію, що включає модулі енергоменеджменту, цифрового супроводу, оцінювання ефективності та управління ризиками як взаємопов'язані елементи.

На відміну від існуючих підходів, де зазначені компоненти розглядаються ізольовано, у даному дослідженні вони інтегровані в єдину систему, що функціонує на основі принципів цифрової сумісності, адаптивності та багатокритеріальності.



Рисунок 2.2. Комбінація системного аналізу, моделювання, економіко-математичних та імітаційних підходів у дослідженні енергоадаптивних будівельних проєктів (розроблено автором)

На рисунку 2.2 представлено авторську інтерпретацію інтеграції ключових аналітичних підходів, що формують методичний базис управління енергоадаптивними будівельними проєктами.

У центрі схеми відображено узагальнюючий елемент — комбінацію аналітичних підходів, яка виступає ядром формування функціонально-цифрової системи управління. Навколо нього структуровано чотири базові методологічні компоненти: системний аналіз, моделювання, економіко-математичні підходи. Нижній рівень схеми відображає прикладну реалізацію зазначених підходів у вигляді конкретних функцій: аналіз системи проєкту, цифрове проєктування архітектури та ролей, оптимізація ресурсів і оцінювання ризиків, а також сценарне моделювання змін і перевірка ефективності прийнятих рішень.

Таким чином, представлена схема демонструє, що поєднання зазначених підходів формує цілісну аналітичну платформу, яка забезпечує обґрунтованість управлінських рішень, адаптивність системи та ефективність реалізації енергоадаптивних будівельних проєктів у цифровому середовищі.

Системний аналіз використано для декомпозиції енергоадаптивного проєкту на взаємопов'язані архітектурно-технічні, управлінські, інформаційні та енергетичні підсистеми. Моделювання застосовано для побудови структур архітектурно-технічних рішень, конфігурацій управлінських ролей, цифрових контурів взаємодії та алгоритмів адаптивного керування енергоспоживанням. Економіко-математичні підходи використано для формалізації залежностей між параметрами енергоспоживання, технічними характеристиками об'єкта та критеріями ефективності. Імітаційні підходи залучено для відтворення сценаріїв функціонування об'єкта в умовах зміни зовнішніх і внутрішніх факторів, оцінювання наслідків управлінських рішень та перевірки стійкості обраних конфігурацій.

Таке поєднання методів забезпечує комплексність авторського методичного базису та дозволяє перейти від опису окремих рішень до

побудови інтегрованого інструментарію управління енергоадаптивними проєктами.

У контексті сучасного будівельного проєктування формування архітектурно-технічної моделі будівлі із підвищеним рівнем енергоефективності є ключовим завданням не лише з точки зору регуляторних норм, а й у ширшому стратегічному сенсі сталого розвитку. Відповідно до актуальних національних і міжнародних стандартів, проєктна документація, архітектурне планування та технічне оснащення мають бути орієнтовані на мінімізацію енергоспоживання при збереженні або підвищенні комфортності середовища. Принципова складність полягає в необхідності створення єдиної інтегрованої системи, в якій архітектурна форма, матеріали, технології та інженерні рішення функціонують як єдиний когерентний механізм.

Формування архітектурно-технічної моделі в межах даного дослідження ґрунтується на таких принципах: системної інтеграції архітектурних, інженерних та цифрових компонентів; адаптивності до змін зовнішнього і внутрішнього середовища; енергоефективності як базового критерію проєктування; цифрової сумісності рішень із платформами BIM, BMS, EMS і цифровими двійниками; а також орієнтації на повний життєвий цикл об'єкта. Сукупність зазначених принципів формує основу функціонально-цифрової системи управління енергоадаптивним проєктом.

Одним з основних теоретичних підходів до цього завдання є інтеграція пасивних і активних стратегій проєктування. Пасивні стратегії включають орієнтацію будівлі, максимізацію природного освітлення, вентиляційні сценарії, теплоакмуляцію огорожувальних конструкцій та зменшення теплових втрат через оболонку. Активні стратегії передбачають використання високоефективних інженерних систем, які керуються інтелектуальними алгоритмами. Розгляд цих двох шарів у системному взаємозв'язку дозволяє сформувати ефективну архітектурно-технічну модель, яка забезпечує адаптивність до змін кліматичних умов, рівня заселеності, режиму використання приміщень [31].

У сучасній проєктній практиці дедалі ширше застосовується ідеологія так званої енергетичної оболонки будівлі (building envelope). Цей підхід

пропонує розглядати зовнішню архітектурну структуру не як нейтральний бар'єр, а як активний елемент теплового контролю. Прикладом може бути використання динамічних фасадів, склопакетів з низьким коефіцієнтом теплопередачі, а також фасадних систем із подвійним склінням, де проміжок між шарами слугує буфером для терморегуляції. Інтеграція таких елементів дає змогу значно скоротити енергоспоживання на опалення та охолодження.

Однією з найбільших дилем у процесі створення архітектурно-технічної моделі є знаходження оптимального співвідношення між коефіцієнтом остеклення фасадів (window-to-wall ratio – WWR) та характеристиками матеріалів. З одного боку, збільшення площі застеклення дозволяє підвищити рівень природного освітлення і зменшити витрати на штучне освітлення. З іншого — надмірне застеклення спричиняє перегрів улітку та значні втрати тепла взимку. Дослідження, проведені А. Wasilowski та С. Vichard, демонструють, що оптимальне значення WWR становить 25–35% у помірному кліматі, за умови застосування потрійного скління з низькоемісійними шарами.

Додатковою особливістю архітектурно-технічного проектування є необхідність використання так званих гібридних структурних рішень, які поєднують традиційні будівельні матеріали (цегла, бетон, сталь) із сучасними енергозберігаючими компонентами — сендвіч-панелями, композитними термоактивними блоками, біофасадними модулями. Такі рішення не лише зменшують енергоспоживання, але й відкривають можливості для сталого циклу експлуатації: скорочення будівельного сміття, переробка елементів оболонки, зниження вуглецевого сліду [1].

Значна частина досліджень у сфері енергоефективності будівництва акцентує увагу на зонуванні будівельного об'єкта відповідно до термічної інерції, функціонального навантаження та інсоляційного режиму. Архітектор М. Дітріх у своєму аналізі 2022 року доводить, що багатофункціональні об'єкти, спроектовані за принципом зонального теплового впливу (теплі зони — в центрі, буферні — по периферії), демонструють до 27% економії енергоресурсів порівняно зі стандартним модульним підходом.

Особливої уваги заслуговує формування сценаріїв адаптації архітектурних рішень до зовнішніх коливань, зокрема добових і сезонних змін

температури. У цьому контексті застосовується формалізована модель, формула 2.1, реакції архітектурно-технічного блоку на зовнішній температурний градієнт:

$$H_{\text{вн}}(t) = \frac{1}{K_{\text{заг}}G} \int_0^t [H_{\text{зов}}(\gamma) - H_{\text{вн}}(\gamma)] d\gamma + H_0, \quad (2.1)$$

де $H_{\text{вн}}(t)$ — внутрішня температура в момент часу t , $H_{\text{зов}}(\gamma)$ — зовнішня температура в момент часу γ , $K_{\text{заг}}$ — еквівалентний термічний опір будівлі, G — теплоємність внутрішнього середовища, H_0 — початкова температура.

Ця модель дозволяє прогнозувати ефективність огорожувальних конструкцій залежно від масивності будівлі, матеріалів і структури термічного захисту. Особливо ефективно модель застосовується при цифровому моделюванні сценаріїв опалення та охолодження.

Невід’ємною складовою ефективної архітектурно-технічної моделі є використання природної вентиляції як основного засобу зниження енерговитрат у перехідні сезони. Так звані рішення з «архітектурною вентиляційною логікою» (Architectural Ventilation Logic, AVL) передбачають орієнтацію і проектування віконних прорізів, дефлекторів і вентиляційних каналів так, щоб забезпечити природний рух повітря завдяки різниці температур і тиску. Наприклад, стратегія «вентиляційної башти» або «теплової труби» (Solar Chimney) довела свою ефективність у кліматах із великими добовими амплітудами температур. У результаті застосування AVL-рішень в будівлях університету Ноттінгема (UK) вдалося скоротити до 35% споживання електроенергії на вентиляцію без жодних активних систем [22].

Особливої уваги заслуговує поєднання пасивного опалення та охолодження через термічну інерцію матеріалів і фазових переходів. Наприклад, застосування у конструкціях стін або перекриттів фазозмінних матеріалів (Phase-Change Materials, PCM) дозволяє акумулювати тепло протягом дня та повільно віддавати його вночі, стабілізуючи внутрішній мікроклімат. Дослідження R. Baetens і F. Jelle демонструють, що включення PCM у штукатурку дає змогу знизити температурні коливання всередині приміщень до 4–5°C без використання кондиціонування. Це підтверджує ефективність концепції енергетичного згладжування, яка є ключовою для високої термічної стабільності без надлишкової активної енергетики.

Не менш важливою є роль архітектурних елементів для сонцезахисту, які мають сезонну варіативність. Використання навісів, козирків, динамічних жалюзі, зовнішніх штор і алюмінієвих лопатевих систем забезпечує зниження перегріву влітку та відкриття доступу до сонячної радіації взимку. Відомий приклад — будівля «Al Vahr Towers» в Абу-Дабі, де фасад складається з адаптивної геометрії, що відкривається і закривається залежно від положення сонця. Це не лише знижує енергоспоживання на кондиціонування, а й створює нову естетику енергетично обґрунтованої архітектури.

Архітектурна модель повинна адаптуватися не лише до кліматичних, а й до соціально-функціональних параметрів. Будівля школи, лікарні, офісу чи торгового центру має свої специфічні профілі навантаження, що змінюються у часі. Розробка динамічних сценаріїв експлуатації дає змогу адаптувати архітектурні рішення до реальних режимів використання приміщень. Наприклад, у проєкті Центру енергоефективності в Гельсінкі (2022) було застосовано систему внутрішніх перегородок з розумним управлінням, що змінюють прозорість і теплоізоляційні характеристики залежно від присутності людей та часу доби [62].

На нижченаведеному рисунку 2.3. відображено логіку формування архітектурно-технічної моделі будівлі, орієнтованої на підвищену енергоефективність. Вона ілюструє послідовне об'єднання стратегічних, нормативних, архітектурних і інженерних елементів у цілісну систему, що базується на інтеграції пасивних і активних підходів. Особливу увагу приділено енергетичній оболонці, термічному зонуванню, вентиляційним сценаріям і сценаріям адаптації до кліматичних змін. Така структуризація дозволяє моделювати вискоєфективні будівлі, здатні реагувати на зовнішні й внутрішні змінні умови в реальному часі.

Додатковим шаром у формуванні технічної архітектури є комплексна симуляція сценаріїв освітлення та інсоляції. Застосування програм на зразок Radiance, Velux Daylight Visualizer або Grasshopper дозволяє не лише створити тривимірну модель освітленості, а й інтегрувати її з теплофізичними характеристиками будівлі. Це стає основою для енергетичного зонування —

поділу приміщень за потребами в природному світлі та тепловому захисті, що істотно зменшує експлуатаційні витрати на HVAC-системи.

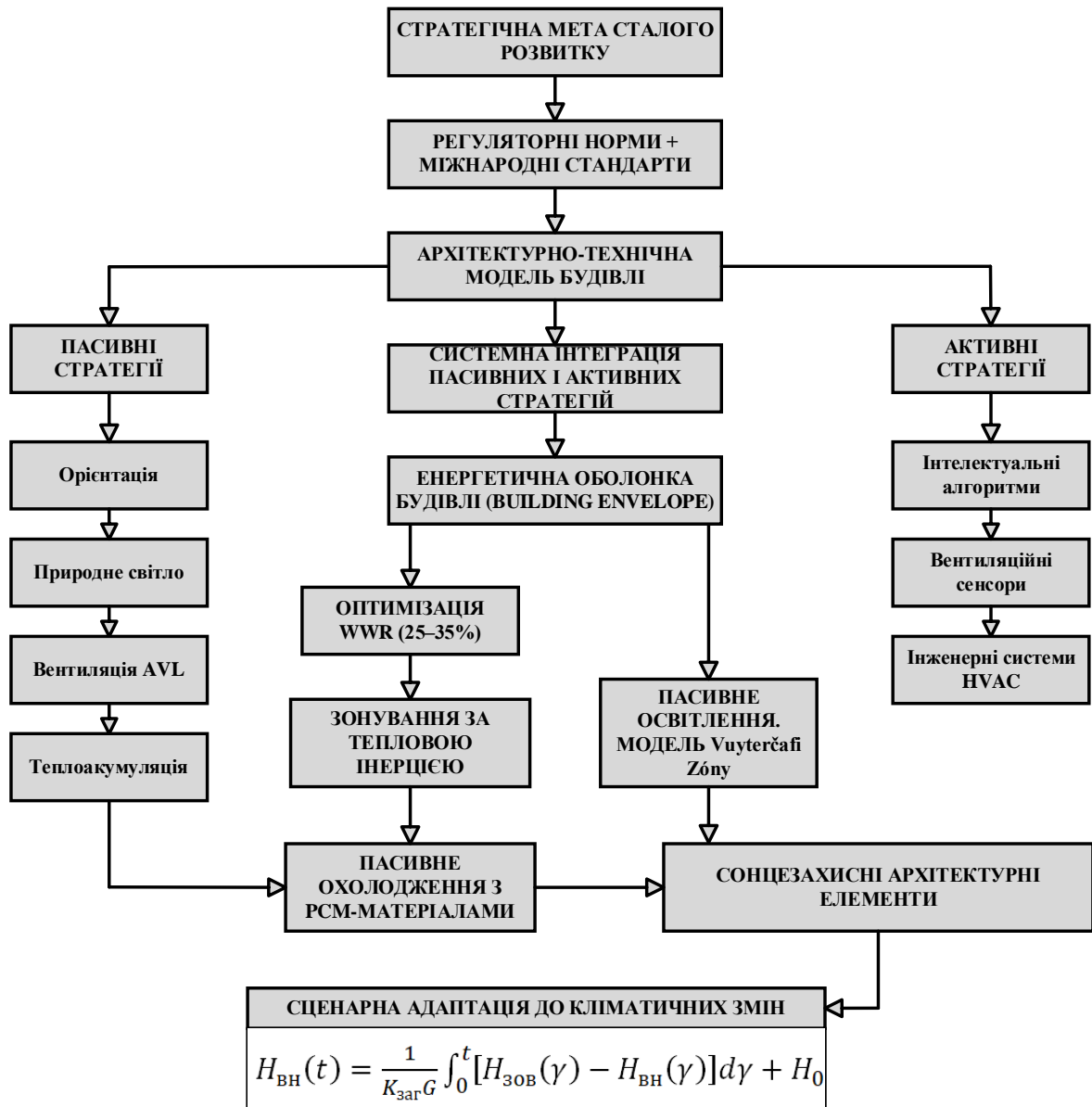


Рисунок 2.3. Структура архітектурно-технічної моделі будівлі з підвищеною енергоефективністю (Джерело: розроблено автором на основі [62])

Таким чином, комплексна архітектурно-технічна модель енергоефективної будівлі формується не лише через конструктивні рішення й матеріали, а й через здатність адаптуватися до мінливих умов. Наступним важливим кроком у цьому напрямку стає впровадження інтелектуальних систем, що дозволяють перевести енергетичну ефективність на рівень динамічного управління в режимі реального часу.

Ідея інтелектуалізації енергоефективного об'єкта передбачає не просто встановлення енергозберігаючого обладнання, а створення комплексного адаптивного середовища, здатного у реальному часі реагувати на зміни зовнішніх умов, потреб користувачів і внутрішні відхилення в експлуатаційних режимах. Інтелектуальні системи управління (ISU) формують новий тип архітектурного мислення, у якому проєктування простору й енергетичних мереж розглядається не як статика, а як інформаційно-енергетичний потік. Це мислення реалізується через багаторівневу цифрову архітектуру — від сенсорної бази до алгоритмів прийняття рішень і самонавчання [71].

Наукова література останніх років висвітлює значну кількість досліджень щодо ефективності Smart Building Technologies. Зокрема, праці М. Kolokotsa, Т. Yalcintas та Y. Goyal розкривають концепцію інтелектуального управління енергоспоживанням на основі контекстної адаптації. Архітектура таких систем, зазвичай, включає датчики середовища (температури, вологості, CO₂), виконавчі пристрої (регулятори заслінок, термостати, реле освітлення) та цифрову платформу, що реалізує логіку управління. Центральним елементом є алгоритмічна оболонка, яка визначає траєкторії дій за поточних параметрів.

Найбільш розповсюдженою формою є Building Management System (BMS), яка інтегрує контроль за вентиляцією, опаленням, освітленням, безпекою та доступом. Сучасні BMS працюють не просто за сценаріями, а на основі предиктивної аналітики. Наприклад, замість того, щоб вимикати кондиціонер о 20:00, система аналізує історичні дані, погодні умови, присутність людей і моделює, коли ефективніше знизити потужність.

Основна математична модель, що лежить в основі предиктивного управління — це модель стану системи, що описується через систему диференціальних рівнянь, формула 2.2:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Gx(t) + Np(t) + S\sigma(t), \quad (2.2)$$

де: $x(t)$ — вектор станів системи (температура, вологість, CO₂); $p(t)$ — вектор управляючих дій (потужність HVAC, освітлення, вентиляція); G, N, S — матриці параметрів системи; $\sigma(t)$ — стохастичні збурення, що відображають змінність зовнішніх умов.

Побудова такої моделі дозволяє виконувати оптимізаційне управління з урахуванням цільових функцій, наприклад: мінімізувати сумарне енергоспоживання при збереженні температури в межах 20–24°C. Така задача формалізується як мінімізація функціоналу, формула 2.3:

$$R = \int_0^H \left[\beta_1 (N_{\text{зад}} - N_{\text{факт}})^2 + \beta_2 u(t)^2 \right] dt, \quad (2.3)$$

де $N_{\text{зад}}$ — задана температура, $N_{\text{факт}}$ — фактична, $u(t)$ — інтенсивність енергоспоживання, β_1, β_2 — вагові коефіцієнти.

Суттєвим кроком уперед у сучасній архітектурі стало використання систем машинного навчання для самоналаштування BMS, коли алгоритми, на основі багаторічних даних, формують прогнози ефективності тих чи інших рішень. Це означає, що система може виявити, що при певній швидкості вітру та напрямку сонця краще змінити кут нахилу жалюзі або включити часткове затінення. Такі приклади були реалізовані в офісних центрах компаній Siemens та Skanska, де використання нейронних мереж для керування кліматом зменшило витрати на енергію на 27% у середньому [84].

Не менш важливим є інтеграція ISU у фізичну архітектуру: усі розрахунки, симуляції та оптимізаційні алгоритми мають впливати на реальне планування технічних зон, прокладку кабельних трас, розміщення серверних, маршрутизацію мереж. Це означає, що архітектурне рішення не може бути завершеним без узгодження з IT-платформою. Наприклад, BIM-моделі вже містять не лише геометрію, а й параметри автоматизації, і це дає змогу здійснювати цифровий двійник будівлі — віртуальну модель, яка живе у реальному часі, віддзеркалюючи та аналізуючи енергетичну поведінку будівлі.

Такі цифрові двійники використовують дані від сенсорів у режимі реального часу, які передаються через MQTT-протоколи, аналізуються на edge-пристроях і надсилаються в центральне середовище управління, де застосовуються аналітичні панелі типу PowerBI, Grafana або SCADA. Архітектор у цьому контексті працює не лише з матеріалами, а з потоками інформації, які моделюють поведінку об'єкта в енергетичному, тепловому та світловому аспектах [84].

Для забезпечення ефективного функціонування інтелектуалізованої енергоефективної архітектури необхідною умовою є чітка взаємодія між

апаратними та програмними компонентами системи. У таблиці 2.1 подано ключові елементи таких систем, їх функціональне призначення та очікувані ефекти впровадження в контексті Smart Building-проектування.

Таблиця 2.2.

Компоненти, функції та ефекти інтелектуальних систем управління в енергоефективних будівлях

Компонент системи	Функціональне призначення	Очікуваний ефект
Інтелектуальні системи управління (ISU)	Адаптивне управління енергоспоживанням	Підвищення загальної енергоефективності
Датчики середовища (температура, вологість, CO ₂)	Збір даних про середовище в реальному часі	Точне реагування на зміни середовища
Виконавчі пристрої (заслінки, термостати, реле)	Регулювання кліматичних та світлових умов	Зменшення втрат енергії
Цифрова платформа управління	Логіка керування системами на основі даних	Оптимізація сценаріїв управління
Building Management System (BMS)	Інтегрований контроль HVAC, освітлення, безпеки	Зниження витрат до 25–30%
Модель предиктивного управління	Моделювання стану системи, оптимізація дій	Мінімізація відхилень від цільових параметрів
Алгоритми машинного навчання	Прогнозування ефективності керувальних сценаріїв	Адаптивність до умов і користувацьких патернів
BIM + цифровий двійник	Віддзеркалення енергетичної поведінки об'єкта	Інтеграція фізичних і цифрових параметрів
ІоТ-комунікація через MQTT/Edge	Трансфер даних від сенсорів до серверів	Швидке реагування без затримок
Аналітичні панелі (PowerBI, SCADA)	Візуалізація та аналітика для прийняття рішень	Аналітична підтримка рішень на основі даних

(Джерело: розроблено автором на основі [84])

Однією з ключових складових інтелектуальних систем управління в енергоефективних об'єктах є адаптивне керування освітленням, яке забезпечує баланс між комфортом користувача та мінімізацією споживаної електроенергії. У класичній архітектурі освітлення проектується згідно з нормативними рівнями люксів залежно від призначення приміщення. Проте в умовах Smart Building архітектура освітлення стає динамічною конструкцією, що реагує на денне світло, присутність людей, активність у приміщенні та навіть індивідуальні переваги.

Системи daylight harvesting (збір денного світла) використовують сенсори освітленості та цифрові димери, що регулюють яскравість штучного освітлення в залежності від природного. Наприклад, у приміщенні з південною орієнтацією при високому рівні інсоляції LED-лампи автоматично знижують інтенсивність світла або вимикаються. У дослідженнях J. Bryan та D. Mulville показано, що використання daylight harvesting знижує споживання електроенергії до 40% на рік у порівнянні з класичними системами [91].

Інша група рішень стосується реактивних сценаріїв присутності, коли системи розпізнавання (на основі PIR-датчиків або відеоаналітики) формують карту активності й увімкнення освітлення відбувається лише в активних зонах. Особливо ефективним є поєднання освітлення з HVAC-системами, коли, наприклад, за відсутності людей не лише вимикається світло, а й знижується вентиляція. У медичних установах і коворкінгах такі підходи дозволяють створити мікрональні режими управління, при яких кожна частина простору «живе» за власною логікою.

Цифрова основа інтегрованих систем — це IoT-інфраструктура, яка дозволяє з'єднати всі елементи об'єкта (датчики, виконавчі механізми, інтерфейси керування) в єдину мережу. Сучасна архітектура IoT у будівництві спирається на принцип багатошаровості: сенсорний рівень (edge-обладнання), комунікаційний рівень (мережі типу Zigbee, LoRaWAN, KNX), логічний рівень (сервери і брокери MQTT), рівень застосування (вебінтерфейси, мобільні додатки, BMS/EMS-системи).

У межах IoT-середовища можлива реалізація так званих рефлексивних сценаріїв адаптації, коли система самостійно аналізує події та змінює власну поведінку. Наприклад, при прогнозі зниження температури до -5°C система може активувати попередній підігрів будівлі за 2 години до приходу персоналу, враховуючи теплову інерцію матеріалів, режим рекуперації та тарифи на електроенергію в конкретні години.

Окремий напрям — це енергодіагностика та самоперевірка систем, коли інтелектуальні пристрої моніторять не лише стан середовища, а й власну функціональність. Наприклад, сучасні HVAC-системи мають вбудовані модулі виявлення втрати герметичності або зниження ефективності рекуператора,

сигналізуючи про потребу в обслуговуванні. Це не лише зменшує ризики, а й дозволяє проводити перехід від планового до предиктивного сервісу (Predictive Maintenance), що є критично важливим у складних інженерних мережах [73].

Інтеграція цифрових рішень у сучасні енергоефективні будівлі забезпечує не лише енергозбереження, а й гнучкість реагування на зміну умов середовища та поведінки користувачів. На наведеному рисунку 2.4 представлено ключові технології, які демонструють найвищу ефективність у рамках концепції Smart Building, зокрема BMS-системи, IoT-архітектура, daylight harvesting та алгоритми машинного навчання. Це дозволяє проєктантам формувати адаптивні системи управління з високим ступенем самонавчання і прогнозування.

Серед проєктів, де успішно реалізовано повноцінну інтеграцію інтелектуальних систем у архітектуру — Powerhouse Brattørkaia (Норвегія), який є першим енергопозитивним офісом у Скандинавії. Його BMS-система інтегрована з BIM-моделлю в реальному часі, а кожен елемент — від жалюзі до сонячних панелей — працює під управлінням предиктивної платформи. Аналогічно, кампус університету Delft (Нідерланди) є прикладом повної адаптації архітектурних рішень до сценаріїв розподіленого управління енергією.

Таким чином, еволюція архітектурно-технічних рішень у напрямку цифровізації створює підґрунтя для ще одного фундаментального зрушення — впровадження відновлюваних джерел енергії як невід’ємної частини архітектурної структури. На цьому етапі інтеграція ВДЕ перестає бути факультативною технологією і перетворюється на базову компоненту сталого проєктного мислення.

У рамках трансформації будівельної галузі до моделі вуглецево-нейтральної економіки центральним напрямом стало інтегрування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) безпосередньо у технічну архітектуру будівельних проєктів. Відновлювана енергетика у цьому контексті перестає бути лише допоміжною інженерною системою й перетворюється на структуроутворюючий елемент проєктної архітектоники. Розглядаючи ВДЕ як компонент архітектурного рішення, необхідно брати до уваги не лише

енергетичну доцільність, а й просторову логіку, естетику, конструктивну узгодженість та технічну адаптацію [82].

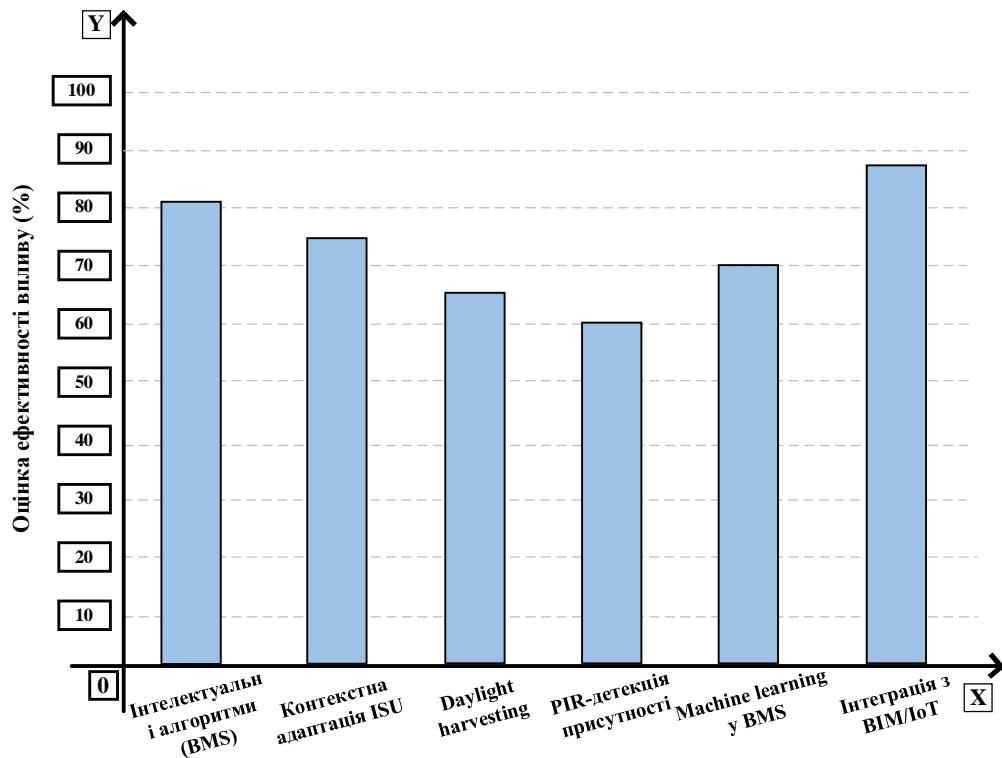


Рисунок 2.4. Оцінка ефективності цифрових та інтелектуальних технологій в енергоефективних будівлях (Джерело: розроблено автором на основі [73])

Провідним принципом у цьому процесі є BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) — інтеграція фотоелементів безпосередньо у фасади, покрівлі, огорожі та елементи благоустрою. Така інтеграція дозволяє не лише виробляти електроенергію, а й зменшувати навантаження на системи охолодження, слугувати елементом затінення, забезпечувати акустичну ізоляцію. Архітектор має оперувати не «додаванням» сонячних панелей до покрівлі, а вбудовуванням фотогенеруючих функцій у саму оболонку. Це вимагає зміни мислення від «енергетичного проєктанта» до архітектора-енергетика .

Ключова формула для визначення потенціалу BIPV у площинних системах пов'язана з ефективною інсоляцією за орієнтацією, формула 2.4:

$$A_{\text{доб}} = D \times V_t \times \delta \times PN, \quad (2.4)$$

де: $A_{\text{доб}}$ — добове вироблення енергії, D — площа фотоелементів, V_t — горизонтальна глобальна сонячна радіація на м^2 , δ — ефективність

фотоелемента, PN — коефіцієнт продуктивності (втрати на тінь, температуру, інвертор).

Розрахунок цієї формули на етапі архітектурного планування дозволяє оптимізувати орієнтацію об'єкта, кут нахилу покрівлі, глибину навісів і систему сонцезахисту. Зокрема, у дослідженні T. Huld (JRC EU, 2021) наведено карту потенціалу BIPV для Центральної Європи, де середній річний потенціал становить від 800 до 1300 кВт·год/м². Це означає, що будівля з фасадом у 300 м², орієнтованим на південь, здатна виробляти понад 40 000 кВт·год щороку — цілком достатньо для повного електрозабезпечення середньої школи або офісу. Для практичної реалізації концепції Smart Building важливим є комплексний підхід до вибору технологій, які забезпечують адаптивність, ефективність і сталість функціонування будівлі [75]. У таблиці 2.3. подано основні цифрові та інтелектуальні рішення, їхні принципи дії та очікувані результати впровадження в сучасну архітектурну практику.

Однак ефективне застосування ВДЕ не обмежується сонячною енергетикою. Архітектурні технічні рішення також дедалі активніше включають теплові насоси, які використовують низькопотенціальне тепло з ґрунту, води або повітря.

Таблиця 2.3.

Інтелектуальні технології в енергоефективній архітектурі

Технологія рішення	Принцип дії	Очікуваний ефект
PIR-детекція присутності	Регістрація руху або активності в зоні приміщення	Оптимізація енергоспоживання за рахунок зонального керування
Інтеграція освітлення та HVAC	Увімкнення освітлення/вентиляції лише за присутності людей	Зниження енергозатрат до 30% в нежитлових приміщеннях
ІоТ-інфраструктура (Zigbee, KNX, MQTT)	Зв'язок між сенсорами, пристроями та керуючими платформами	Синхронізація даних і рішень між усіма цифровими компонентами
Рефлексивні сценарії адаптації	Автоматична реакція системи на зміну зовнішніх умов	Проактивне управління температурою, освітленням, вентиляцією

Продовження таблиці 2.3.

Predictive Maintenance (самодіагностика)	Моніторинг функціональності обладнання та виявлення збоїв	Зменшення ризиків відмов, перехід до сервісу за потребою
BIM-моделі з BMS	Інтеграція систем управління в 3D-модель будівлі	Моделювання поведінки об'єкта в режимі реального часу
Daylight harvesting	Автоматичне зниження штучного освітлення за високої інсоляції	Скорочення споживання електроенергії до 40% на рік
Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)	Вбудовування фотоелементів у фасади/дах із енергетичною функцією	Енергозабезпечення об'єкта + архітектурна функція затінення

(Джерело: розроблено автором на основі [75])

Архітектор має враховувати габарити зон теплообміну, конфігурацію контурів, технічне зонування підсобних приміщень і акумуляторів тепла. Перевага геотермальних рішень у стабільності джерела: на глибині 3–5 метрів температура землі тримається на рівні +10...+12°C цілий рік. Відповідно, архітектурне планування фундаменту й технічного підвалу має враховувати закладку контурів теплообміну [74].

Система ґрунт-вода — один із найбільш ефективних видів низькопотенційної енергетики. Її ефективність визначається коефіцієнтом перетворення, формула 2.5:

$$WPF = \frac{T_{\text{корис}}}{C_{\text{спож}}}, \quad (2.5)$$

де $T_{\text{корис}}$ — теплова енергія, отримана в контурі, а $C_{\text{спож}}$ — витрати електроенергії на роботу насоса. Для сучасних систем $WPF = 3,5 \dots 5,0$ — тобто на 1 кВт електроенергії отримується до 5 кВт тепла .

На нижченаведеному рисунку 2.5. відображено ключові компоненти архітектурної інтеграції відновлюваних джерел енергії в сучасні будівельні проекти. Він демонструє взаємозв'язки між концепцією BIPV, інсоляцією, акустичними і тепловими характеристиками будівель, а також впровадженням геотермальних рішень, що формують цілісну систему сталого енергетичного мислення.

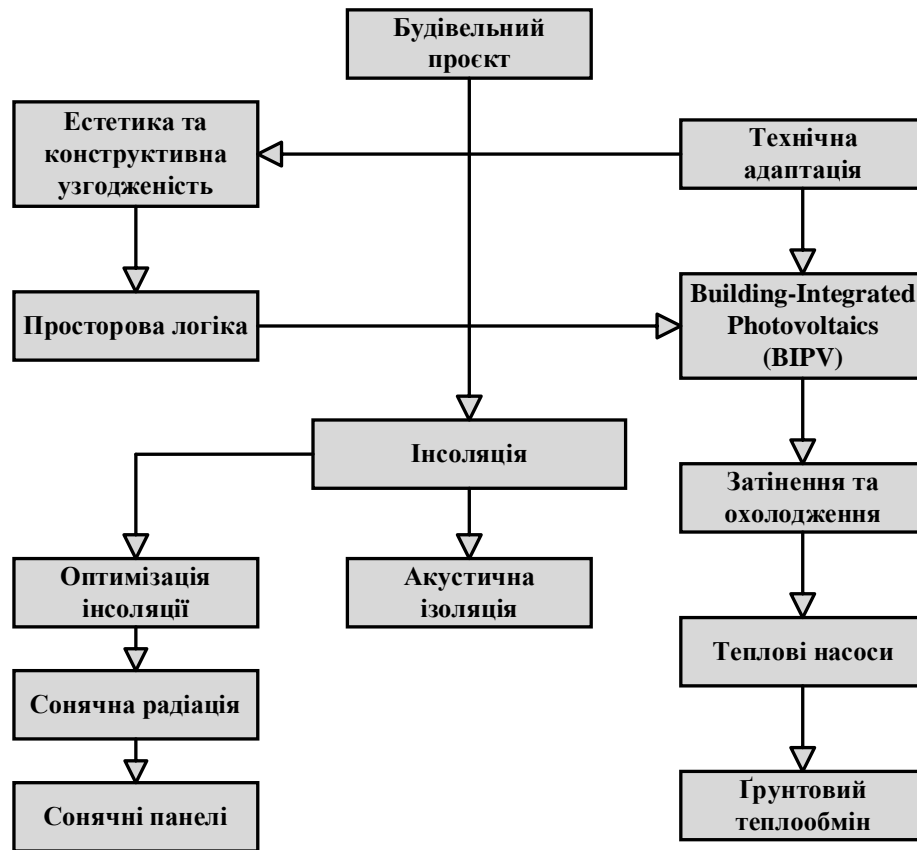


Рисунок 2.5. Структура інтеграції відновлюваних джерел енергії в архітектурні рішення будівель (Джерело: розроблено автором на основі [74])

Особливе місце в архітектурі технічних рішень займає рекуперація тепла — відновлення енергії, втрачаємої через вентиляцію. Системи з перехресним теплообміном вбудовуються в шахти або міжповерхові колектори й дозволяють повертати до 80% теплового потоку з відпрацьованого повітря.

Архітектор повинен проектувати систему внутрішнього повітрообміну з урахуванням трас прокладення, вільного доступу до обслуговування, уникнення шумових зон. На відміну від класичних каналів вентиляції, рекупераційні траси мають бути прямими, із мінімальною кількістю вигинів, що передбачає принцип вентиляційної геометрії, закладеної ще на етапі архітектурного ескізу.

На основі проведеного аналізу у межах дослідження сформовано інструментарій організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів, який представлено як інтегровану систему взаємопов'язаних модулів, рисунок 2.6.



Рисунок 2.6. Інтегрований інструментарій організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних

До складу інструментарію входять:

- модуль організаційно-технологічного моделювання (формування структури процесів і ресурсів);
- модуль цифрового супроводу (моніторинг, обробка даних, BI-аналітика);
- модуль енергоменеджменту (управління енергоспоживанням і адаптацією);
- модуль оцінювання ефективності (KPI, PLM-критерій, інтегральні показники);
- модуль управління ризиками (ідентифікація, оцінка та реагування).

Така структура дозволяє забезпечити комплексне управління енергоадаптивним проєктом у межах єдиного цифрового середовища.

Наведений модульний склад інструментарію свідчить, що архітектурно-технічні рішення розглядаються в роботі не ізольовано, а як початковий рівень методичної системи, на який надалі накладаються управлінські структури, цифрові протоколи, аналітичні алгоритми та механізми оцінювання

ефективності. У такий спосіб технічна архітектура проєкту перетворюється на частину цілісної системи організаційно-технологічного забезпечення.

Авторський характер запропонованого методичного базису полягає в тому, що технічні рішення, управлінські ролі, цифрові модулі супроводу, механізми енергоменеджменту, критерії ефективності та процедури оцінювання ризиків розглянуто не окремо, а як взаємозалежні елементи єдиної функціонально-цифрової системи управління. Це дозволило перейти від фрагментарного опису інструментів до формування інтегрованого інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів.

Таким чином, сформований авторський методичний базис дозволяє перейти від аналізу окремих архітектурно-технічних та цифрових рішень до побудови інтегрованої системи управління енергоадаптивними проєктами.

Важливою особливістю запропонованого підходу є те, що управління розглядається не як сукупність функцій, а як динамічна система взаємодії ролей, даних, енергетичних параметрів та цифрових платформ.

У цьому контексті наступним етапом дослідження є розгортання управлінських структур та ролей, які забезпечують практичну реалізацію сформованого методичного базису в межах енергоадаптивних будівельних програм.

2.2 Розгортання управлінських структур та ролей у впровадженні енергоадаптивних будівельних програм

Інституціональне проєктування управлінських структур у контексті впровадження енергоадаптивних будівельних програм набуває дедалі більшої актуальності через радикальні трансформації, що відбуваються в енергетичному, технологічному та регуляторному середовищі. У сучасному світі будівництво більше не може розглядатися виключно як фізичне зведення конструкцій; воно дедалі частіше перетворюється на складну систему управління адаптивними циклами, де стратегічні та оперативні управлінські

ролі мають бути структурно інтегровані в один функціональний механізм. Особливої значущості набуває здатність цих управлінських структур взаємодіяти з цифровими платформами управління, що забезпечують зворотний зв'язок, автоматизовану верифікацію рішень та адаптацію до енергетичних відхилень у режимі реального часу.

Традиційні підходи до формування управлінської структури, як-от лінійна або функціональна модель, дедалі більше втрачають свою ефективність у проєктах, орієнтованих на енергетичну адаптивність. Пояснюється це необхідністю залучення мультидисциплінарних команд, які поєднують знання в галузі енергетики, цифрових технологій, екології та правового регулювання. Роль управлінця в такому середовищі переходить від директивної фігури до фасилітатора, координатора, аналітика та кризового менеджера водночас. Одночасно з цим відбувається процес цифрової інституціоналізації ролей, де реальні обов'язки осіб дедалі частіше моделюються у вигляді сценаріїв, запрограмованих у інформаційних середовищах (BIM, EMS, ERP, Digital Twin) [3].

Значною основою для проєктування інституціональних структур слугують напрацювання Г. Мінцберга, зокрема його модель конфігураційної теорії організацій, яка пропонує розглядати структуру не як сталу, а як таку, що еволюціонує у відповідь на зміни середовища. У випадку енергоадаптивного будівництва, найбільшу відповідність демонструє адхократична структура, оскільки саме вона забезпечує швидку реакцію на зміни, високу гнучкість і змінну рольову конфігурацію в залежності від фази проєкту.

На початковому етапі впровадження енергоадаптивних програм ключовими елементами є формування стратегічного управлінського ядра, яке визначає цілі енергетичної трансформації та відповідні політики. Це ядро може включати в себе як представників замовника (наприклад, муніципалітету чи девелоперської компанії), так і зовнішніх консультантів з енергоефективності. Зазвичай тут формуються ключові ролі, зокрема координатор енергоефективності (Energy Coordinator), спеціаліст з адаптивного управління (Adaptation Strategist), а також аналітик цифрових даних (Digital Energy

Analyst). Водночас у більшості сучасних програм ця структура автоматизується через динамічну матрицю розподілу повноважень.

Щоб відобразити цю багатовимірну залежність між функціями, фазами реалізації та виконавцями, доцільно використати матрицю відповідальності, що включає часові, рольові та ресурсні вектори. Її формальне вираження наведено нижче.

Для аналізу взаємозалежностей між функціональними напрямками управління та виконавцями у структурі енергоадаптивної програми застосовується інтегральна формула 2.6 побудови динамічної матриці ролей:

$$\delta(t) = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^m \beta_{ab}(t) \times H_{ab}(t), \quad (2.6)$$

де: $\delta(t)$ — інтегральна конфігурація управлінської структури у момент часу t ; $\beta_{ab}(t)$ — коефіцієнт впливу a -ї ролі на b -ту функцію в момент часу t ; $H_{ab}(t)$ — матричний елемент відповідальності; n і m — кількість ролей та функцій відповідно.

Ця формула дозволяє моделювати не лише статичну присутність ролей у структурі, але й рівень їх активності у динаміці фаз розгортання програми.

Особливої уваги заслуговує розподіл адміністративної, технічної та аналітичної відповідальності. У класичних проєктах з енергомодернізації будівель, як це спостерігалось у проєктах за підтримки Європейського банку реконструкції та розвитку в Україні (зокрема в програмі IQ Energy), структура управління передбачає створення відокремленого оператора енергоефективності, який виступає посередником між фінансовими установами, постачальниками рішень та кінцевими користувачами. Цей оператор повинен бути не лише технічним адміністратором, але й координатором усієї вертикалі прийняття рішень [61].

Після розгляду теоретичних та прикладних аспектів формування управлінських структур в енергоадаптивному будівництві доцільно узагальнити ключові типи управлінських ролей і їх функціональне навантаження відповідно до сучасних вимог цифрової інтеграції та сценарної адаптації. Нижче подано таблицю 2.4, яка відображає характерні ролі, їхні функції та цифрові середовища, в яких ці ролі реалізуються.

Зокрема, у фазі реалізації проекту управлінська структура трансформується в орієнтовану на контроль сценарну модель, де кожен учасник реагує на сигнали про відхилення через налаштовані протоколи. Тут набуває значення не просто наявність управлінця, а його роль як елементу автоматизованої реакції системи.

Таблиця 2.4.

Типізація управлінських ролей у структурі енергоадаптивного будівельного проекту

Управлінська роль	Основне функціональне призначення	Цифрове середовище реалізації	Тип відповідальності
Координатор енергоефективності	Формування енергетичної стратегії, розробка цілей з енерговитрат, взаємодія із сертифікаційними органами	BIM, ERP, Energy Modeling Platforms	Стратегічна, аналітична
Аналітик цифрових даних	Обробка даних споживання, контроль KPI, прогнозування відхилень і сценарних впливів	EMS, Digital Twin, BI-аналітика	Аналітична, когнітивна
Спеціаліст з адаптивного управління	Розробка сценаріїв реагування, адаптація до змін зовнішнього середовища, управління ризиками	ERP, SCADA, Risk Dashboard Systems	Оперативна, кризова
Оператор енергоефективності	Координація учасників програми, адміністрування потоків ресурсів, взаємодія з фінансовими структурами	CRM, ERP, IQ Energy Middleware	Технічна, адміністративна
Фасилітатор управлінської інтеграції	Поєднання функцій міждисциплінарних команд, забезпечення комунікації, верифікація рішень	BIM-CDE, Stakeholder Management Systems	Координаційна, комунікаційна

(Джерело: розроблено автором на основі [61])

Щоб описати процес автоматизованої реакції управлінської ролі на енергетичне відхилення у системі, застосовується формула 2.7, функція когнітивного зворотного зв'язку, яка описує кореляцію між сигналом від системи моніторингу та обраним управлінським впливом:

$$K_{\text{react}}(t) = \int_0^t \sigma(B(\mu)) \cdot \lambda(C(\mu)) \cdot \rho(N) d\mu, \quad (2.7)$$

де: $B(\mu)$ — вхідний енергетичний сигнал; $C(\mu)$ — діагностичне повідомлення системи; N — тип управлінської ролі, що ініціює вплив; σ, λ, ρ — трансформаційні функції реагування.

Ця формула дозволяє інтегрувати в управлінську структуру змінні контексту — ступінь критичності, пріоритетність відповіді, ступінь довіри до ролі, що виконує дію. Таким чином, навіть у межах однієї функції (наприклад, зниження енергоспоживання) можуть діяти різні ролі з різною швидкістю реагування.

На рівні цифрових платформ, таких як EcoDomus, Honeywell Forge або Siemens Navigator, вже сьогодні реалізовано сценарії управління, які автоматично делегують повноваження при перевищенні порогових значень споживання, активують попередньо запрограмовані ролі в системі та верифікують виконання через ланцюг вбудованих індикаторів.

Варто зазначити, що в сучасному проектному менеджменті формується новий тип структури — енергоінституціональна мережа. Це сукупність ролей, які не просто існують у межах однієї організації, а є міжорганізаційними та міжгалузевими. Такі мережі потребують не лише управління проектом, а й управління ролями як динамічними агентами — з розрахунком їх впливу, можливих конфліктів інтересів та ефективності [62].

Побудований нижче рисунок 2.7. відображає логіку інституціонального формування управлінських структур у межах енергоадаптивних будівельних програм.

Математична модель визначення впливу ролі в енергоінституціональній мережі враховує вагу участі, центральність у процесі прийняття рішень та ступінь адаптації до цифрового середовища за формулою 2.8:

$$T_c = \beta \times J_c + \sigma \times S_c + \omega \times A_c, \quad (2.8)$$

де: T_c — інтегральний вплив ролі c ; J_c — центральність ролі у мережі (network centrality); S_c — адаптивність до сценарних змін; A_c — технічна сумісність з цифровими протоколами; β, σ, ω — вагові коефіцієнти оцінки.

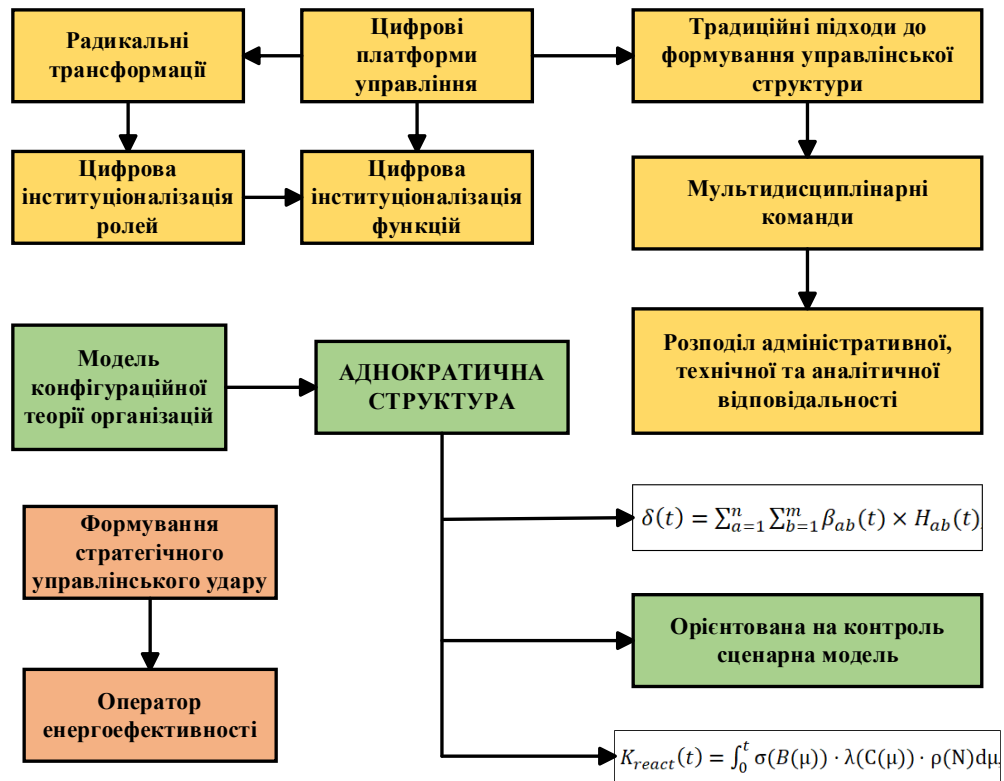


Рисунок 2.7. Діаграма інституціонального впровадження енергоадаптивного управління в будівельному проєкті (Джерело: розроблено автором на основі [62])

Ця модель дозволяє управляти ролями не лише з точки зору адміністративної ієрархії, а з урахуванням їх цифрової ефективності. У результаті стає можливим не просто делегування функцій, а алгоритмічне перерозподілення навантаження між управлінцями залежно від їх «енергетичного профілю».

Таким чином, інституціоналізація управлінських ролей в енергоадаптивному будівництві формується як динамічна система взаємодії між функціями, цифровими протоколами та сценарними відповідями. Проте аби забезпечити ефективне функціонування цієї системи на практиці, необхідно перейти до аналізу конкретних рівнів управлінської конфігурації в межах життєвого циклу будівельного проєкту [14].

Формування енергоадаптивного будівельного проєкту передбачає створення багаторівневої управлінської конфігурації, здатної забезпечити динамічну реакцію на зміну умов енергоспоживання, поведінки користувачів, кліматичних факторів і функціонального навантаження об'єкта в режимі реального часу. Основу такої конфігурації становлять управлінські підсистеми,

які розгортаються поступово на кожному з етапів життєвого циклу, модифікуючи свою структуру, ролі, засоби впливу та цифрові прив'язки залежно від поточної фази розгортання. Необхідність чіткої рольової структуризації зумовлена не лише потребою ефективного проектного адміністрування, але й вимогами інтеграції з сертифікаційними системами, контролем параметрів класу енергоефективності та реалізацією концепції сталого середовища.

Відправною точкою в управлінському циклі є ініціація проекту, де розробляється енергетична концепція, формуються цілі щодо споживання, накопичення, передачі і відновлення енергії, а також визначаються обмеження, пов'язані з архітектурним середовищем, технологічними умовами й очікуваннями зацікавлених сторін. На цьому етапі головну роль відіграє стратегічна підсистема, де формуються ролі енергетичного архітектора, аналітика довгострокової ефективності, координатора сертифікаційних цілей та політично-адміністративного фасилітатора. Ці фахівці не лише задають енергетичну парадигму, але й проектують управлінські горизонти відповідальності, визначаючи межі автономності в межах команди та вимоги до майбутніх інформаційних контурів [50]. Принциповим моментом є побудова початкової матриці цільових енергетичних індикаторів, яка служить базовим орієнтиром для подальших фаз планування. Така матриця в динаміці моделюється функцією, що акумулює ефекти накопичення енергоактивності та вплив змінних параметрів сценарного середовища, яку можна представити як формулу 2.9:

$$\Xi(t) = \sum_d^m [\mu_d \times R_d(t) \times \alpha_d(t)], \quad (2.9)$$

де $\Xi(t)$ — агрегований рівень відповідності проекту енергетичній меті в момент часу t , $R_d(t)$ — рівень реалізації d -ї енергетичної підцілі, $\alpha_d(t)$ — сценарний вплив зовнішніх умов на відповідну підціль, а μ_d — ваговий коефіцієнт важливості.

У подальшому, після проходження фаз ініціації, відбувається деталізація підсистем через етапи планування та моделювання. Тут домінують функціональні ролі з вираженою технічно-аналітичною спрямованістю. Формуються підсистеми проектування динамічного енергоспоживання,

цифрового зонування, моделювання адаптивних рішень та оцінки інтеграційного потенціалу відновлюваних джерел. BIM-менеджери, енергетичні планувальники, системні інженери з оптимізації оболонок і спеціалісти з Life-Cycle Assessment працюють у консолідованому полі, де кожна роль має цифрову прив'язку до об'єкта, пов'язану з відповідною ділянкою проектної моделі. Це поле формується як віртуальна управлінська сітка з точки зору взаємодії між шарами даних, за типом моделі системної прецизійності, яка описується наступною функцією відповідності між контекстами управління і цифровими вузлами за допомогою формули 2.10:

$$D_i = \int_{F_i}^f [\varphi(x, y, z) \cdot \delta_i(x, y, z) \cdot \sigma(t)] dF, \quad (2.10)$$

де D_i — функціональне навантаження ролі i у просторі управлінської відповідальності, $\varphi(x, y, z)$ — щільність управлінського впливу в точці простору, $\delta_i(x, y, z)$ — зона дії ролі у відповідному шарі моделі, а $\sigma(t)$ — функція активності у відповідному часовому проміжку.

Таке просторово-часове моделювання підсистем дозволяє розрізнити рівні інтеграції учасників: статичні (пряме управління конкретними підсистемами, наприклад системою вентиляції або BMS), динамічні (перехресна координація через зміну сценаріїв роботи на основі сенсорних даних), та когнітивні (аналітична відповідальність за інтерпретацію трендів і формування прогнозів реакцій системи). Важливо, що ці рівні мають власну часову логіку: динамічні ролі можуть проявлятися лише за наявності відхилення, тоді як статичні — функціонують постійно, а когнітивні — активуються періодично або за умов сценарного зсуву [9].

Поступове ускладнення управлінської архітектури в межах енергоадаптивного будівельного проєкту супроводжується зміною інтенсивності реалізації стратегічних, технічних і аналітичних ролей залежно від фази життєвого циклу. Побудований нижче рисунок 2.5 ілюструє, як зміщується центр ваги управлінських підсистем — від переважно стратегічного домінування на етапі ініціації до активізації технічних і аналітичних ролей на фазах планування й моделювання.

У фазі реалізації робіт відбувається оперативне розгортання підсистем управління, в яких провідну роль відіграють координатори монтажу

енергоактивних компонентів, керівники польового контролю якості, інтегратори з цифровими платформами. Зокрема, цифровий менеджер забезпечує злиття інформаційних потоків із польових джерел (сканери прогресу, камери фіксації, сенсорика) в управлінський контур, активуючи відповідні відповіді при відхиленнях від параметрів. У цій точці життєвого циклу рольові функції не мають фіксованого центру, а розміщуються у формі «енергетичної відповідальності», де кожна роль отримує змінне навантаження відповідно до темпу будівництва, доступності ресурсів і критичності фази.

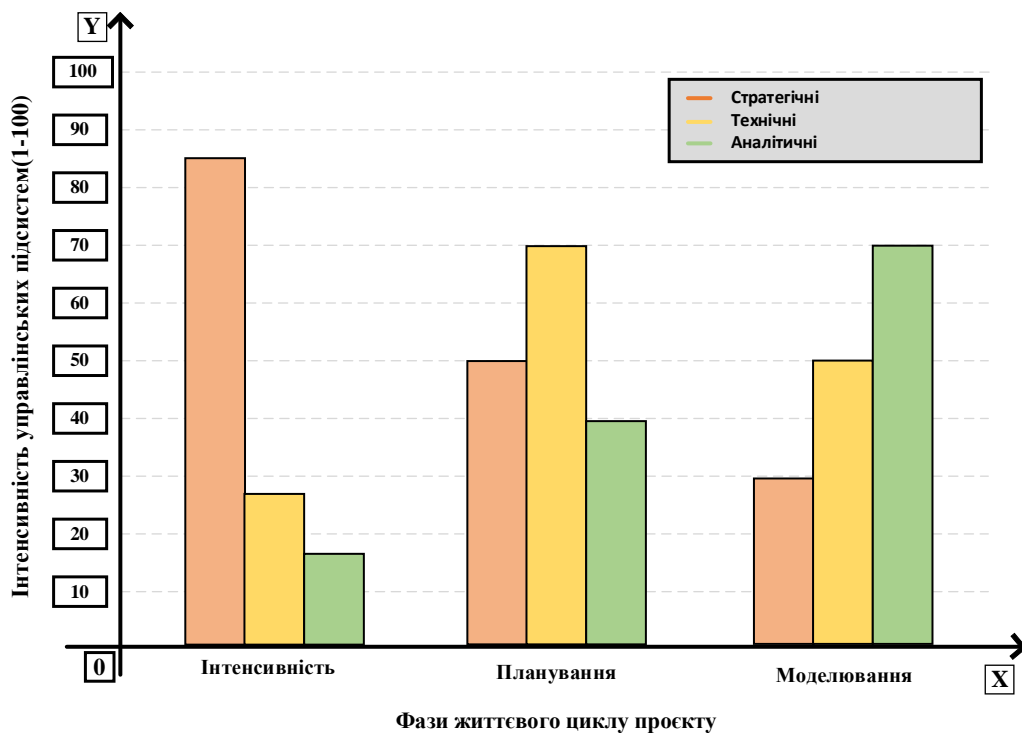


Рисунок 2.8. Динаміка ролей управлінських підсистем у формуванні енергоадаптивного будівельного проєкту (Джерело: розроблено автором на основі [98])

На етапі введення об'єкта в експлуатацію та подальшого моніторингу підсистеми трансформуються у структури, здатні підтримувати сталу реакцію на поведінку користувача, кліматичні аномалії, зношення обладнання або інфраструктурні аварії.

Тут управлінські ролі пов'язані з менеджером енергоефективності будівлі, керівником центру даних, системним аналітиком графів енергетичних втрат, спеціалістом з управління скаргами та адаптивного налаштування режимів. Ці ролі реалізують складні конфігурації зворотного зв'язку, аналізують реакції в реальному часі та адаптують архітектуру сценаріїв у

системі управління. Пріоритет переходить від технічного адміністрування до когнітивного моделювання, де основою є не подія, а патерн, не проблема, а тренд [98].

Розгортання управлінських підсистем у межах енергоадаптивного проєкту на рівні об'єкта поступово вимагає розширення впливу на стратегічну архітектуру підприємства. Саме тому наступним логічним кроком стає аналіз інтеграції енергоадаптивного управління в загальну корпоративну структуру девелопера, де управлінські ролі, цифрові протоколи та інформаційні потоки трансформуються на рівні всієї організації.

Інтеграція енергоадаптивного управління в корпоративну структуру девелопера є складним процесом не лише організаційного, а й системно-архітектурного характеру, що зачіпає основи операційної логіки компанії. У сучасній будівельній практиці девелоперська компанія не обмежується лише координацією проєктування та будівництва, а виступає як багаторівнева платформа управління ресурсами, ризиками, капіталом, соціальними очікуваннями і цифровими потоками, що вимагає якісно нової архітектури управління. Впровадження енергоадаптивної парадигми вимагає, перш за все, трансформації внутрішніх систем — від стратегічного планування до експлуатаційної аналітики, що втілюється через зміну ролей, цифрових протоколів і процедур прийняття рішень.

На фундаментальному рівні механізм інтеграції починається із побудови цифрового каркасу управління, в якому формуються канали комунікації між підрозділами, ролями, інформаційними потоками та системами підтримки прийняття рішень. Цей каркас виступає як віртуальна організаційна структура, що дублює або доповнює реальну ієрархію підприємства. У таких умовах з'являються нові мета-ролі — інтегратор систем енергоспоживання, координатор аналітичних сценаріїв, фасилітатор цифрового діалогу між BMS та ERP. Центральним вузлом стає керівник енергоадаптивного напрямку, який фактично проєктує нову «енергетичну архітектуру» підприємства, пов'язану як із фізичними активами, так і з алгоритмами керування [78].

Структурна логіка змін вимагає переведення традиційної матричної організації в адаптивну систему з мікросервісною логікою: кожна роль, кожна

функція, кожна система повинна бути здатна масштабуватись, оновлюватись та взаємодіяти в режимі подієвого реагування. У межах цього перетворення відбувається накладання енергетичних сценаріїв на бізнес-процеси, зокрема через впровадження дашбордів управління енергоспоживанням, індикаторів КРІ адаптації до змін навколишнього середовища, а також моніторингових аналітик, які переносять акценти управління з фінансового контролю на функціональну ефективність.

Процес такого накладання описується динамічною функцією інтеграції управлінської моделі в межах цифрової архітектури, де ступінь взаємодії між процесами та ролями оцінюється з огляду на їх чутливість до енергетичних збурень. Формалізація цього процесу передбачає опис енергетичної відповідності системи корпоративного управління з використанням формули 2.11, аналітичної моделі:

$$G(t) = \sum_{i=1}^n \frac{[\delta_i \times v_i(t) \times \sigma_i(t)]}{2}, \quad (2.11)$$

де $G(t)$ — агрегована інтегрованість управлінської структури девелопера в енергоадаптивну модель на момент часу t , $v_i(t)$ — активність i -го цифрового процесу управління, $\sigma_i(t)$ — рівень його кореляції з енергетичними сценаріями, δ_i — коефіцієнт стратегічного пріоритету.

У корпоративній практиці така інтеграція може бути реалізована шляхом створення центра аналітики енергоспоживання, що функціонує як окремий хаб збору даних, їх обробки, виведення висновків та подання інтегрованих сигналів у систему прийняття рішень. На практиці — це автономна підсистема в межах ERP, яка зчитує дані з BMS, перевіряє їх на порогові відхилення, прогнозує зміну параметрів та автоматично ініціює зміну режимів роботи інженерних систем через API-зв'язки. Принципова новизна тут полягає у відмові від командно-директивної логіки на користь реактивної логіки автоматизованого управління [94].

Узагальнюючи викладені положення щодо інтеграції енергоадаптивного управління у корпоративну архітектуру девелоперської компанії, доцільно представити таблицю 2.5., яка відображає ключові елементи цієї інтеграції: нові ролі, їхні функції, цифрові середовища реалізації та відповідні типи взаємодії.

Таблиця 2.5.

Елементи інтеграції енергоадаптивного управління в корпоративну структуру
девелопера

Компонент/роль	Функціональне призначення	Цифрове середовище реалізації	Тип взаємодії
Керівник енергоадаптивного напрямку	Формує та проектує енергетичну архітектуру компанії, узгоджує сценарії з управлінською моделлю	ERP, BIM, Energy Management Systems	Стратегічно-архітектурна
Інтегратор систем енергоспоживання	Координує взаємодію фізичних і цифрових елементів енергосистем	BMS, SCADA, API-зв'язки	Техніко-операційна
Координатор аналітичних сценаріїв	Аналізує та коригує сценарії відповідно до змін навколишнього середовища	BI-панелі, KPI-дешборди, LCA-аналітика	Аналітико-прогностична
Фасилітатор цифрового діалогу	Забезпечує взаємодію між системами управління та внутрішніми службами	CDE, ERP, Stakeholder Interface Tools	Комунікаційно-інтегративна
Центр аналітики енергоспоживання (хаб)	Автономно збирає, перевіряє та транслює дані у рішення через цифрову логіку	ERP, BMS, IoT-платформи, Digital Twin	Автоматизовано-аналітична
API-модулі керування інженерними системами	Реалізують реактивні рішення при порогових змінах параметрів	Middleware-системи, SCADA API	Сценарно-рефлексивна
Мікросервісна рольова логіка	Забезпечує масштабування і оновлення функцій у подієвому режимі	Event-driven architecture, Cloud DevOps	Адаптивно-функціональна

(Джерело: розроблено автором на основі [94])

У розвиток положень щодо інтеграції енергоадаптивного управління в корпоративну структуру девелопера доцільно розглянути механізм впровадження енергоменеджменту на рівні окремих проєктів з подальшою їх інтеграцією у єдиний цифровий простір.

У сучасних умовах цифрової трансформації будівельної галузі впровадження енергоменеджменту набуває системного характеру та виходить за межі окремих інженерних рішень, трансформуючись у ключовий елемент

управління девелоперською діяльністю. У межах даного дослідження запропоновано підхід до впровадження енергоменеджменту, який базується на поетапній інтеграції інструментів управління енергоспоживанням на рівні окремого проєкту з подальшим об'єднанням у єдину цифрову екосистему мультипроєктного девелопера.

На першому етапі реалізація енергоменеджменту здійснюється на рівні окремого будівельного проєкту шляхом інтеграції відповідних функціональних модулів у його операційні системи. До таких модулів належать системи моніторингу та управління енергоспоживанням (BMS, EMS, SCADA), сенсорні мережі збору даних, аналітичні платформи обробки інформації, а також алгоритми адаптивного керування. У цьому контексті енергоменеджмент функціонує як вбудована підсистема операційного управління проєктом, яка забезпечує безперервний контроль параметрів споживання енергії, оперативне реагування на відхилення, оптимізацію режимів роботи інженерних систем та формування енергетичних профілів об'єкта.

Особливістю запропонованого підходу є інтеграція енергоменеджменту не лише на стадії експлуатації, а вже на етапах проєктування та будівництва. Завдяки використанню BIM-технологій та цифрових двійників забезпечується моделювання енергетичної поведінки об'єкта ще до його фізичної реалізації. Це дозволяє закладати енергоефективні рішення на ранніх стадіях, оцінювати альтернативні сценарії та прогнозувати ефективність управлінських впливів.

На другому етапі здійснюється інтеграція окремих проєктів у єдиний цифровий простір девелопера. Така інтеграція реалізується через централізовані платформи управління (ERP, Energy Management Platforms, Digital Twin Environment), які забезпечують акумуляцію, синхронізацію та аналітичну обробку даних з усіх об'єктів девелоперського портфеля. У результаті формується багаторівнева система управління, де кожен окремий проєкт виступає як автономний, але водночас інтегрований елемент загальної енергетичної інфраструктури.

Ключовими функціями єдиного цифрового простору є:

- централізований моніторинг енергоспоживання всіх об'єктів;
- порівняльний аналіз ефективності проєктів;
- виявлення відхилень і формування попереджувальних сигналів;
- масштабування ефективних рішень між проєктами;
- підтримка прийняття управлінських рішень на стратегічному рівні.

Важливим аспектом є забезпечення інтероперабельності між різними системами та протоколами, що досягається через використання стандартів обміну даними (BACnet, MQTT, IFC, API-інтерфейси). Це дозволяє інтегрувати інформаційні потоки з різних джерел у єдину логічну структуру, яка підтримує безперервність управління та синхронізацію даних у режимі реального часу.

Таким чином, формується функціонально-цифрова система управління енергоадаптивними проєктами, яка поєднує локальні інструменти енергоменеджменту з централізованими аналітичними та управлінськими платформами. У межах цієї системи реалізується перехід від фрагментарного управління окремими об'єктами до комплексного управління портфелем проєктів на основі даних.

На відміну від традиційних підходів, запропонована модель забезпечує не лише контроль енергоспоживання, а й формує адаптивне середовище, здатне до саморегуляції, прогнозування та оптимізації. Це створює передумови для підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат, мінімізації ризиків та досягнення цілей сталого розвитку в межах девелоперської діяльності.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що впровадження енергоменеджменту в операційні системи окремих проєктів з подальшою інтеграцією у єдиний цифровий простір мультипроєктного девелопера формує нову парадигму управління, в основі якої лежить поєднання інженерних, інформаційних та аналітичних компонентів у єдину адаптивну систему.

Для наочного відображення запропонованого підходу на рисунку 2.9. представлено структуру впровадження енергоменеджменту в операційні системи проєктів та його інтеграції у цифровий простір мультипроєктного девелопера.



Рисунок 2.9. Інтеграція енергоменеджменту в операційні системи проєктів та цифровий простір мультипроєктного девелопера (розроблено автором)

Наукова новизна запропонованого підходу полягає у поєднанні проєктного та портфельного рівнів енергоменеджменту в межах єдиного цифрового середовища, що забезпечує адаптивне управління енергоспоживанням на основі інтеграції даних, аналітики та автоматизованих управлінських рішень.

Паралельно з цим у структурі з'являються нові модулі з аналізу ризиків: наприклад, цифровий модуль FMEA-оцінювання зосереджується на ймовірностях виходу з ладу систем енергопостачання, тоді як модуль SCADA-інтеграції адаптує налаштування систем до реального навантаження, підтримуючи їх у зоні енергетичної рівноваги.

Узагальнення визначених груп критеріїв та їх змістового наповнення дозволяє сформуванню інтегрованої моделі оцінювання успішності проекту, яку доцільно представити у табличній формі (табл. 2.6).

Таблиця 2.6.

Модель критеріїв оцінювання успішності енергоадаптивного
девелоперського проекту

Група критеріїв	Складові показники	Зміст оцінювання	Очікуваний ефект	Рівень застосування
Енергетичні	Питоме енергоспоживання; частка ВДЕ; ефективність рекуперації; адаптивність систем	Оцінка ефективності використання енергетичних ресурсів та здатності систем до саморегуляції	Зниження енергоспоживання; підвищення енергоефективності	Об'єкт / система
Техніко-економічні	Вартість; строки; експлуатаційні витрати; ROI	Оцінка економічної доцільності реалізації та експлуатації	Оптимізація витрат; фінансова стійкість	Проект
Цифрові	Рівень BIM; Digital Twin; інтеграція BMS/EMS; автоматизація	Оцінка рівня цифровізації та інтеграції систем управління	Підвищення керованості; прозорість даних	Проект / портфель
Екологічні	Викиди CO ₂ ; енергоефективність; сертифікація; ресурсоефективність	Оцінка впливу на навколишнє середовище	Зменшення екологічного навантаження	Об'єкт / середовище
Соціально-функціональні	Комфорт; адаптивність простору; безпека; задоволеність користувачів	Оцінка якості середовища та відповідності потребам користувачів	Підвищення якості експлуатації	Користувач / об'єкт
Репутаційно-іміджеві	ESG-відповідність; інноваційність; інвестиційна привабливість	Оцінка стратегічної цінності проекту	Підвищення конкурентоспроможності	Девелопер

Запропонована модель критеріїв дозволяє здійснювати багатовимірну оцінку успішності енергоадаптивного проекту, поєднуючи техніко-економічні,

енергетичні, цифрові, екологічні та соціальні аспекти. Її особливістю є інтеграція критеріїв різних рівнів управління — від окремого об'єкта до портфеля проєктів девелопера. Наукова новизна моделі полягає у формуванні інтегрованої багаторівневої системи критеріїв оцінювання, яка враховує не лише економічні показники, але й параметри енергетичної ефективності, цифрової зрілості та екологічної сталості, що забезпечує комплексну оцінку результативності девелоперських проєктів.

У результаті дослідження запропоновано системну класифікацію ризиків енергоадаптивних проєктів (таблиця).

Для забезпечення комплексного врахування впливу ризиків у системі управління доцільно розглядати їх як інтегральний показник, що впливає на загальну ефективність проєкту.

$$R = \sum (p_i \times i_i) \quad (2.12)$$

де: p_i — ймовірність ризику

i_i — вплив ризику

Таблиця 2.7.

Класифікація ризиків енергоадаптивних проєктів

Група ризиків	Джерело виникнення	Прояв	Наслідки	Механізми управління
Технічні	Інженерні системи	Відмови, збої	Зниження ефективності	Моніторинг, техобслуговування
Енергетичні	Енергопотоки	Перевищення споживання	Перевитрати, нестабільність	Адаптивне управління
Цифрові	ІТ-інфраструктура	Втрата даних	Порушення управління	Кіберзахист, резервування
Організаційні	Управління	Затримки, конфлікти	Зниження ефективності	Регламентация, автоматизация
Зовнішні	Середовище	Зміни умов	Невизначеність	Сценарне планування

Такий підхід дозволяє кількісно оцінити рівень ризику проєкту та інтегрувати його в систему прийняття управлінських рішень, зокрема при формуванні інтегральних критеріїв ефективності.

У межах запропонованого методичного підходу оцінювання ефективності енергоадаптивного девелоперського проєкту здійснюється на основі інтегрального PLM-критерію, який враховує багатофакторну природу результативності. Водночас важливою особливістю є врахування впливу

ризиків як коригуючого чинника, що відображає рівень невизначеності та стійкості системи.

З урахуванням визначених груп ризиків та їх впливу на результати реалізації проєкту доцільно інтегрувати ризикову складову у загальний критерій ефективності.

З огляду на це, ризики доцільно інтегрувати у структуру PLM-критерію через знижувальний коефіцієнт, що відображає їх сумарний вплив на результативність проєкту.

$$PLM = (E + D + E_c + S) \times (1 - R)$$

де: E — енергетична ефективність

- D — рівень цифровізації
- E_c — економічна ефективність
- S — соціально-екологічна результативність
- R — інтегральний рівень ризику

У запропонованій моделі ризики виступають як інтегральний коригуючий фактор, що зменшує значення загального критерію ефективності залежно від рівня невизначеності та потенційних відхилень. Такий підхід дозволяє врахувати не лише досягнуті результати, але й стійкість системи до внутрішніх та зовнішніх збурень.

Інтеграція ризиків у PLM-критерій забезпечує перехід від статичної оцінки ефективності до динамічної моделі, що враховує варіативність середовища функціонування проєкту.

Наукова новизна полягає у включенні інтегрального показника ризику до структури PLM-критерію, що дозволяє оцінювати ефективність девелоперського проєкту з урахуванням його адаптивності та стійкості до збурень.

У подальшій фазі інтеграції, коли основні цифрові вузли енергоадаптивного управління вже інституціоналізовані, виникає потреба в модифікації корпоративної культури та поведінкових патернів працівників, що у свою чергу потребує інституційної роботи із внутрішніми стейкхолдерами. Девелоперська компанія починає оперувати не лише інженерними рішеннями,

а й управлінською поведінкою, яка формує середовище постійної адаптації до зовнішніх і внутрішніх змін [72]. У цьому контексті механізми інтеграції отримують не лише технічний, але й соціальний вимір: формуються нові системи мотивації, змінюються критерії ефективності працівників, адаптуються канали комунікації, а звичні процеси – звітування, аудит, планування – починають функціонувати за логікою впливу на енергетичну рівновагу проєкту.

Одним із ключових механізмів переходу до повної інтеграції є використання динамічних карт ролей і процесів (Dynamic Role & Process Maps), які дозволяють у реальному часі відслідковувати ступінь залученості кожної управлінської одиниці до контурів енергоадаптації. Ці карти базуються на алгоритмах, що агрегують події з інформаційних систем, обчислюють індекси реактивності, перевіряють відхилення від очікуваної поведінки й автоматично перебудовують рольову структуру відповідно до виявлених патернів. Роль таких систем не можна недооцінювати, оскільки саме вони забезпечують трансформацію від статичної корпоративної архітектури до динамічної мережі адаптацій [87].

Як видно з поданого нижче рисунку 2.10, побудова енергоадаптивної архітектури управління потребує не лише цифрової трансформації, а й переосмислення логіки внутрішніх ролей і функціональних залежностей. Рисунок демонструє поетапну інтеграцію нових управлінських вузлів, цифрових модулів і аналітичних функцій, що в сукупності формують адаптивну модель взаємодії процесів, ролей і систем на основі енергетичних сценаріїв. У практиці компаній, які активно впроваджують концепції цифрової трансформації у девелопменті, таких як Skanska, KAN Development, Lendlease, Hines, інтеграція енергоадаптивного управління часто відбувається через створення автономних аналітичних структур, які не лише інтерпретують дані, але й впливають на корпоративне планування.

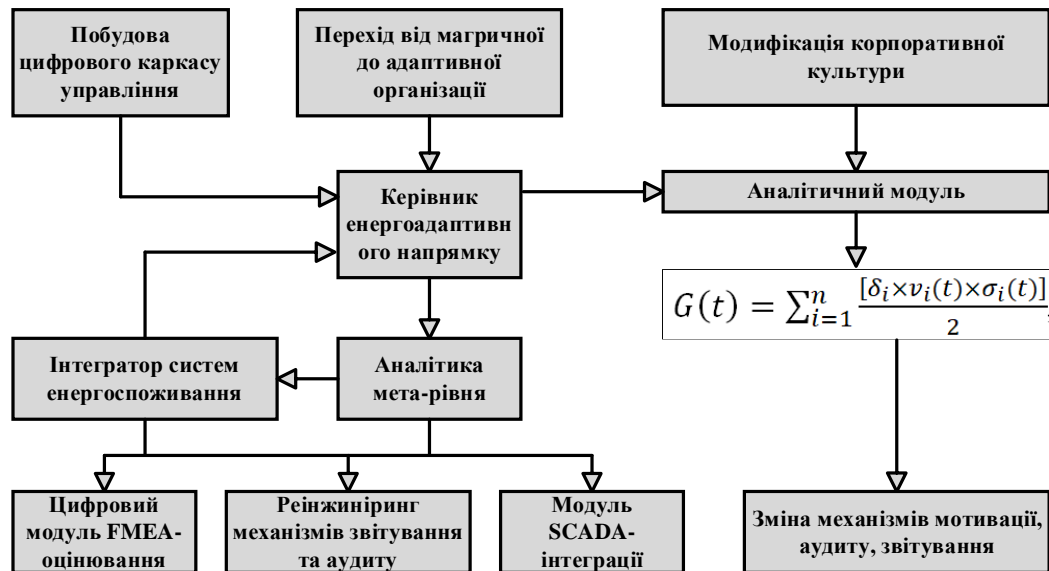


Рисунок 2.10. Сценарна карта впровадження енергоадаптивного управління в цифрову архітектуру девелоперської компанії (Джерело: розроблено автором на основі [87])

Наприклад, розробляються енергетичні сценарії з прогнозованим навантаженням на об'єкти, коригується стратегія введення в експлуатацію на основі сезонної симуляції споживання, змінюється графік підключення до інженерних мереж з урахуванням часових піків. Це дозволяє формувати політику внутрішньої координації через механізм енергетичних вікон рішень, що істотно підвищує адаптивність девелопера до ризиків [54].

Отже, розгортання управлінських структур та ролей у впровадженні енергоадаптивних будівельних програм виступає методичною основою інтеграції енергоменеджменту в операційні системи окремих проєктів. Саме через рольову, процесну та цифрову конфігурацію забезпечується перехід від локального управління окремим об'єктом до формування єдиного цифрового простору мультипроєктного девелопера, у межах якого дані, функції та управлінські рішення поєднуються в єдину систему координації.

2.3. Інтеграція будівельних процесів із системами контролю та автоматизації енергоспоживання

Інтеграція автоматизованих систем контролю енергоспоживання в будівельне середовище є важливим вектором розвитку сучасних містобудівних процесів, що відображає глобальний тренд до зменшення вуглецевого сліду, оптимізації ресурсів і забезпечення сталої урбанізації. У теоретичному плані ця інтеграція формується на стику інженерних наук, інформаційних технологій, екологічного менеджменту та економіки енергоспоживання. У класичному розумінні енергоменеджмент у будівництві обмежувався встановленням енергоощадних матеріалів, однак сучасна парадигма вимагає переходу до інтелектуальних систем моніторингу та керування споживанням в режимі реального часу, які мають здатність до навчання, адаптації та динамічного оновлення даних.

Інтеграція автоматизованих систем, таких як BMS (Building Management System), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), EMS (Energy Management System) або BEMS (Building Energy Management System), передбачає включення сенсорних платформ, цифрових модулів збору даних, аналітичних інтерфейсів та керувальних механізмів до інфраструктури будівельного процесу. Ці системи взаємодіють із внутрішніми циклами проектування, будівництва та експлуатації, створюючи замкнене коло управління, в якому зчитування параметрів та зворотний зв'язок реалізуються на основі принципів саморегуляції. Таким чином, будівельний об'єкт більше не є лише фізичною структурою, а перетворюється на кібер-фізичну систему (CPS), яка функціонує за логікою автономної енергетичної поведінки [62].

На рівні концепцій інтеграція автоматизації в будівельну діяльність спирається на системно-орієнтований підхід. Вперше ідеї системної енергетичної оптимізації в будівництві були описані в працях Гарольда Левінсона (Levinson H.) ще в 1990-х роках, проте лише з розвитком цифрових технологій їх вдалося реалізувати на практиці. Вагому роль відіграє концепція Smart Grid у її мікроформаті — Smart Building Grid, яка реалізує ідею гнучкого

взаємозв'язку між системою будівлі та зовнішнім енергетичним середовищем через інтелектуальні вузли розподілу, накопичення і передачі енергії.

Ключовими принципами, на яких базується така інтеграція, є модульність, відкритість, інтероперабельність, адаптивність і масштабованість. Модульність дозволяє поступове розгортання системи від окремих вузлів (освітлення, вентиляція, опалення) до загального енергетичного ядра. Відкритість забезпечує можливість взаємодії з різними протоколами (BACnet, KNX, Modbus, LonWorks), а інтероперабельність — здатність працювати із суміжними системами ERP, BIM, CRM. Адаптивність означає здатність системи змінювати свої параметри у відповідь на зовнішні умови чи поведінку користувача, що реалізується через алгоритмічні петлі зворотного зв'язку, а масштабованість — перспективу розширення системи за межі одного об'єкта, до рівня кварталів чи міст.

Перший фундаментальний рівень автоматизованого управління спирається на модель енергетичного балансу об'єкта, який можна представити узагальненою формулою 2.13:

$$T_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n (T_{i,\text{cons}} - T_{i,\text{rec}}) + \Delta T_{\text{st}}, \quad (2.13)$$

де $T_{i,\text{cons}}$ — споживана енергія i -тим підсистемним блоком (освітлення, вентиляція, підігрів води тощо), $T_{i,\text{rec}}$ — відновлювана енергія, яку отримує підсистема (сонячна, рекуперативна), ΔT_{st} — зміна обсягу накопиченої енергії (акумулятори, теплові буфери). Ця модель є базовою для розрахунків в системах BEMS, коли здійснюється балансування потоку ресурсів між споживачами, джерелами генерації та вузлами накопичення.

Принципово важливим є питання вибору та конфігурації сенсорних систем. Сенсори — це вихідні точки даних, які зчитують параметри температури, вологості, освітленості, вібрації, газового складу повітря, присутності людей. Їхні сигнали надходять у SCADA або BMS-сервер, де за допомогою логічних операторів і алгоритмів fuzzy logic визначається реакція системи. Наприклад, при перевищенні температури в робочій зоні активується сценарій додаткової вентиляції, що моделюється через граф потоку команд. У цьому контексті використовується поняття інформаційного профілю об'єкта —

сукупності реальних і очікуваних значень параметрів у певних часових інтервалах [50].

Поведінкові моделі споживання енергії також є важливим інструментом інтеграції. Вони базуються на принципах предиктивної аналітики, коли система вивчає звички користувачів і формує прогнози на основі статистики. Використання моделей нейромережевого типу дозволяє сформулювати залежність, формула 2.14:

$$V_t = f(R_{t-1}, R_{t-2}, \dots, R_{t-n}; \sigma), \quad (2.14)$$

де V_t — очікуване енергоспоживання в момент часу t , R_{t-n} — історичні дані про навантаження, температура, освітленість, інтенсивність використання приміщення, а σ — вектор параметрів моделі, що оновлюється у процесі навчання. Такі підходи реалізуються через архітектури LSTM або GRU і все частіше використовуються в інтелектуальних будівлях комерційного та житлового призначення.

На практичному рівні, інтеграція автоматизації в будівельні процеси не обмежується фазою експлуатації — вона починається вже на етапі проектування. Завдяки BIM-моделям (Building Information Modeling) відбувається моделювання не тільки геометрії об'єкта, а й його поведінки у вигляді енергетичних сценаріїв. У цьому контексті застосовується концепція «цифрового двійника» будівлі, який включає в себе як конструктивну, так і поведінкову складову, пов'язану з енергоспоживанням. Розширення цієї моделі через підключення до цифрових хмарних платформ (наприклад, Azure IoT, Siemens MindSphere, Schneider EcoStruxure) дозволяє реалізувати повноцінну систему інтелектуального управління [2].

Щоб наочно представити взаємозв'язки між ключовими елементами цифрової трансформації управління енергоспоживанням у будівельному середовищі, нижче наведено рисунок 2.11, що охоплює логіку інтеграції систем SCADA, BMS, EMS, сенсорних технологій, інформаційних профілів і цифрових двійників. Рисунок ілюструє складну архітектуру взаємодії між технічними, інформаційними та аналітичними компонентами, підкріплену формулами енергетичного балансу та предиктивного моделювання.

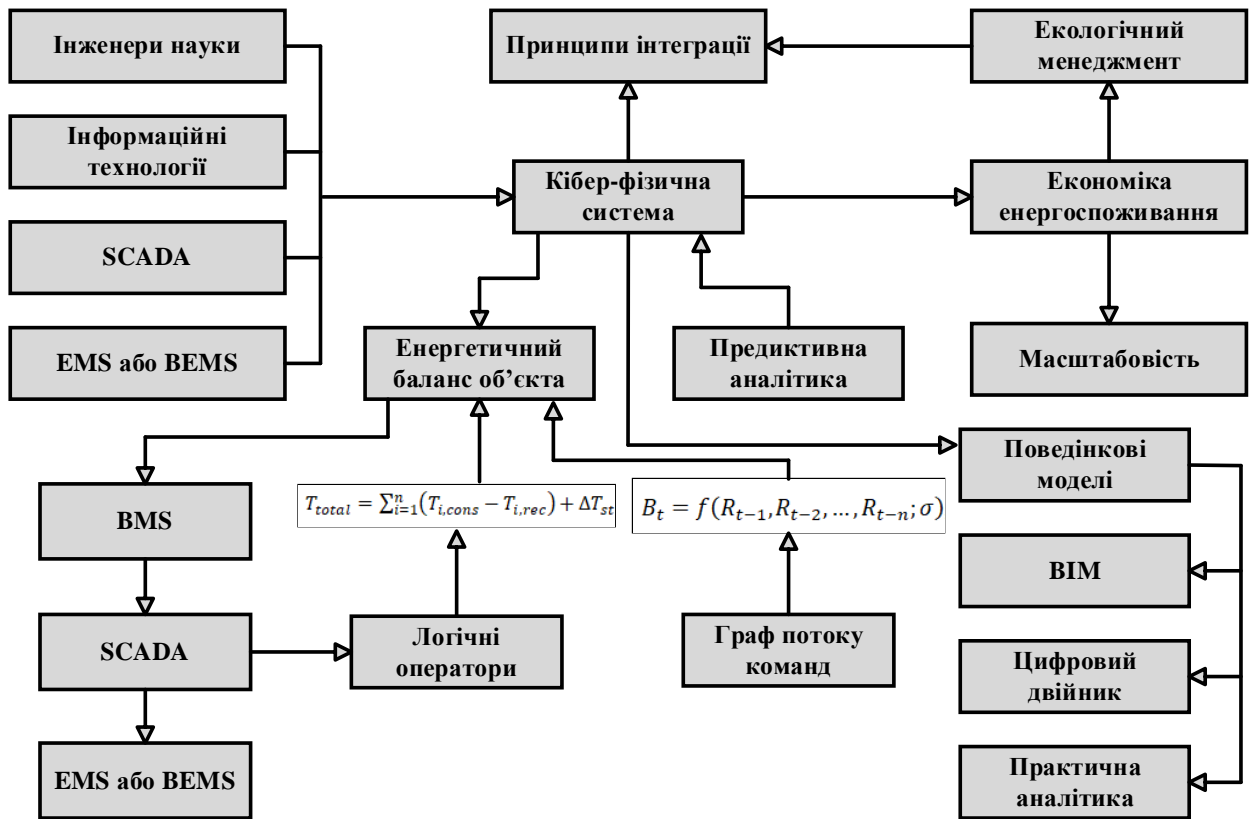


Рисунок 2.11. інтеграції автоматизованих систем контролю енергоспоживання в будівельному середовищі (Джерело: розроблено автором на основі [2])

Надзвичайно важливою є здатність систем до самодіагностики та саморегуляції. У цьому випадку йдеться про введення адаптивних алгоритмів, які дозволяють реагувати на відхилення без участі людини. Наприклад, при виявленні пікових навантажень система може автоматично відкласти менш критичні задачі, тим самим балансує внутрішній енергетичний профіль. Такі підходи базуються на системах типу Rule-Based Expert Systems або нейро-фазі логіці.

У свою чергу, для оптимізації процесу включення/відключення навантажень застосовується спеціалізоване рівняння енергетичної реакції, формула 2.15:

$$H_{adj}(t) = \delta \times H_{real}(t) + \gamma \times \frac{dH}{dt} + \alpha \times \int_0^t H(\beta) d\beta, \quad (2.15)$$

де $H_{adj}(t)$ — скориговане навантаження, $H_{real}(t)$ — реальна потужність у момент часу t , δ, γ, α — коефіцієнти настройки залежно від рівня реакції системи (інерційність, миттєва реакція, накопичений ефект).

У нормативному плані, інтеграція контролю енергоспоживання в будівельні об'єкти регламентується стандартами ISO 50001, ISO 52000-1:2017 (енергетична ефективність будівель), а також локальними будівельними кодами. В Україні активно впроваджується концепція «зеленого будівництва» (Green Building), відповідно до методологій BREEAM, LEED, DGNB, що передбачає наявність систем контролю енергії як обов'язковий елемент сертифікації.

Отже, теоретико-концептуальне підґрунтя інтеграції автоматизованих систем контролю енергоспоживання в будівництві охоплює широкий спектр — від фізико-математичних моделей до алгоритмів штучного інтелекту та регуляторної рамки. Інформаційно-енергетична поведінка будівельного об'єкта поступово набуває ознак кібернетичної системи з автономним циклом управління, адаптивним зворотним зв'язком та здатністю до самонавчання, що відкриває нові перспективи для сталого і відповідального містобудування [11].

З огляду на теоретичне підґрунтя та прикладну логіку інтеграції автоматизованих систем, варто глибше розглянути, як саме формуються інформаційно-енергетичні цикли в межах будівельного процесу. Саме ці цикли визначають не лише ефективність споживання ресурсів, а й забезпечують постійну синхронізацію між цифровими платформами та фізичною реальністю об'єкта.

Сучасний будівельний процес — це не лише фізична реалізація проєктної документації, а й динамічний потік інформаційних та енергетичних взаємодій, що відбуваються між елементами об'єкта, цифровими платформами та інженерною інфраструктурою. Концепція інформаційно-енергетичних циклів у будівництві базується на визнанні того, що кожна фаза реалізації проєкту — від планування до здачі в експлуатацію — супроводжується обміном як енергетичними ресурсами (теплова, електрична, механічна енергія), так і даними (процедури контролю, параметри обладнання, алгоритми оптимізації). Таким чином, будівництво дедалі більше функціонує як система, що координується у реальному часі на основі цифрових інтерфейсів. У межах цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів ризику доцільно розглядати як невід'ємний елемент функціонально-цифрової

системи управління. До основних груп належать технічні ризики відмов обладнання, інформаційні ризики втрати або спотворення даних, організаційні ризики порушення координації між учасниками, енергетичні ризики перевантаження систем та зовнішні ринково-регуляторні ризики. Їх урахування в цифровому середовищі дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління, коли відхилення і загрози виявляються, оцінюються та компенсуються ще до переходу у критичну фазу.

На базовому рівні інформаційно-енергетичні цикли поділяються на горизонтальні (внутрішні) та вертикальні (інтеграційні). Горизонтальні цикли охоплюють безпосередньо будівельний майданчик: це передача даних від сенсорів до контролерів, реакція виконавчих механізмів, контроль витрат ресурсів і логістика матеріалів. Вертикальні цикли забезпечують з'єднання будівельного об'єкта з вищими рівнями керування: це ERP-системи, BIM-моделі, хмарні аналітичні середовища, а також зовнішні енергетичні постачальники.

Ключовим елементом структури інформаційно-енергетичного циклу є вузлова точка інтеграції — функціональний модуль, у якому відбувається перетворення сигналу, його верифікація, маршрутизація та зворотна реакція. Ці точки зазвичай реалізовані у вигляді шлюзів (gateway), які підтримують одночасно кілька протоколів: BACnet/IP для BMS, OPC UA для SCADA, IFC для BIM, а також MQTT або CoAP у разі використання IoT-сенсорів. Їх головна роль — забезпечення безперервності цифрового ланцюга між даними про споживання та діями щодо його корекції [55].

Типовий сценарій: сенсор фіксує перевищення температури повітря в бетонній залі під час заливки плити перекриття. Сигнал передається через локальну мережу до контролера, який порівнює значення з еталонним профілем. У разі відхилення вище допустимого порогу (наприклад, +3 °C) система автоматично активує вентилятори або сигналізує про зміну графіка робіт. Одночасно дані фіксуються в BIM-моделі об'єкта, оновлюючи параметр матеріального модуля. Таким чином, реалізується замкнений цикл даних: сенсор → інтерфейс → реакція → фіксація → аналіз → зворотний вплив .

З огляду на кількість активних каналів передачі, таких як RS-485, LoRa, Wi-Fi, ZigBee, Ethernet та OPC-сервери, виникає потреба у модульній архітектурі управління. Вона забезпечує стабільне функціонування при значному навантаженні на обчислювальну інфраструктуру та розпаралелювання аналітичних процесів. Саме тому більшість сучасних будівельних об'єктів з високими енерговитратами (логістичні центри, бізнес-комплекси, лікарні) використовують так звану модель багаторівневого управління.

Цю модель можна описати через концепцію енергетичних зон та інформаційних доменів. Зони — це фізичні простори, які мають власний профіль споживання, наприклад: робоча зона, зона технічного обслуговування, складська частина. Домен — це логічна структура, в межах якої інформація опрацьовується: аналітичний домен (оцінка ефективності), операційний домен (реакція на відхилення), предиктивний домен (прогнозування сценаріїв). Їхній перетин формує повноцінну систему взаємодії.

Математично моделювання інформаційно-енергетичного циклу можна здійснити через узагальнену енергетичну матрицю споживання, формула 2.16:

$$N(t) = \begin{bmatrix} n_{11}(t) & n_{12}(t) & \dots & n_{1n}(t) \\ n_{21}(t) & n_{22}(t) & \dots & n_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{m1}(t) & n_{m2}(t) & \dots & n_{mn}(t) \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

де $n_{ij}(t)$ — обсяг енергоспоживання в зоні i для домену j в момент часу t . Така матриця є основою для побудови карт енергетичної щільності об'єкта, виявлення пікових точок навантаження, сценарного моделювання зменшення споживання.

З точки зору цифрових інтерфейсів, найважливішим компонентом є API-шлюз, який забезпечує двосторонню синхронізацію між BMS і BIM.

Завдяки цьому модулі системи можуть обмінюватися параметрами в реальному часі: зміни температури, вологості, енергетичного навантаження одразу позначаються в цифровій моделі об'єкта, а не лише у фізичному просторі. Саме так забезпечується цілісність керування — не лише реакція на події, а й активне планування та прогнозування [5].

Побудова замкненого цифрово-енергетичного циклу в межах будівельного об'єкта потребує чіткої синхронізації між сенсорними модулями, реактивними підсистемами та зовнішніми платформами управління. На нижче наведеному рисунку 2.8 відображено приклад взаємодії горизонтальних і вертикальних енергетичних каналів, сенсорної сигналізації та системи оперативної реакції під час перевищення температури.

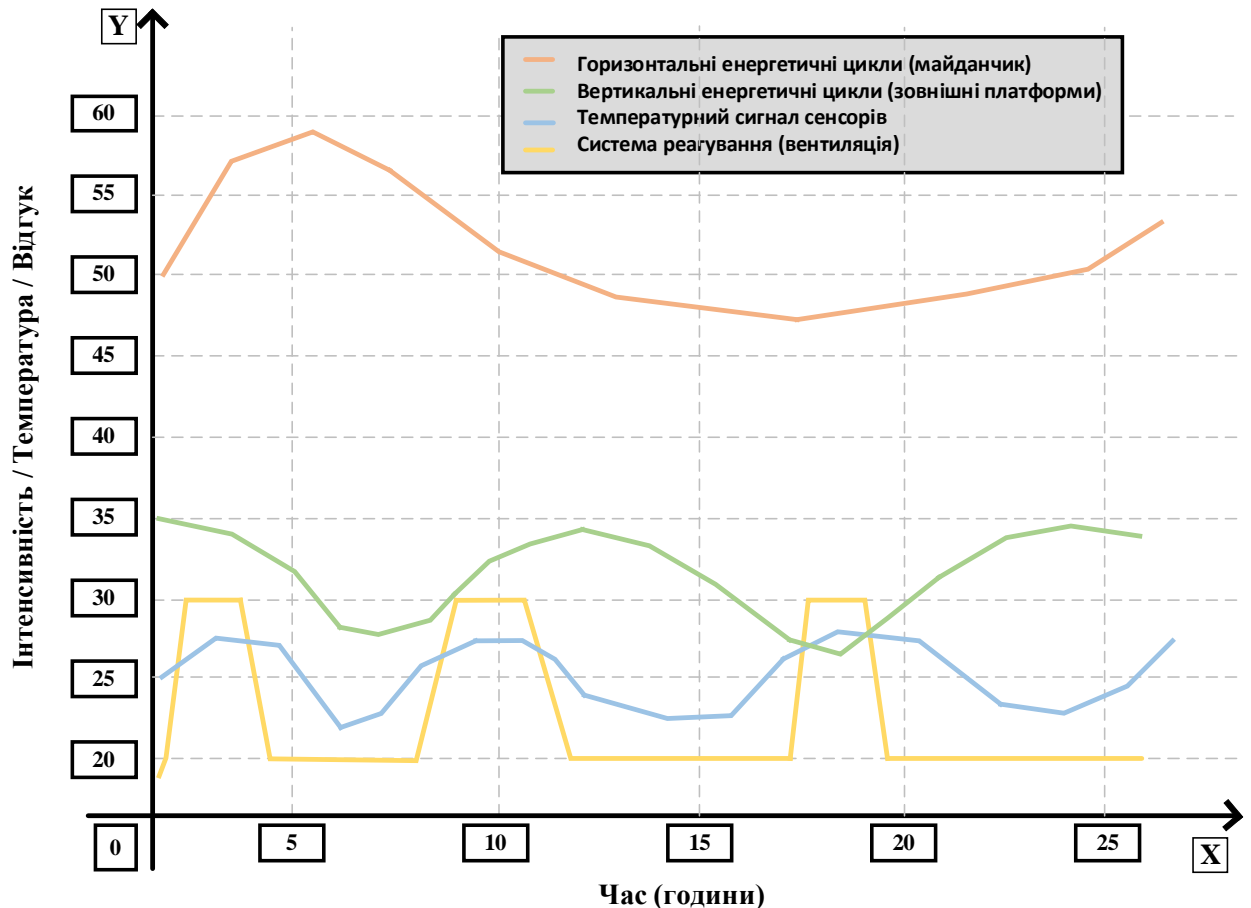


Рисунок 2.12. Динаміка функціонування інформаційно-енергетичних циклів у сценарії автоматичної корекції умов заливки плити (Джерело: розроблено автором на основі [5])

Однією з головних проблем при розгортанні таких циклів є тимчасова дискретність даних. Часова затримка між моментом реєстрації події, її передачею та реагуванням може суттєво вплинути на ефективність. Для усунення цієї проблеми використовуються так звані часові буфери, які адаптивно зменшуються або збільшуються в залежності від чутливості системи. Їх можна описати рівнянням адаптації буфера, формула 2.17:

$$\rho(t + 1) = \rho(t) \times \left(1 - \delta \times \frac{\Delta H(t)}{H_{\max}}\right), \quad (2.17)$$

де $\rho(t)$ — довжина буфера на момент часу t , $\Delta H(t)$ — різниця між поточним та допустимим навантаженням, δ — коефіцієнт адаптивності, H_{\max} — максимальне навантаження.

Формування цифрових інтерфейсів також потребує наявності захищеного каналу комунікації. Застосовуються методи TLS-шифрування, двофакторна автентифікація пристроїв, рольова модель доступу до системних даних. З огляду на це, проектування інформаційно-енергетичних систем неможливо здійснювати без урахування питань кібербезпеки, що вимагає залучення фахівців не лише в галузі енергетики, а й у сфері цифрової безпеки [47].

Підсумовуючи, можна зазначити, що структура інформаційно-енергетичних циклів у будівництві — це складна, багатошарова мережа взаємодій між фізичними, інформаційними та логічними рівнями. Її успішна реалізація потребує модульного підходу, підтримки міжпротокольної взаємодії, оптимізації часових відгуків і безперервного моніторингу ефективності. У результаті формується новий клас будівельних об'єктів — самонавчальних, реактивних, цифрово-керованих, здатних самостійно оптимізувати свої енергетичні стратегії.

Водночас ефективність інформаційно-енергетичних циклів значною мірою залежить від здатності систем реагувати на зміни умов у реальному часі. Саме тому наступним кроком у розвитку енергетичного управління в будівництві стало впровадження адаптивних моделей, що дозволяють не просто фіксувати відхилення, а й активно формувати стратегії їх компенсації.

Адаптивне керування енергоспоживанням у будівництві — це новітній концептуальний підхід, що інтегрує цифрову аналітику, машинну реакцію на зовнішні й внутрішні зміни та структуроване управління ресурсами в реальному часі. Традиційна енергетика в будівельному секторі ґрунтувалась на фіксованих нормах витрат, жорстких графіках живлення та малодинамічних обліково-коригуючих моделях. Проте із розвитком цифрових сенсорних мереж, високоточних будівельних механізмів і складних логістичних конфігурацій виникла потреба у гнучкій, самоналагоджувальній та

передбачувальній системі управління, яка б не тільки відстежувала витрати енергії, але й адаптивно підлаштовувалась до факторів навколишнього середовища, фаз будівництва, темпів робіт і змін у проєктних параметрах. Це породило ідею адаптивного енергоменеджменту як кіберфізичного процесу, в якому зливаються технічне середовище, цифрова логіка та аналітична база даних у єдину систему еволюційної реакції [99].

Побудова моделей адаптивного керування потребує поєднання кількох типів мислення: інженерного (розуміння логіки енергоспоживання та структурного навантаження), математичного (формалізація поведінкових моделей), інформаційного (створення цифрових каналів зворотного зв'язку) та стратегічного (довгострокове планування ефективності). У класичних теоріях енергоспоживання, таких як модель Гордона-Бела, передбачалось, що витрати енергії є функцією планових обсягів робіт, кількості обладнання та коефіцієнта втрат. Сучасні адаптивні моделі, натомість, формуються як багатофакторні нелінійні структури, де кожен параметр має часову та ситуаційну залежність. Наприклад, енергоспоживання при бетонуванні плити перекриття буде суттєво відрізнятися залежно від температури навколишнього середовища, ступеня затінення, вологості повітря, наявності підключених теплогенераторів і кількості працюючих насосів. Одна й та сама операція в різних умовах має зовсім різний енергетичний профіль, тому адаптація повинна враховувати не тільки поточний стан, а й прогноз змін у контексті часових рядів [96].

Однією з основних форм математичного моделювання в адаптивному керуванні є регресійні моделі з ваговою корекцією. У таких моделях кожен з факторів впливу — від кількості задіяних машин до параметрів мікроклімату — отримує динамічну вагу, яка залежить від його актуального значення у порівнянні з нормованим профілем. При цьому важливим є введення коефіцієнта адаптації, який дозволяє системі змінювати свою поведінку у відповідь на наростаючі або затухаючі збурення. Така модель має вигляд формули 2.18:

$$K_{adj}(t) = \sum_{i=1}^n [\beta_i(t) \times x_i(t)] + \gamma(t), \quad (2.18)$$

де $K_{adj}(t)$ — адаптоване енергоспоживання, $\beta_i(t)$ — динамічна вага фактора $x_i(t)$, яка змінюється залежно від поведінки системи в попередніх циклах, а

$\gamma(t)$ — функція збурення або непередбаченої дії. У цій формулі реалізовано основну ідею адаптації — не фіксоване управління, а самокорекція залежно від зміни контексту.

Важливо зазначити, що ключовим у цих моделях є не лише математичне представлення, а спосіб збору та обробки даних. Будівельний майданчик як джерело енергетичних подій породжує постійну динаміку, яка фіксується сенсорами температури, освітленості, вібрації, електричних навантажень, наявності персоналу, швидкості переміщення вантажів. Ці сенсори формують так звану цифрову оболонку, яка обгортає будівництво та реєструє всі події в режимі реального часу. В подальшому ці дані або передаються в центральну систему (наприклад, ERP/BIM-контур), або одразу опрацьовуються локальним алгоритмом (наприклад, edge-комп'ютером або контролером типу PLC), який приймає рішення про зниження потужності, відключення непотрібних вузлів, зміни частоти обертання двигунів тощо [86].

На основі викладеного матеріалу доцільно систематизувати ключові характеристики адаптивного керування енергоспоживанням у будівництві, порівнюючи традиційні підходи з новітніми цифровими моделями. У таблиці 2.5 наведено основні ознаки, які відрізняють класичні та адаптивні системи управління енергією на будівельному майданчику.

Запропонований підхід до адаптивного керування енергоспоживанням створює підґрунтя для оновлення системи критеріїв успішності енергоадаптивного проєкту. До таких критеріїв, окрім традиційних техніко-економічних показників, мають бути включені показники енергоощадності, функціональної результативності, цифрової прозорості, екологічної відповідності, соціальної прийнятності та репутаційно-іміджевої стійкості. Це дозволяє оцінювати проєкт не лише як будівельний продукт, а як багатовимірну систему, ефективність якої формується протягом усього життєвого циклу.

Провідне місце в адаптивному керуванні займає модель реакції на пікове навантаження. У типовому будівництві спостерігається сильна варіабельність споживання протягом доби — вранці, під час запуску техніки, споживання зростає вдвічі або втричі; ввечері — падає.

Порівняльна характеристика традиційного та адаптивного енергоменеджменту в будівництві

Критерій порівняння	Традиційний енергоменеджмент	Адаптивне керування енергоспоживанням
Тип моделі	Фіксована, нормативна	Нелінійна, багатофакторна, динамічна
Облік факторів середовища	Відсутній або обмежений	Повномасштабна інтеграція метео-, мікрокліматичних даних
Джерело даних	Планові норми та розрахункові графіки	Реальні сенсорні дані в режимі реального часу
Гнучкість реагування	Низька, ручне коригування	Висока, автоматизована адаптація на основі збурень
Алгоритм прийняття рішень	Лінійна залежність від запланованих параметрів	Математичні регресійні моделі з динамічними вагами
Урахування фаз будівництва	Немає, підхід однорідний до всіх етапів	Моделювання профілю енерговитрат для кожної фази окремо
Інтеграція з цифровими платформами	Обмежена, фрагментарна	Повна, з використанням BIM/ERP/SCADA/Edge-пристроїв
Прогнозування та планування	Орієнтоване лише на поточні нормативи	Прогноз на основі часових рядів і сценарного моделювання
Форма зворотного зв'язку	Відсутня або статистично затримана	Негайна реакція на вхідні сигнали, з можливістю самоналаштування
Ціль функціонування	Дотримання норм споживання	Мінімізація витрат і реакція на зміну контексту

(Джерело: розроблено автором на основі [86])

Якщо не впровадити механізми згладжування, це призводить до перенавантаження мереж, перевитрат, підвищення тарифів. Тому застосовується формула 2.19. сценарного буферного згладжування:

$$A(t) = \tau \times \left(\frac{dH(t)}{dt} \right)^2 + \varepsilon \times |H(t) - \bar{H}|, \quad (2.19.)$$

де $A(t)$ — буфер споживання, τ — коефіцієнт реакції на похідну зміни енергії, ε — ваговий параметр відхилення від середнього профілю \bar{H} , $H(t)$ — реальне споживання в момент часу. Цей підхід дозволяє автоматично запускати згладжувальні механізми (перемикання на альтернативні джерела, обмеження споживання деяких вузлів) при перевищенні порогів.

Не менш актуальною є проблема адаптації до зовнішніх впливів — зміни погоди, коливань напруги, аварій на енергетичних лініях. У таких випадках адаптивні моделі включають не лише внутрішню інформацію, але й сигнали ззовні. Для цього використовуються інтеграційні шлюзи до SCADA-систем або до публічних API метеостанцій, які забезпечують попередження про зміну температури, вологість або прогнозовані збурення в електромережі. У складних моделях, що застосовуються в висотному будівництві, використовується мультиагентна архітектура, де кожен енергетичний вузол функціонує як агент із власним механізмом прийняття рішень, але підпорядковується загальному сценарію, що формується центральним ядром (наприклад, модулем управління енергопотоками на основі BIM або EMS-системи). Це дозволяє досягти гнучкості в реакції на збурення без повного порушення енергетичного профілю будівництва.

У перспективі використання штучного інтелекту в адаптивних системах управління дозволить створити самонавчальні структури. Наприклад, якщо система виявляє, що певне навантаження систематично призводить до відхилення, вона може самостійно переналаштувати модель, змінити коефіцієнти регуляції, або навіть запропонувати оператору зміну алгоритму виконання будівельної фази. Такі системи уже частково впроваджуються у країнах ЄС — зокрема, у Швеції (проекти Skanska) та Німеччині (Hochtief), де будівельні об'єкти оснащуються інтелектуальними ядрами управління споживанням. Успішне функціонування таких систем базується на

використанні нейромереж із адаптивним розгалуженням, що дозволяє автоматично перезапускати підсистеми після зміни вхідних параметрів [95].

Як показано на рисунку 2.9, модель адаптивного керування енергоспоживанням у будівництві передбачає складну структуру взаємодії цифрової аналітики, машинного реагування, адаптивних коефіцієнтів та зовнішніх сигналів. Усі ці елементи об'єднуються в єдину систему самонавчання, яка забезпечує не лише реагування на зміни, а й формування прогнозованих сценаріїв оптимізації енерговитрат. Такий підхід дозволяє гнучко управляти ресурсами навіть за умов високої мінливості зовнішнього середовища.

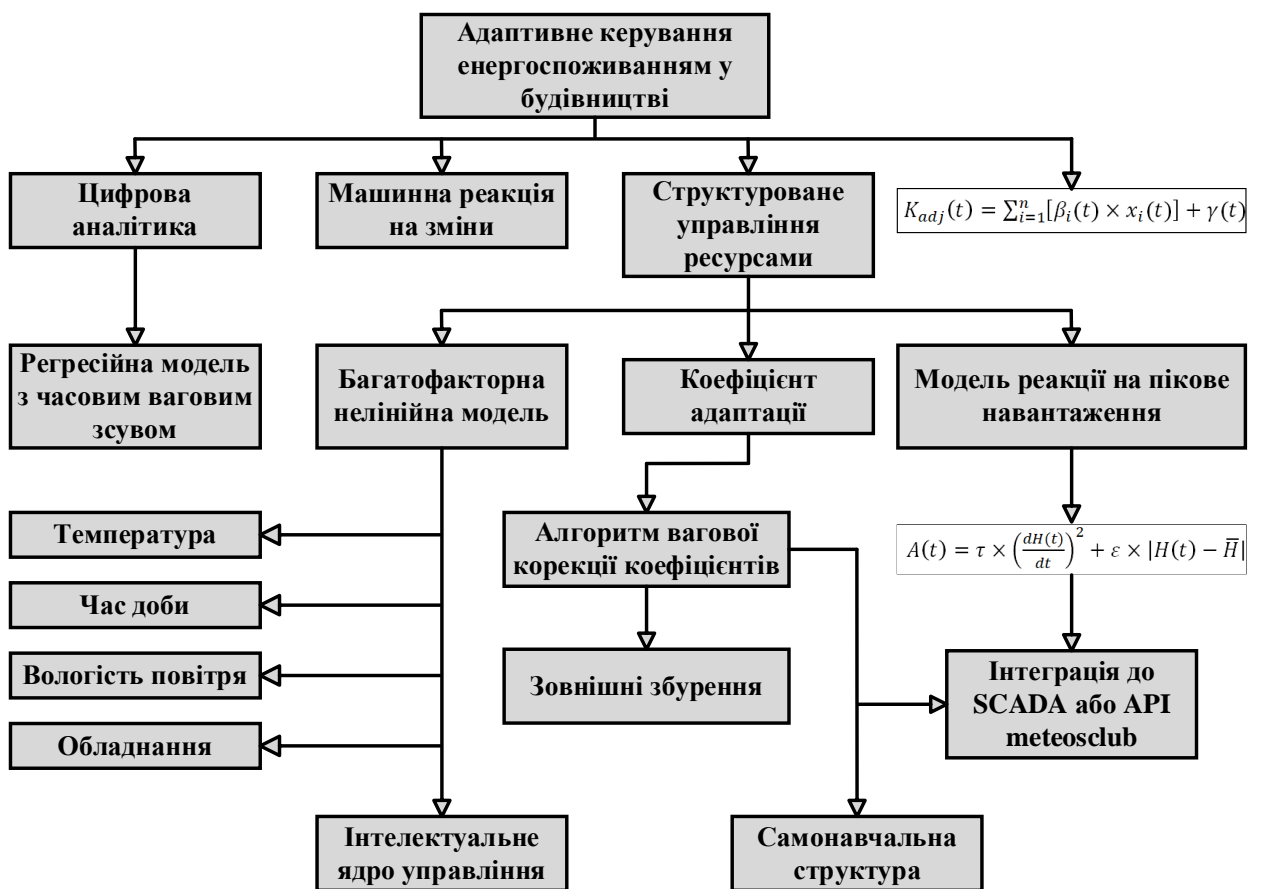


Рисунок 2.13. Модель адаптивного керування енергоспоживанням у будівництві (розроблено автором на основі [95])

З огляду на нормативну базу, адаптивне управління поки що не має чітко закріплених вимог у більшості національних стандартів. Однак у рамках ISO 50001:2018 з'являється поняття "енергетичного планування за сценарієм", яке тісно пов'язане з адаптивною поведінкою систем. Також у регламентах BREEAM та LEED (особливо LEED v4.1) передбачено надання балів за

використання систем, які можуть автономно оптимізувати споживання залежно від умов.

У підсумку, можна стверджувати, що адаптивне управління енергоспоживанням у будівництві — це не просто модифікація класичних моделей споживання, а повноцінна трансформація управлінської парадигми. Воно змінює саму суть енергетичної поведінки об'єкта: замість "споживати за графіком" система починає "думати", прогнозувати, згладжувати, реагувати. Такий підхід дозволяє не лише скоротити витрати на електроенергію, а й зменшити ризики перевантаження систем, забезпечити надійність, знизити викиди CO₂, а також сформувати принципово новий клас інтелектуальних об'єктів, здатних до самостійної адаптації без людського втручання [76].

На основі проведеного аналізу, розроблених моделей та використаного математичного апарату доцільно узагальнити інструментарій управління енергоадаптивними проєктами у вигляді систематизованого переліку моделей із зазначенням їх функціонального призначення та прикладної реалізації. Така узагальнена структура наведена в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9.

Моделі управління енергоадаптивними проєктами та їх прикладна інтерпретація

№ формули	Назва моделі	Функціональне призначення	Інструмент реалізації / інтерпретація	Застосування
(2.1)	Модель теплової динаміки будівлі	Аналіз температурного режиму	Теплотехнічне моделювання (EnergyPlus, DesignBuilder)	Оцінка ефективності огорожувальних конструкцій
(2.2)	Динамічна модель стану системи	Управління параметрами середовища	BMS / Digital Twin	HVAC, вентиляція
(2.3)	Оптимізаційна модель	Мінімізація енерговитрат	Алгоритми оптимізації (AI, MPC)	Енергоменеджмент
(2.4)	Модель BIPV	Розрахунок генерації енергії	PV simulation tools	Проєктування ВДЕ

Продовження таблиці 2.9.

(2.5)	Модель ефективності теплового насоса	Оцінка продуктивності	Енергетичні розрахунки / simulation	Геотермальні системи
(2.6)	Модель матриці ролей	Формування управлінської структури	RACI / цифрові ролі в BIM	Управління проектом
(2.7)	Модель реакції системи	Реагування на відхилення	Rule-based / AI-аналітика	Smart Building
(2.8)	Модель впливу ролей	Оцінка ефективності учасників	KPI / BI-аналітика	Управління командою
(2.9)	Модель досягнення цілей	Контроль ефективності	Dashboard KPI	Девелопер
(2.10)	Просторово-рольова модель	Розподіл функцій у просторі	BIM-середовище	Координація
(2.11)	Модель інтеграції управління	Інтеграція в корпоративну систему	ERP + BMS + BI	Девелоперські компанії
(2.12)	Модель енергетичного балансу	Баланс споживання/генерації	EMS/BEMS	Управління енергією
(2.13)	Предиктивна модель	Прогнозування споживання	ML (LSTM, regression)	AI-системи
(2.14)	Модель керування навантаженням	Регулювання потужності	SCADA / load control	Енергосистеми
(2.15)	Матрична модель споживання	Аналіз зон	Data analytics / heat maps	Зонування
(2.16)	Модель адаптації системи	Зменшення затримок	IoT / edge computing	Реальний час
(2.17)	Адаптивна модель енергоспоживання	Самоналаштування	AI / цифрові платформи	Smart системи
(2.18)	Модель згладжування піків	Баланс навантаження	Demand Response	Peak management

Запропонована систематизація моделей відображає авторський підхід до формування методичного базису, який відрізняється комплексністю, міждисциплінарністю та орієнтацією на практичну реалізацію в умовах цифрової трансформації будівельної галузі. Використання даного інструментарію створює основу для підвищення енергоефективності, адаптивності та стійкості девелоперських проєктів, а також забезпечує обґрунтованість прийняття управлінських рішень на всіх етапах їх життєвого циклу.

Таким чином, у межах другого розділу дисертаційного дослідження вперше розроблено та науково обґрунтовано методичний базис

інструментарію управління енергоадаптивними девелоперськими проектами, який ґрунтується на інтеграції системного аналізу, моделювання, економіко-математичних та імітаційних підходів у межах функціонально-цифрової системи управління.

На відміну від існуючих підходів, запропонований методичний базис передбачає узгодження архітектурно-технічних рішень, управлінських структур, цифрових платформ та моделей енергоменеджменту як взаємопов'язаних компонентів єдиної системи, що функціонує в режимі адаптивного управління. Це дозволяє забезпечити комплексне врахування енергетичних, технологічних та інформаційних факторів у процесі реалізації будівельних проєктів.

Удосконалено підходи до формування інструментарію управління за рахунок інтеграції математичних моделей із цифровими технологіями (BIM, BMS, IoT, Digital Twin, AI), що забезпечує підвищення точності прогнозування, ефективності управлінських рішень та адаптивності проєктів до змін зовнішнього середовища.

Запропонована систематизація моделей та інструментів створює науково обґрунтовану основу для переходу від фрагментарного управління до цілісної функціонально-цифрової системи супроводу енергоадаптивних проєктів, що є ключовим результатом даного розділу.

З метою узагальнення отриманих результатів та забезпечення їх формалізації у межах дослідження запропоновано представити енергоадаптивний будівельний проєкт як багатовимірний функціонально-цифровий простір, у якому взаємодіють архітектурно-технічні, енергетичні, управлінські та інформаційні компоненти.

Такий простір можна формалізувати у вигляді інтегрованої функції стану системи

$$F_{EA}(t) = \int_0^t \Phi(A(t), E(t), U(t), D(t), R(t))dt \quad (2.20)$$

де: $F_{EA}(t)$ інтегральний рівень функціонування енергоадаптивного проєкту;

- $A(t)$ — архітектурно-технічні параметри об'єкта (оболонка, матеріали, планувальні рішення);
- $E(t)$ — енергетичні характеристики (споживання, генерація, баланс енергії);
- $U(t)$ — управлінська конфігурація (ролі, структура, сценарії управління);
- $D(t)$ — цифрове середовище (BIM, BMS, IoT, Digital Twin, аналітичні платформи);
- $R(t)$ — ризики та зовнішні впливи (кліматичні, експлуатаційні, поведінкові фактори);
- Φ — функція взаємодії компонентів системи.

Запропонована формалізація відображає енергоадаптивний проєкт як динамічну систему, в якій результативність визначається не окремими параметрами, а характером їх взаємодії у часі. На відміну від традиційних підходів, де архітектурні, енергетичні та управлінські рішення розглядаються ізольовано, у даній моделі вони інтегруються в єдине функціонально-цифрове середовище.

Включення цифрової складової $D(t)$ забезпечує можливість реалізації концепції цифрового двійника та адаптивного управління в реальному часі, тоді як компонент ризиків $R(t)$ дозволяє враховувати невизначеність і варіативність зовнішнього середовища.

Таким чином, запропонований формалізований простір дослідження є узагальнюючою моделлю, яка поєднує результати системного аналізу, моделювання, економіко-математичних та імітаційних підходів і відображає авторський методичний базис управління енергоадаптивними проєктами.

Отримані результати та сформований методичний базис створюють підґрунтя для подальшого дослідження практичних аспектів їх застосування. У наступному розділі роботи основну увагу буде зосереджено на розробленні та апробації прикладних механізмів реалізації запропонованого інструментарію, а також оцінюванні ефективності його впровадження в умовах девелоперської діяльності.

Висновки до розділу 2.

1. Другий розділ дисертаційної роботи присвячено формуванню методичного базису системи функціонально-цифрового супроводу енергоадаптивних девелоперських проєктів. Обґрунтовано провідну роль енергоменеджменту як ключового компонента цієї системи, що поєднує інструменти управління енергоспоживанням, оцінювання енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Показано, що елементи енергоменеджменту реалізуються в межах операційних систем проєктного рівня та інтегруються в єдиний цифровий простір мультипроєктного девелопера. Такий підхід забезпечує узгодженість управлінських рішень і підвищує адаптивність девелоперських проєктів до енергетичних викликів.

2. У межах розділу запропоновано оновлену систему критеріїв оцінювання успішності девелоперських проєктів, що виходить за межі традиційних техніко-економічних показників. До складу критеріїв включено показники енергоощадності, ефективності та результативності, доповнені екологічними, соціальними та репутаційно-іміджевими характеристиками. Це дозволяє комплексно оцінювати результати реалізації енергоадаптивних проєктів з урахуванням вимог сталого розвитку. Запропонований підхід формує підґрунтя для більш збалансованого управління девелоперською діяльністю в умовах цифрової трансформації.

3. Методичний апарат дослідження сформовано на засадах системного, процесного та цифрово-орієнтованого підходів до управління енергоадаптивними проєктами. Застосування методів системного аналізу, моделювання, економіко-математичних та імітаційних методів дозволило формалізувати організаційно-технологічні структури та оцінити їх енергоефективність і стійкість. Експертно-аналітичні, порівняльні та графоаналітичні методи забезпечили обґрунтування управлінських рішень і наочність цифрового супроводу проєктів. Сукупність використаних методів гарантує наукову обґрунтованість, комплексність і практичну орієнтацію отриманих результатів.

4. У даному розділі обґрунтовано, що формування архітектурно-технічної моделі будівлі з підвищеним рівнем енергоефективності є ключовим завданням сучасного будівельного проектування в контексті сталого розвитку. Доведено необхідність розгляду архітектурної форми, матеріалів, інженерних систем і технологій як єдиної інтегрованої енергетичної системи. Встановлено, що орієнтація проектних рішень на мінімізацію енергоспоживання повинна поєднуватися зі збереженням високого рівня комфортності внутрішнього середовища. Такий підхід дозволяє забезпечити довгострокову ефективність будівельних об'єктів та їх відповідність сучасним нормативним і стратегічним вимогам.

5. Доведено ефективність інтеграції пасивних і активних стратегій проектування як методологічної основи формування енергоадаптивної архітектурно-технічної моделі. Пасивні рішення, зокрема орієнтація будівлі, оптимізація природного освітлення, теплоаккумуляція та природна вентиляція, створюють базовий рівень енергетичної стабільності. Активні інженерні системи, керовані інтелектуальними алгоритмами, забезпечують адаптивне реагування на зміну кліматичних і експлуатаційних умов. Системна взаємодія цих компонентів підвищує енергоефективність, надійність та гнучкість будівельних рішень протягом усього життєвого циклу об'єкта.

6. Ключову роль у підвищенні енергоефективності відіграє концепція активної енергетичної оболонки будівлі, яка функціонує як інструмент теплового регулювання, а не пасивний захисний елемент. Обґрунтовано доцільність застосування динамічних фасадів, оптимального коефіцієнта заклення, гібридних конструктивних рішень і матеріалів з високою термічною інерцією. Показано ефективність використання фазозмінних матеріалів, природної вентиляції та адаптивних сонцезахисних елементів для стабілізації мікроклімату. Інтеграція цих рішень із цифровим моделюванням, сценаріями експлуатації та енергетичним зонуванням формує архітектурно-технічну модель, здатну реагувати на зовнішні й внутрішні зміни в режимі реального часу.

7. У другому розділі встановлено, що адаптивне керування енергоспоживанням у будівництві є якісно новою управлінською парадигмою, яка замінює нормативно-фіксовані підходи динамічними цифровими моделями. Така система базується на інтеграції сенсорних даних, машинного реагування та аналітичних алгоритмів у реальному часі. Доведено, що адаптивний енергоменеджмент забезпечує узгодження енерговитрат із фазами будівельного процесу, умовами середовища та інтенсивністю робіт. Це дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів і зменшити ризики перевантаження енергосистем. У результаті формується стійка та гнучка модель управління енергетичними потоками будівельного майданчика.

8. Математичний апарат адаптивного керування енергоспоживанням має багатофакторний і нелінійний характер, що принципово відрізняє його від класичних моделей. Використання регресійних моделей із динамічними ваговими коефіцієнтами та коефіцієнтами адаптації забезпечує самокорекцію управлінських рішень залежно від контексту. Встановлено, що одна й та сама будівельна операція формує різні енергетичні профілі за зміни мікроклімату, режимів роботи обладнання та організації процесів. Урахування часових рядів і прогнозних сценаріїв дозволяє системі не лише реагувати, а й передбачати зміни. Це підвищує точність планування та стабільність енергоспоживання.

9. Узагальнення наведених у розділі технічних, організаційних, енергетичних, цифрових і ризик-орієнтованих параметрів дозволяє сформувати інтегральний PLM-критерій як методичний інструмент оцінювання життєвого циклу енергоадаптивного проєкту. На відміну від локальних показників, він відображає не окремий фрагмент функціонування об'єкта, а цілісну динаміку його результативності з урахуванням енергоощадності, довговічності, керованості, цифрової інтегрованості та вартості життєвого циклу.

10. Ефективність адаптивного керування визначається рівнем цифровізації майданчика та якістю даних. Інтеграція сенсорних мереж, edge-обчислень і BIM/ERP/SCADA забезпечує оперативний зворотний зв'язок і

автоматизовану реакцію. Використання механізмів згладжування навантажень і мультиагентних архітектур сприяє локальній оптимізації енерговитрат без порушення системного балансу. Застосування III формує самонавчальні системи, що створює основу для інтелектуальних, енергоефективних і сталих будівельних об'єктів.

11. Таким чином, у другому розділі не лише узагальнено підходи до енергоефективного проектування, управлінської організації та цифрового супроводу будівельних процесів, а й сформовано методичний базис інструментарію організаційно-технологічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних девелоперських проєктів. Запропонований підхід забезпечує поєднання енергоменеджменту, цифрового моніторингу, адаптивного керування, критеріїв оцінювання та ризик-орієнтованих механізмів у межах єдиної функціонально-цифрової системи управління, що створює основу для розроблення прикладного цифрово-керованого інструментарію в розділі 3.

Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [102, 103, 105, 108].

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА, СУПРОВІД ТА АНАЛІТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ЕНЕРГОАДАПТИВНИХ ОБ'ЄКТІВ

3.1. Визначення ефективності цифрових платформ для енергетичного супроводу будівельних проєктів

Розробка цифрових платформ для енергетичного супроводу будівельних проєктів на сучасному етапі виходить за межі простого автоматизованого керування системами споживання. Нові умови вимагають розширення базових моделей і формування таких алгоритмів, які здатні не лише балансувати ресурси, а й відображати часові лаги, зовнішні контексти, когнітивні корекції та показники стійкості. Внаслідок цього цифрова платформа перетворюється з механізму контролю у складну багаторівневу систему прогнозування та адаптації, що інтегрує сенсорні дані, аналітику і керувальні рішення в єдиному когнітивному середовищі.

Основним нововведенням є введення часової згортки, що враховує інерційність реакцій інженерних систем. Це дозволяє відобразити, як затримки у виконанні команд впливають на сумарне енергоспоживання. Така модель може бути описана інтегральним рівнянням:

$$\Xi(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^n (L_i(\theta) - G_i(\theta)) e^{-\mu(t-\theta)} d\theta, \quad (3.1)$$

де $L_i(\theta)$ – навантаження i -тої підсистеми, $G_i(\theta)$ – її частка відновлюваної генерації, а множник $e^{-\mu(t-\theta)}$ описує ефект затримки у часі. Це рівняння відображає, що значення навантаження не є миттєвим, а має слід у часі, пропорційний швидкості реакції системи.

Водночас цього недостатньо для моделювання когнітивної поведінки платформи. Для цього вводиться стохастичний модуль, що враховує процес навчання на основі попередніх відхилень:

$$\Lambda(t) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot \sigma_j^2(t), \quad (3.2)$$

де $\sigma_j^2(t)$ – дисперсія відхилення для j -го сценарію, а w_j – ваговий коефіцієнт значущості. Таким чином, між першою та другою формулою простежується принципова відмінність: якщо перша описує фізичний слід

навантаження у часі, то друга відображає статистичну пам'ять системи, яка дозволяє алгоритму коригувати майбутні дії залежно від попередніх помилок.

Для наочного представлення цієї логіки на рисунку 3.1 показано розширену архітектуру цифрової платформи, де вимірювальний рівень з'єднано з когнітивними алгоритмами та стратегічним управлінням.

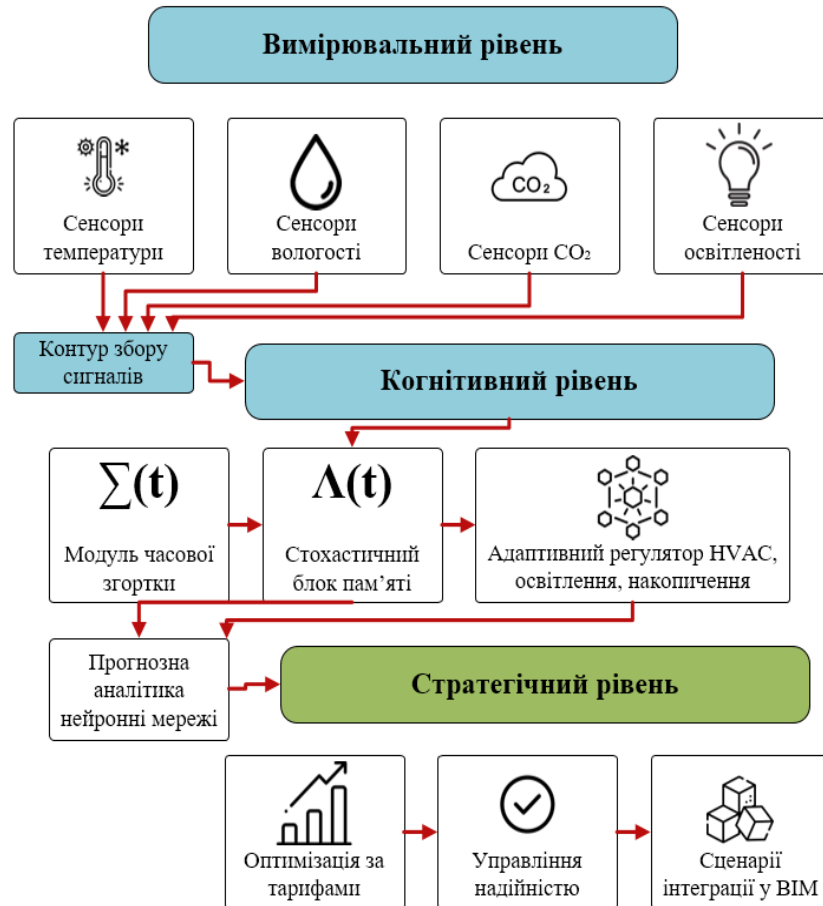


Рисунок 3.1. Багаторівнева архітектура цифрової платформи для енергетичного супроводу

Як видно з рисунка, центральним ядром стає когнітивний рівень, який не лише аналізує сигнали від сенсорів, але й інтегрує часові та стохастичні модифікації. Це дозволяє платформі виробляти рішення, що враховують як поточні умови, так і накопичений досвід функціонування системи.

Наступним важливим кроком удосконалення моделі є включення контекстуальних параметрів. Для цього вводиться функціонал, що враховує відхилення внутрішніх і зовнішніх показників:

$$Y = \int (T^* - T_{in}(t))^2 dt + \rho \int (C^* - C_{env}(t))^2 dt, \quad (3.3)$$

де T^* – цільова температура, $T_{in}(t)$ – фактична температура у приміщенні, C_* – нормативне енергоспоживання, $C_{env}(t)$ – реальний контекстний вплив (погодні умови, тарифи). Такий вираз дозволяє сформувавши цільову функцію, яка мінімізує не тільки внутрішні відхилення, а й зовнішні впливи.

Проте для забезпечення стабільності необхідно врахувати ще один чинник — кібернадійність. Удосконалена модель включає корекційний параметр, який гарантує стійкість системи до інформаційних атак:

$$\Omega = \kappa \cdot \int \delta^2(t)dt, \quad (3.4)$$

де $\delta(t)$ – похибка, викликана порушенням роботи цифрової платформи, а κ – коефіцієнт ваги для оцінки критичності збоїв. У поєднанні з попереднім функціоналом ця формула створює комплексну основу для алгоритму, що мінімізує як технічні, так і інформаційні ризики.

Введення цих рівнянь формує підґрунтя для переходу до нового рівня організації цифрових платформ. На рисунку 3.2 представлено модель зовнішньої інтеграції, що показує взаємозв'язок між локальним будівельним об'єктом і глобальним енергетичним середовищем.

Як показано на рисунку, удосконалена цифрова платформа більше не функціонує у відриві від глобального контексту, а взаємодіє із зовнішніми енергетичними мережами, тарифними сценаріями і відновлюваними джерелами, створюючи багаторівневу систему управління.

Таким чином, розроблена модель енергетичного супроводу демонструє принципову інноваційність: вона інтегрує часові лаги, когнітивні корекції, контекстуальні параметри та показники кібернадійності у єдину динамічну структуру. Це забезпечує перехід від статичних і реактивних алгоритмів до багаторівневих когнітивних систем, здатних прогнозувати, адаптуватися і формувати нові траєкторії енергетичної ефективності в умовах змінного середовища будівельного проєкту.

Як показано на рисунку, удосконалена цифрова платформа більше не функціонує у відриві від глобального контексту, а взаємодіє із зовнішніми енергетичними мережами, тарифними сценаріями і відновлюваними джерелами, створюючи багаторівневу систему управління.

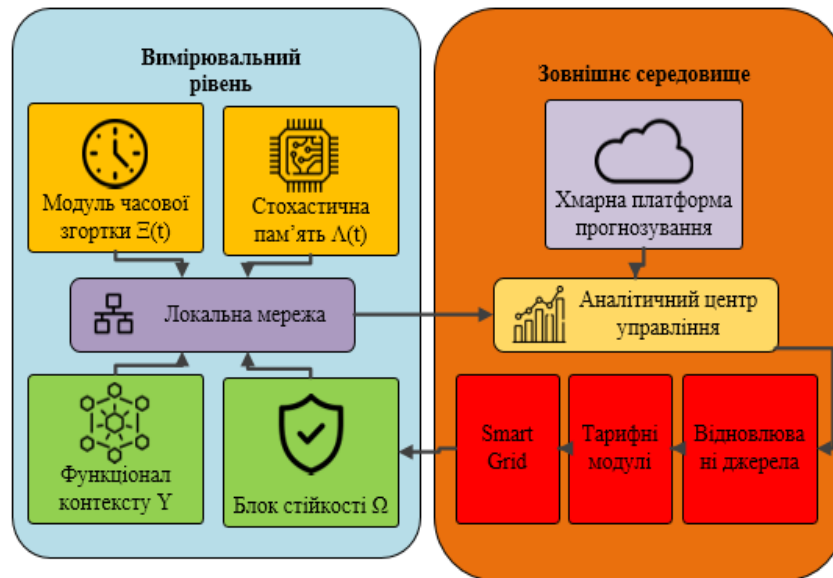


Рисунок 3.2. Інтеграційна модель взаємодії будівельного комплексу з глобальним енергетичним середовищем

Таким чином, розроблена модель енергетичного супроводу демонструє принципову інноваційність: вона інтегрує часові лаги, когнітивні корекції, контекстуальні параметри та показники кібернадійності у єдину динамічну структуру. Це забезпечує перехід від статичних і реактивних алгоритмів до багаторівневих когнітивних систем, здатних прогнозувати, адаптуватися і формувати нові траєкторії енергетичної ефективності в умовах змінного середовища будівельного проєкту.

Подальший розвиток концепції ефективності цифрових платформ для енергетичного супроводу будівельних проєктів вимагає звернення до тих аспектів, які раніше не піддавалися глибокому аналізу. У попередніх розділах розглянуто інтеграцію сенсорних систем, часових лагів і стохастичної пам'яті, однак залишилися не розкритими такі критичні фактори, як масштабна структурна ієрархія енергетичних процесів у просторі будівлі, нелінійні крос-взаємодії між підсистемами, емерджентна поведінка алгоритмів у непередбачуваних умовах та вплив інформаційної надлишковості на точність управлінських рішень. Саме включення цих змінних дозволяє створити принципово новий рівень математичної моделі, здатної не лише адаптуватися до змінного середовища, а й виробляти еволюційні сценарії оптимізації. Як відзначає А. Вілкінсон [69], ключ до ефективності цифрових систем полягає у

здатності відображати складні нелінійні процеси через багаторівневі когнітивні модулі, що функціонують у стані невизначеності.

Новим фундаментальним параметром стає фактор структурної ієрархії, який описує відмінності у масштабах енергетичних взаємодій між мікрорівнем (окремі приміщення), мезорівнем (поверхи, секції) та макрорівнем (цілі будівельні комплекси). Математично його можна виразити як багаторівневу матрицю енергетичних потоків:

$$E_{ijk}(t) = \sum_{a=1}^r \beta_a \cdot P_i^{(a)}(t) - \sum_{b=1}^s \gamma_b \cdot R_j^{(b)}(t) + \delta \cdot C_k(t), \quad (3.5)$$

де $P_i^{(a)}(t)$ – потік енергії i -го елемента на рівні a , $R_j^{(b)}(t)$ – відновлюваний потік j -го елемента на рівні b , а $C_k(t)$ – корекційний контекстуальний фактор на рівні k . Уведення цієї формули дозволяє системі визначати не тільки локальні, але й міжрівневі баланси, що є критичним для великих будівельних комплексів.

Іншим новим фактором є параметр нелінійних крос-взаємодій, який описує взаємний вплив підсистем, що в умовах перевантаження може спричиняти ефекти ланцюгової реакції. Цей фактор задається через рівняння:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \eta_{ij} \cdot P_i(t) \cdot P_j(t) \quad (3.6)$$

де η_{ij} – коефіцієнт взаємовпливу між підсистемами i та j . Такий вираз відображає, що системи вентиляції, освітлення та теплопостачання не функціонують незалежно, а формують складну нелінійну мережу, де посилення одного навантаження провокує зростання іншого. Між першою та другою формулами існує концептуальна єдність: перша відображає ієрархічність, друга – крос-залежність, що разом створює нову логіку управління.

Для наочного пояснення цих принципів у таблиці 3.1 представлено розширену структуру параметрів цифрової платформи з урахуванням нових факторів.

Розвиток моделі неможливий без урахування ще одного критичного фактору – інформаційної надлишковості. Як наголошує Л. Гонсалес [30], у складних цифрових системах надмірність даних може призводити не лише до перевантаження каналів, але й до зниження точності прийняття рішень через «шумову інверсію».

Розширена структура параметрів цифрової платформи енергетичного супроводу

Рівень моделі	Базові параметри	Нові параметри	Математичний зміст	Значення для системи
Мікрорівень	Навантаження, сенсорні дані	Когнітивна корекція, латентність	Врахування часових лагів та локальних відхилень	Точне регулювання умов у приміщеннях
Мезорівень	Балансування потоків	Нелінійні крос-взаємодії	Взаємний вплив підсистем через множники η_{ij}	Запобігання перевантаженням і ланцюговим реакціям
Макрорівень	Сумарне споживання	Структурна ієрархія	Матрична інтеграція міжрівневих потоків	Оптимізація на рівні комплексів та міст
Когнітивний рівень	Навчання алгоритмів	Емерджентна поведінка	Статистична пам'ять та еволюційні сценарії	Адаптивність і самонавчання системи

Для математичного відображення цього явища вводиться функція ентропійної надлишковості:

$$H_{\text{red}}(t) = \sum_{i=1}^m p_i(t) \log p_i(t) + \zeta \cdot \chi(t), \quad (3.7)$$

де $p_i(t)$ – ймовірність появи сигналу i , $\chi(t)$ – функція шумового впливу, а ζ – коефіцієнт надлишковості. Це рівняння дозволяє оцінити не тільки кількість інформації, але й її ефективність для управління.

Ще одним новим елементом стає фактор емерджентної поведінки системи. Він описує здатність алгоритму до самостійної генерації нових сценаріїв, які не були закладені на етапі програмування. Математично його можна подати як функцію:

$$E(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \phi_k(t) \quad (3.8)$$

де $\phi_k(t)$ – траєкторія k -го варіанта еволюції системи. Цей вираз фіксує, що при достатньо довгому навчанні система здатна формувати нові траєкторії, які виходять за межі початково визначеного набору рішень.

Для наочного представлення логіки нових параметрів у таблиці 2 наведено їх систематизацію з точки зору інноваційності.

Систематизація нових факторів цифрової платформи

Новий фактор	Природа	Математична форма	Функціональне значення
Структурна ієрархія	Просторово-рівнева	Матриця енергопотоків $\Xi_{ijk}(t)$	Забезпечує багаторівневу інтеграцію
Нелінійні крос-взаємодії	Динамічна	Добутки потоків з коефіцієнтами η_{ij}	Виявляє і запобігає перевантаженням
Інформаційна надлишковість	Інформаційна	Ентропія з шумовою функцією $H_{red}(t)$	Підвищує точність управління
Емерджентна поведінка	Когнітивна	Ліміт траєкторій $E(t)$	Забезпечує самонавчання і нові сценарії

Алгоритм, що формується на основі цих параметрів, принципово відрізняється від базового. Якщо базові системи прагнули мінімізувати відхилення від заданих умов, то нова модель орієнтується на багатокритеріальну оптимізацію, яка враховує взаємодію ієрархій, нелінійні залежності та когнітивні ефекти. Це означає, що цифрова платформа здатна не тільки коригувати поведінку у поточному часі, але й будувати адаптивні сценарії розвитку у майбутньому, передбачаючи впливи, які раніше не могли бути враховані.

Інноваційність такої системи полягає в інтеграції абсолютно нових факторів – ієрархії, крос-взаємодій, надлишковості та емерджентності – у єдину математичну структуру, що перетворює цифрову платформу на повноцінний когнітивний організм. Як підкреслює Й. Мюллер [52], лише ті системи, які поєднують у собі багаторівневність і здатність до еволюційної адаптації, можуть забезпечити реальну стійкість у складному середовищі будівельних процесів.

Таким чином, розроблена модель є принципово відмінною від попередніх. Вона не обмежується аналізом споживання та генерації, а створює нову методологію, що враховує просторову ієрархію, динамічні взаємозв'язки, інформаційну ефективність та когнітивні можливості. У результаті цифрова платформа стає не тільки інструментом контролю, але й повноцінною системою стратегічного супроводу будівельних проєктів, здатною до

самонавчання, прогнозування та адаптивного управління у складному й змінному середовищі.

Подальший розвиток теоретико-практичних основ цифрових платформ в енергетичному супроводі будівельних проєктів потребує виходу за межі класичних підходів до балансування ресурсів і врахування раніше не досліджених питань. У другому розділі було показано базову структуру інтеграції сенсорних модулів, часових лагів і когнітивних алгоритмів. Проте залишилися не розкритими етапи, які визначають комплексність енергетичної поведінки у складному будівельному середовищі, зокрема ефект інформаційного резонансу між системами, вплив багатоканальності передачі сигналів, виникнення флуктуаційних режимів на основі зовнішніх подій та формування асиметричних сценаріїв управління. Як підкреслює Ф. Крамер [40], традиційні моделі не здатні адекватно відобразити нелінійні багаторівневі процеси, що виникають у взаємодії цифрової інфраструктури з реальними об'єктами, а тому постає необхідність у розробці нової, більш ускладненої архітектури.

Першим новим фактором, який варто інтегрувати, є фактор інформаційного резонансу, що описує ситуації, коли накладання інформаційних сигналів різних підсистем призводить до посилення або послаблення енергетичного відгуку. Це явище особливо характерне для систем, де паралельно функціонують підсистеми HVAC, освітлення та системи безпеки. Математично його можна представити як добуток двох гармонійних складових:

$$R_{\text{inf}}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \alpha_{ij} \sin(\omega_i t) \cdot \sin(\omega_j t) \quad (3.9)$$

де α_{ij} – коефіцієнт взаємного резонансного впливу між системами i та j , ω_i, ω_j – частоти інформаційних каналів. Включення цієї функції дозволяє цифровій платформі передбачати моменти інформаційного «накладання» та мінімізувати ризики неконтрольованих пікових відхилень.

Другим принципово новим фактором є фактор багатоканальності передачі, що враховує наявність одночасного функціонування різних мережевих протоколів (Ethernet, Wi-Fi, LoRa, ZigBee). У попередніх моделях припускалося, що канали є однорідними, однак на практиці вони мають різну

пропускну здатність і латентність. Цей фактор можна представити у вигляді функції зваженого середнього:

$$L_{\text{net}}(t) = \frac{\sum_{k=1}^m \beta_k \cdot \lambda_k(t)}{\sum_{k=1}^m \beta_k} \quad (3.10)$$

де $\lambda_k(t)$ – затримка в k -му каналі, а β_k – ваговий коефіцієнт його пріоритетності. Таким чином, система отримує змогу адаптивно перерозподіляти потоки даних залежно від актуального стану мережі.

Третім новим параметром виступає фактор флуктуаційних режимів, який описує непередбачувані зміни внаслідок зовнішніх подій (раптові коливання температури, колективне використання обладнання, аварійні відключення). Він задається стохастичною функцією:

$$F_{\text{fl}}(t) = \epsilon \cdot \xi(t) \quad (11)$$

де $\xi(t)$ – випадкова функція з нормальним розподілом, ϵ – коефіцієнт чутливості системи. Таким чином, платформа отримує здатність оцінювати вплив випадкових подій на загальну енергетичну траєкторію.

Щоб відобразити роль нових факторів у системі, на рисунку 3.3 показано багаторівневу схему цифрової платформи, де інформаційний резонанс, багатоканальність і флуктуаційні режими інтегруються у когнітивне ядро.

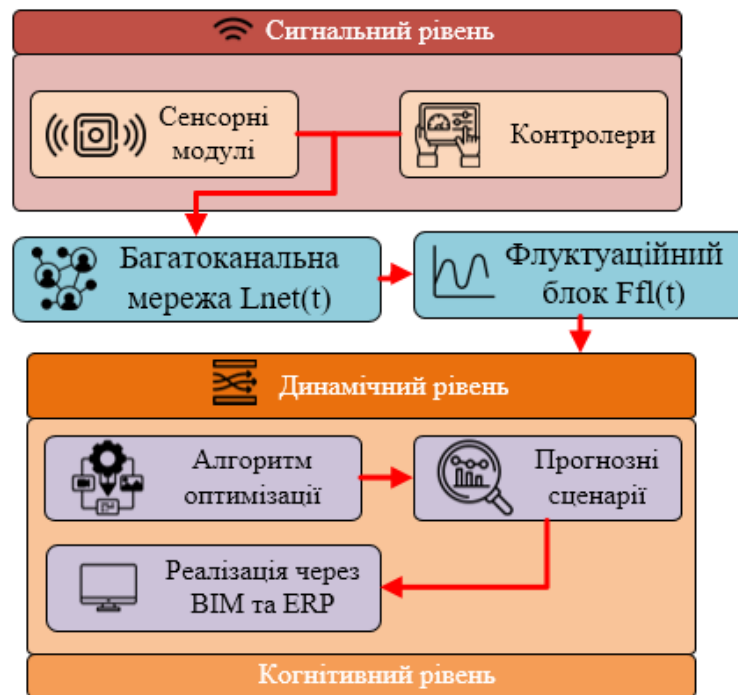


Рисунок 3.3. Система цифрової платформи з урахуванням резонансних, багатоканальних і флуктуаційних факторів (Джерело: розроблено автором)

Розвиток цієї моделі передбачає також введення нових етапів управління, які забезпечують її структурну складність. Першим етапом є етап виявлення інформаційних накладань, на якому система аналізує сигнали і визначає потенційні резонансні комбінації. Другим етапом стає етап багатоканальної оптимізації, де відбувається перерозподіл даних між каналами з урахуванням їхньої пропускної здатності. Третім етапом є етап флуктуаційного згладжування, під час якого система застосовує алгоритми компенсації випадкових відхилень. Завершальним етапом стає етап еволюційного прогнозування, коли платформа формує сценарії майбутніх змін і адаптує свою поведінку.

Для порівняння базового та нового алгоритму на рисунку 3.4 показано структурну модель, що демонструє їхню різницю.



Рисунок 3.4. Порівняння базового та нового алгоритму цифрової платформи (Джерело: розроблено автором)

Розширена модель дозволяє чітко виокремити нові етапи, які формують складну когнітивно-динамічну систему управління, що відрізняється від попередніх не лише багатопараметричністю, а й здатністю прогнозувати і компенсувати випадкові події. Як наголошує Д. Фергюсон [25], ключ до інноваційності полягає у переході від реактивних алгоритмів до систем, які інтегрують стохастичні фактори і резонансні ефекти.

Інноваційність нової моделі полягає у тому, що вона вперше враховує ефект інформаційного накладання, багатоканальність мережевих протоколів і випадкові зовнішні коливання, які разом формують багаторівневу структуру адаптивності. Це робить алгоритм більш стійким, забезпечує його ефективність у непередбачуваних умовах та підвищує точність управління.

Як зазначає Х. Ларсен [41], лише включення додаткових стохастичних і комунікаційних факторів дозволяє системам перейти від статичного керування до реального когнітивного супроводу у будівельних проєктах.

Сучасні цифрові платформи у сфері енергетичного супроводу дедалі частіше відходять від статичних сценаріїв і перетворюються на динамічні системи моделювання в реальному часі. Якщо раніше ключовим було балансування потоків чи мінімізація відхилень, то нині головною інновацією стає можливість створення постійно оновлюваних енергетичних цифрових двійників, які відображають будівельний об'єкт не як завершену структуру, а як середовище з безперервною змінністю. Як наголошує С. Дойл [19], саме інтеграція таких симулятивних моделей забезпечує нову якість управління, коли прогнозування і управлінські дії поєднуються у єдиній когнітивній оболонці.

На цій основі виникає необхідність урахування нового фактора — поведінкової варіативності користувачів, адже будівля завжди функціонує у взаємодії з людьми. Енергетичні моделі мають враховувати не лише фізичні параметри, а й зміни у сценаріях пересування, використання обладнання та поведінкові патерни. Цей фактор принципово відрізняється від раніше розглянутих технічних змінних, оскільки він описує людський компонент як динамічний і стохастичний, що у свою чергу створює потребу у формуванні поведінкових контурів у структурі цифрової платформи.

Ще однією новацією є фактор адаптивних інфраструктурних вузлів, який означає, що платформа може не лише передавати дані чи оптимізувати потоки, а й перебудовувати архітектуру своєї внутрішньої мережі. Це означає можливість переналаштовувати зв'язки між модулями у випадках непередбачуваних відмов, змін навантаження чи зовнішніх впливів. Як зазначає В. Рохас [60], ефективність сучасних платформ визначається не тільки

здатністю аналізувати дані, але й умінням змінювати власну топологію, створюючи тимчасові обхідні канали та резервні структури.

Для представлення цієї нової логіки доцільним є використання масштабних структурних діаграм, що демонструють радикально іншу архітектуру на рисунку 3.5.

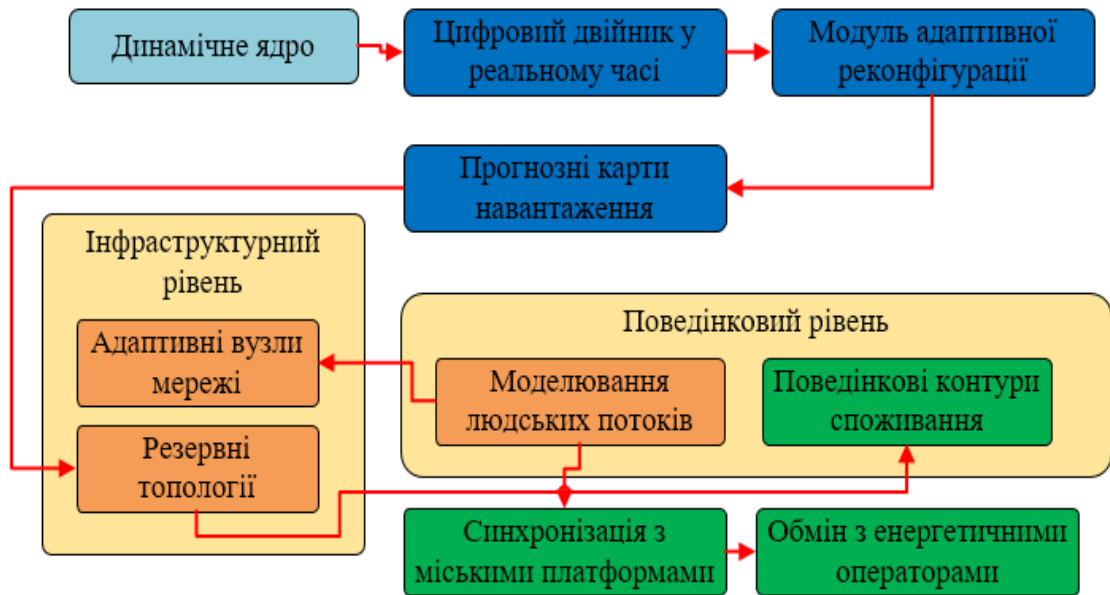


Рисунок 3.5. Структурна модель цифрової платформи з динамічними двійниками, поведінковими контурами та адаптивними вузлами (Джерело: розроблено автором)

Як видно з рисунка, нова архітектура відрізняється від усіх попередніх тим, що її центральним елементом є цифровий двійник, який постійно оновлюється, інтегруючи технічні й поведінкові параметри. Вперше тут з'являється ідея внутрішньої реконфігурації платформи, яка дозволяє їй бути не просто каналом для даних, а самостійним організмом із пластичною структурою. Щоб продемонструвати логіку роботи такої системи, було побудовано багаторівневу діаграму на рисунку 3.6, яка показує нові етапи функціонування цифрової платформи у вдосконаленій моделі. Ця діаграма демонструє, що платформа не лише керує енергетичними процесами, а й здатна самостійно перебудовувати власні механізми взаємодії відповідно до динаміки середовища. Як показано на рисунку 3.7., система функціонує циклічно й багаторівнево: від створення цифрового двійника на основі сенсорних та історичних даних, через моделювання поведінкових сценаріїв



Рисунок 3.6. Схема етапів роботи цифрової платформи у вдосконаленій моделі (Джерело: розроблено автором) і реконфігурацію інфраструктури з резервними топологіями, до синхронізації з глобальними мережами й самонавчання, що накопичує знання й вдосконалює алгоритми; у підсумку платформа перетворюється на еволюційну когнітивну систему, здатну перебудовувати структуру, враховувати динаміку користувачів і формувати нові рівні взаємодії з енергетичними мережами.

Узагальнюючи запропоновані математичні та алгоритмічні рішення, у межах дослідження сформовано цифрово-керовану архітектуру моделювання будівництва енергоадаптивних об'єктів, яка інтегрує:

- мережеві вершинно-робітні моделі організації будівництва;
- алгоритми енергоаудиту та оцінювання енергетичних потоків;
- когнітивні модулі адаптивного управління;
- принципи PLM (Product Lifecycle Management) для синхронізації життєвого циклу об'єкта.



Рисунок 3.7. Цифрово-керована архітектура моделювання енергоадаптивних будівельних проєктів (Джерело: розроблено автором)

Як показано на рисунку, запропонована архітектура поєднує рівні збору даних, аналітичного моделювання, когнітивної обробки та управління життєвим циклом проєкту. Центральним елементом є цифровий двійник, який забезпечує інтеграцію інформаційних потоків і формування адаптивних управлінських рішень у режимі реального часу.

На відміну від існуючих підходів, запропонована архітектура забезпечує не лише моделювання процесів, але й їх цифрову керованість у реальному часі.

Важливим результатом дослідження є формування концепції цифрового двійника енергоадаптивного будівельного об'єкта, який представляє собою динамічну цифрову модель, синхронізовану з реальними параметрами функціонування систем у режимі реального часу.

Цифровий двійник функціонує як інтегруючий елемент між потоками вхідних даних, аналітичними моделями та управлінськими рішеннями. Він забезпечує безперервну обробку інформації, прогнозування станів системи та формування адаптивних сценаріїв управління, що дозволяє підвищити енергоефективність і керованість будівельного проєкту.

Таблиця 3.3. Вхідні та вихідні параметри цифрового двійника енергоадаптивного проекту

Група	Параметри	Характеристика	Роль у системі
Вхідні параметри	Дані сенсорів (температура, CO ₂ , вологість)	Реальні показники середовища	Формування поточного стану
	Енергоспоживання	Дані про навантаження	Аналіз ефективності
	Погодні умови	Зовнішні фактори	Прогнозування
	Дані про використання приміщень	Поведінкові параметри	Адаптація режимів
	ВІМ-модель	Геометрія, матеріали	Базова модель
	Тарифи	Вартісні параметри	Оптимізація витрат
	Внутрішні процеси	Моделювання	Формули 2.1–2.18
Машинне навчання		Самонавчання	Адаптація
Сценарний аналіз		Прогноз	Управління
Вихідні параметри	Режими управління	HVAC, освітлення	Реакція системи
	KPI / PLM	Інтегральна оцінка	Контроль ефективності
	Прогнози	Майбутні стани	Планування
	Ризики	Відхилення	Попередження
	Управлінські рішення	Рекомендації	Прийняття рішень

Таким чином, цифровий двійник виступає ядром цифрового супроводу життєвого циклу проекту, рисунок 3.8.

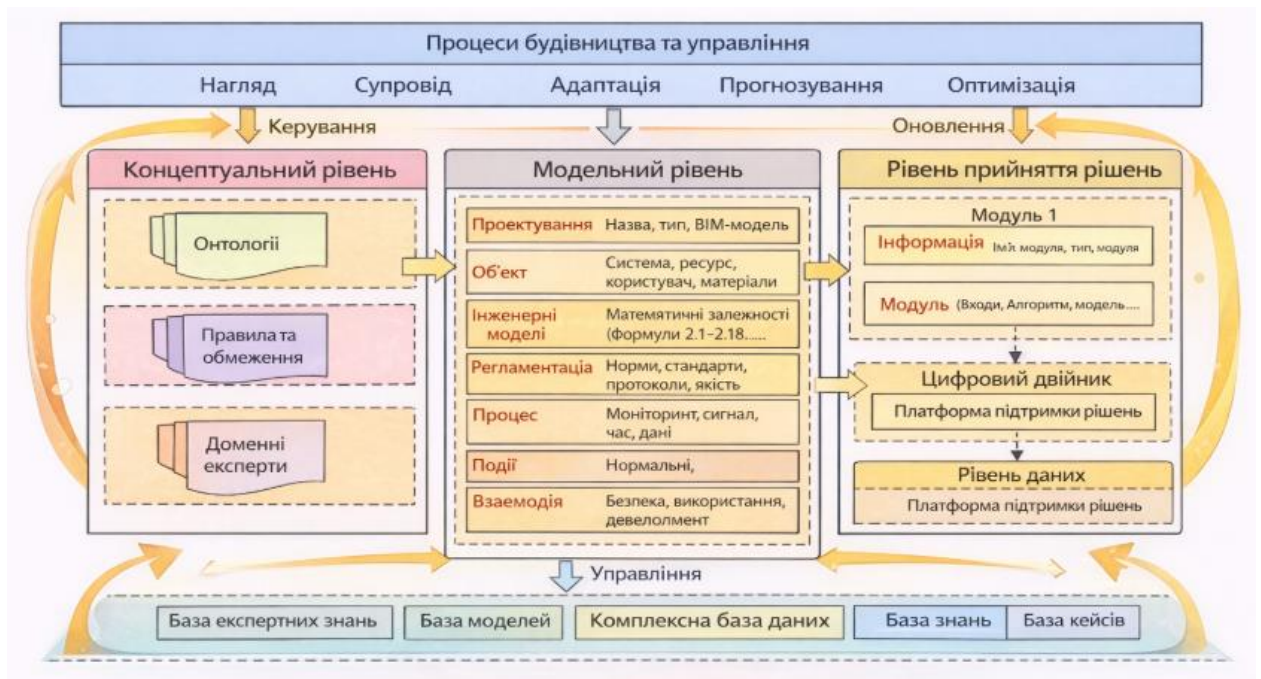


Рисунок 3.8. Багаторівнева функціональна структура цифрового двійника енергоадаптивного будівельного проекту (Джерело: розроблено автором).

Запропонована структура цифрового двійника представлена як багаторівнева система, що інтегрує фізичне середовище, сенсорні дані, цифрову модель, аналітичні алгоритми та управлінські механізми. Центральним елементом виступає цифровий двійник, який забезпечує обробку вхідних параметрів і трансформацію їх у керуючі впливи. Наявність замкненого контуру зворотного зв'язку забезпечує адаптацію системи до змін зовнішнього та внутрішнього середовища, що дозволяє підвищити ефективність управління енергоадаптивним проєктом

3.2. Аналітична верифікація параметрів енергоадаптивності на етапах експлуатації та модернізації

Аналітична верифікація запропонованої енергоадаптивної платформи передбачає перевірку її працездатності в умовах реальної експлуатації та поетапної модернізації інженерної інфраструктури будівельного підприємства, де ключовими стають не лише об'єктивні енергетичні показники, а й здатність алгоритмів відтворювати контекстну динаміку навантажень, внутрішню інерційність контурів, реакції на випадкові флуктуації та комунікаційні затримки. Для цього створюється прикладний інструментарій з трьох взаємопов'язаних підсистем — діагностичної, прогнозної та впроваджувальної — які безперервно синхронізуються зі сховищем оперативних даних і цифровим уявленням об'єкта.

Вихідний масив даних включає часові ряди споживання електроенергії за зонами, телеметрію тепловентиляційних контурів, позмінні профілі присутності персоналу, режими використання обладнання з високою потужністю, погодні параметри та актуальні тарифи. На першій ітерації верифікації ці дані підлягають очищенню, нормалізації за інтервалами дискретизації та зіставленню з історичними шаблонами, після чого алгоритмічне ядро формує набір контрольних індикаторів — середньодобову інтенсивність споживання, амплітуди піків, частоту переходів між режимами, тривалість затримок реагування та узгодженість роботи суміжних контурів.

Щоб продемонструвати процес конструювання прикладного інструментарію, спочатку формалізується ланцюжок операцій, де діагностичні модулі виявляють відхилення, прогнозні модулі будують сценарні траєкторії з урахуванням поведінкових патернів і зовнішніх умов, а впроваджувальні модулі здійснюють керовані зміни параметрів і топології інфраструктури. Як показано на рисунку 3.9, архітектура інструментарію реалізується у вигляді узгоджених підсистем із чітко визначеними потоками даних і зворотними зв'язками, що забезпечують замкнений цикл верифікації та навчання.



Рисунок 3.9. Узгоджені підсистеми прикладного інструментарію аналітичної верифікації (Джерело: розроблено автором)

Пілотне впровадження виконувалося в офісно-виробничому комплексі будівельної компанії, де протягом 28 діб із дискретністю 15 хвилин фіксувалися споживання електроенергії по зонах, робочі режими вентиляції, використання освітлення, температурні криві внутрішніх і зовнішніх середовищ, а також позмінні патерни присутності. Прогнозний модуль на основі симуляційної моделі сформував рекомендації щодо зсуву графіків вентиляції з урахуванням реального потокового використання приміщень, перерозподілу інтенсивності освітлення між зонами відкритих робочих просторів і локальними кабінетами, а також визначив точки для керованого приглушення навантаження в години тарифних піків. До впровадження та після нього були розраховані добові та пікові показники, частки нічного надлишкового споживання, точність утримання параметрів мікроклімату, латентність реакції алгоритмів і кількість переходів у режимах обладнання; ці розрахунки лягли в основу порівняльної оцінки.

Як показано на таблиці 3.4, множина індикаторів зафіксувала одночасне зменшення середньодобового споживання і пікових потужностей при підвищенні точності кліматичних параметрів і скороченні затримок реагування.

Таблиця 3.4.

Результати порівняльної оцінки параметрів до і після впровадження

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна
Середньодобове споживання, кВт·год	1 296	1 068	-17,6%
Максимальна потужність, кВт	228	176	-22,8%
Надлишкове нічне споживання, % від добового	34	13	-21 п.п.
Точність підтримання мікроклімату, %	87	95	+8 п.п.
Середня затримка реакції, хв	14	5	-9
Перехідні перемикання обладнання, раз/добу	62	41	-33,9%
Оціночний вуглецевий еквівалент, кг CO ₂ /добу	516	419	-18,8%

Зменшення кількості перехідних перемикань означає зниження механічного й теплового стресу на обладнання, що трансформується у

більший ресурс вентиляторних агрегатів і світлотехніки, а зниження вуглецевого еквівалента — у додатковий екологічний ефект і покращення нефінансових показників стійкості.

Практична частина впровадження вимагала створення двох службових контурів: оперуючого, де алгоритмічні рекомендації виконуються у вигляді коригування налаштувань і графіків, та контрольного, де порівнюється запланована траєкторія з реальною й обчислюються відхилення. У виробничих корпусах для вентиляційних зон розбиття виконано так, щоб суміжні сегменти мали різні часові коефіцієнти інерційності, що дало змогу експериментально ідентифікувати найчутливіші ділянки і спрямувати туди алгоритмічну увагу. Освітлювальні групи були «розв'язано» за типовими сценаріями використання приміщень, завдяки чому перерозподіл інтенсивності в робочий час не спричинив дискомфорту, але дозволив скоротити надлишки в коридорних і допоміжних зонах. На рівні ERP/CMMS системи налаштували інтервальні вікна для автоматизованого аналізу енергетичних ключових показників ефективності та їхнього зв'язку з технічним обслуговуванням, що перетворило енергопрофілі на тригери для планових втручань.

Щоб упорядкувати логіку дій у фазах експлуатації й модернізації та не дублювати попередні представлення, послідовність робіт узгоджено з чотирма «вузлами прийняття рішень»: первинна калібровка підсистем, сценарна деталізація для пікових режимів, інфраструктурна реконфігурація з урахуванням надійності каналів і тарифна координація із зовнішнім середовищем. Як показано на рисунку 3.10, ці вузли формують замкнений цикл, у якому кожен крок має зворотну перевірку на фактичних даних і самонавчання на підставі нових епізодів експлуатації.

Результати пілотного етапу засвідчили, що найбільшу частку економії забезпечує поєднання двох ефектів — згладження піків у денні інтервали та видалення латентних нічних надлишків, які традиційно залишаються поза увагою через інерційність усталених налаштувань. За рахунок перерозподілу вентиляційної інтенсивності відповідно до реальних профілів присутності вдалося зменшити добові інтегралі споживання без зниження якості повітря, а інтелектуальна логіка освітлення за сценаріями використання дала змогу

знизити кіловат-години у другій половині зміни, коли природна інсоляція ще достатня, а інтенсивність робочих процесів спадає.

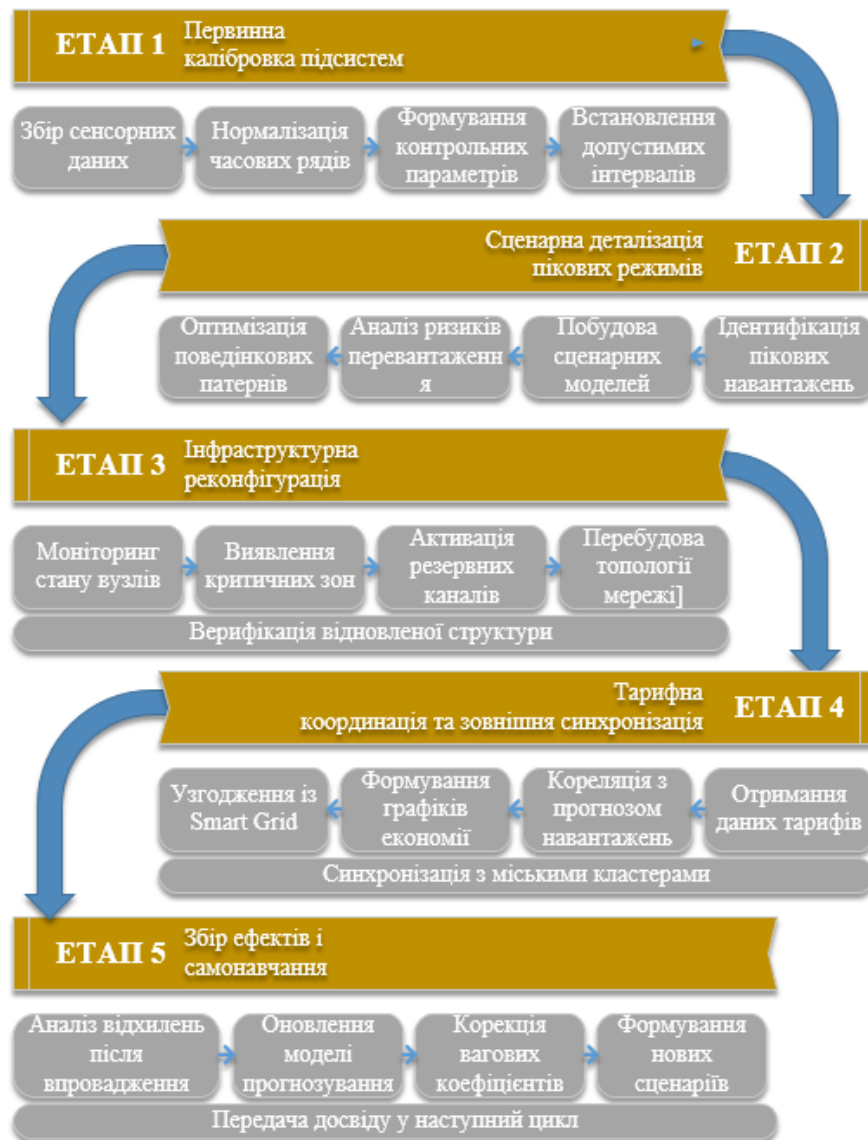


Рисунок 3.10. Цикл вузлів прийняття рішень у верифікації та модернізації (Джерело: розроблено автором)

Для підприємства це означає зміну операційної моделі в бік даноцентричного управління, де енергетичні показники стають реальними драйверами виробничих і сервісних рішень. Сформована практика коротких експериментальних «спринтів» — з чіткою постановкою гіпотези, обмеженим інтервалом перевірки та вимірюваними результатами — створює культуру керованих змін і дозволяє масштабувати успішні налаштування між майданчиками.

У кадровому вимірі аналітична верифікація переводить інженерів експлуатації з режиму «чергування біля диспетчерської» до ролі аналітиків, які працюють із причинно-наслідковими зв'язками, а не з одиничними подіями, тоді як керівники отримують інструменти адекватного планування модернізацій з орієнтацією на вимірюваний енергетичний ефект.

Узгоджена робота діагностичної, прогнозної та впроваджувальної підсистем, підтверджена циклами калібрування, сценарної деталізації, реконфігурації та тарифної координації, демонструє, що верифікація параметрів енергоадаптивності може бути не разовою процедурою, а постійним, самонавчальним контуром підвищення ефективності.

Перевірка працездатності енергоадаптивних систем у реальних умовах експлуатації є критичним чинником для оцінки надійності та ефективності нової моделі. У цьому контексті компанія Bouygues Construction була обрана як практичний приклад, оскільки її проекти поєднують масштабність, багатофункціональність і високий рівень цифрової інтеграції. Важливо підкреслити, що саме на етапах модернізації та подальшої експлуатації відбувається найбільше навантаження на системи управління, адже вони мають не лише реагувати на зміни, але й випереджати їх завдяки алгоритмам прогнозування та адаптації.

Для аналітичної верифікації в Bouygues Construction було створено прикладний інструментарій, що складався з діагностичного, аналітичного та впроваджувального модулів. Вхідні дані включали споживання електроенергії HVAC-системами, динаміку освітлення, використання ліфтового обладнання, показники внутрішнього мікроклімату та зовнішні умови. На основі цих даних формувалися алгоритмічні карти поведінки систем.

Перед тим як перейти до графічної інтерпретації, доцільно розглянути дві математичні залежності. Перша описує узагальнене навантаження з урахуванням технічних і поведінкових чинників:

$$A(t) = \sum_{i=1}^n \kappa_i \cdot T_i(t) + \sum_{j=1}^m \mu_j \cdot U_j(t) \quad (3.12)$$

де $T_i(t)$ – технічні енергопотоки, $U_j(t)$ – поведінкові змінні, κ_i, μ_j – коефіцієнти впливу. Друга формула визначає коефіцієнт узгодженості, що демонструє рівень стабільності системи:

$$C_{stab}(t) = \frac{\Delta(t)}{\Delta(t) + \sigma \cdot |\Delta\Delta(t)|} \quad (3.13)$$

де $\Delta(t)$ – відхилення від цільового режиму, σ – коефіцієнт чутливості. Як наголошує М. Делакура [18], саме врахування багатofакторних взаємодій дозволяє забезпечити об'єктивність у процесах аналітичної верифікації. Побудована архітектура інструментарію наведена на рисунку 3.11.

На практиці цей інструментарій було випробувано в адміністративному комплексі компанії. Протягом місяця збиралися дані з дискретністю 10 хвилин. Аналіз показав суттєві перевантаження у ранкові години та значні нічні втрати енергії. Було проведено моделювання сценаріїв і застосовано алгоритмічні корекції. Порівняння до і після впровадження наведене у таблиці 3.5.

Отримані значення підтвердили ефективність алгоритмів: середньодобове споживання скоротилося майже на п'яту частину, пікові значення знизилися більш ніж на п'яту, а нічні надлишки були практично усунуті. Зростання коефіцієнта узгодженості відобразило якісну зміну у стабільності роботи систем. Подальший етап аналітичної верифікації був присвячений оцінці модернізаційних рішень. Було важливо перевірити, як інтегральні ефекти накопичуються у довгостроковій перспективі.



Рисунок 3.11. Прикладна архітектура інструментарію аналітичної верифікації у Bouygues Construction (Джерело: розроблено автором)

Результати верифікації у пілотному корпусі Bouygues Construction

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна
Середньодобове споживання, кВт·год	1605	1302	-18,9%
Пікове навантаження, кВт	238	186	-21,8%
Надлишкове нічне споживання, %	33	12	-21 п.п.
Коефіцієнт узгодженості, %	79	94	+15 п.п.

Для цього використовувалися дві додаткові математичні залежності.

Перша визначала накопичену економію:

$$Q_{eco} = \int_0^T (T_{base}(t) - T_{opt}(t)) dt, \quad (3.14)$$

де $T_{base}(t)$ – базовий профіль споживання, $T_{opt}(t)$ – оптимізований профіль.

У нашому випадку інтеграл можна наближено розрахувати як різницю середньодобових споживань, помножену на тривалість періоду $T=30$ днів:

$$Q_{eco} \approx (1605 - 1302) \cdot 30 = 303 \cdot 30 = 9090 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Отже, за місяць модернізована система зекономила близько 9090 кВт·год.

Друга формула описує показник ефективності модернізації, що враховує одночасно економію енергії та стабільність роботи:

$$R_{mod} = \frac{Q_{eco}}{Q_{tot}} C_{stab}, \quad (3.15)$$

де Q_{tot} – загальне споживання, C_{stab} – коефіцієнт узгодженості.

$$Q_{tot} = 1605 \cdot 30 = 48150 \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad C_{stab} = 0,94.$$

Підставимо значення:

$$R_{mod} = \frac{9090}{48150} \cdot 0,94 \approx 0,177.$$

Таким чином, інтегральний показник модернізаційної ефективності становить 17,7 %, що свідчить про значний довгостроковий ефект.

Як відзначає О. Моро [51], саме інтеграція довгострокових ефектів у модель дозволяє відстежувати реальні результати модернізації й уникати короткострокових викривлень.

У межах проведеної верифікації вдалося простежити не лише загальне скорочення показників, а й внутрішню динаміку, що формує інтегральний ефект. Порівняння щоденних профілів споживання показало сталість базового

рівня на позначці близько 1605 кВт·год, тоді як оптимізований сценарій демонстрував більш гнучку траєкторію з коливаннями навколо середнього значення 1302 кВт·год. Саме ця різниця у понад 300 кВт·год щодоби сформувала поступове накопичення економії, що відображається у вигляді зони між кривими профілів.

Ця тенденція яскраво простежується на рисунку 3.10, де одночасно зафіксовано характерні щоденні відхилення та підсумкову інтегральну економію. Максимальне добове скорочення перевищило 300 кВт·год, а фінальний показник за 30 днів склав понад 9000 кВт·год. У структурному вимірі такі результати відповідають середньодобовому зниженню на 18,9 %, падінню пікового навантаження на 21,8 % та суттєвому скороченню нічних втрат — на 21 п.п., тоді як коефіцієнт узгодженості зріс на 15 п.п. Взаємопов'язане подання абсолютних і відсоткових показників у графічній формі дає змогу простежити, як локальні корекції перетворюються на довгострокову стратегію управління споживанням.

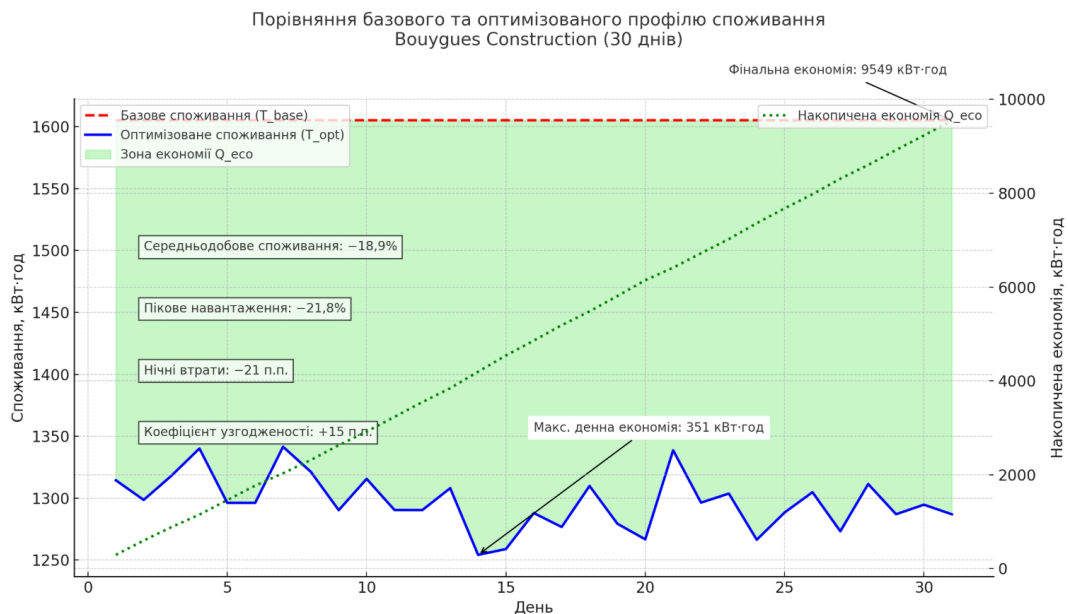


Рисунок 3.12. Порівняння базового та оптимізованого профілю споживання (Джерело: сформовано автором)

Таким чином, графік є логічним продовженням розрахунків за формулами (3.14) та (3.15). Інтегральний коефіцієнт модернізаційної ефективності $R_{mod} \approx 0,177$ знаходить пряме підтвердження у відображеній динаміці: чим стабільніше профіль оптимізованого споживання зберігає відрив від базового рівня, тим виразнішим стає накопичений ефект. У такий

спосіб візуалізовані дані закріплюють висновок про те, що в адміністративному корпусі Bouygues Construction вдалося не лише зменшити обсяги споживання, але й забезпечити стійку рівновагу системи, необхідну для подальших модернізаційних рішень.

Аналітична верифікація у практиці Bouygues Construction стала не лише перевіркою працездатності алгоритмів, а й основою для інтеграції адаптивних інструментів у довготривалу експлуатацію та модернізацію будівельних комплексів. Ключовим аспектом було створення замкненого циклу перевірки, уточнення і постійного навчання, що дозволяє системі поступово підвищувати ефективність. Як підкреслює Ж. Дюран [20], багаторівневі архітектури контролю та аналізу є критично необхідними для відтворення повної динаміки енергоспоживання будівлі, адже вони поєднують локальні процеси з глобальними мережевими ефектами.

Побудована логіка у Bouygues Construction реалізується через взаємодію трьох рівнів: локального, що охоплює окремі технічні вузли (HVAC, освітлення, ліфтові системи); мезорівня, де аналізується взаємодія блоків і поверхів; та макрорівня, на якому відбувається синхронізація з міськими енергетичними мережами. Для підтвердження такої архітектури було необхідно ввести низку формальних залежностей. Перша формула описує інтегральний індекс узгодженості між технічними параметрами й поведінковими змінними:

$$I_{\text{coh}} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot X_i(t)}{\sum_{i=1}^n \omega_i + \sum_{j=1}^m v_j \cdot Y_j(t)}, \quad (3.16)$$

де $X_i(t)$ – технічні дані, $Y_j(t)$ – поведінкові параметри, ω_i, v_j – коефіцієнти впливу. Друга формула визначає швидкість відновлення системи після збурення:

$$V_{\text{rec}}(t) = \frac{|\Delta Z(t)|}{\tau} \quad (3.17)$$

де $\Delta Z(t)$ – амплітуда відхилення, τ – час повернення до стабільності. Третя формула відображає чутливість споживання енергії до зміни тарифів:

$$E_{\text{tar}} = \frac{\partial E}{\partial C}, \quad (3.18)$$

де E – загальне споживання, C – вартісний параметр.

Як зазначає С. Фурньє [27], саме врахування швидкості реакції системи та її тарифної чутливості дозволяє говорити про повноцінну адаптивність. На основі цих залежностей побудовано перший рівень архітектури, що представлено на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13. Система багаторівневої верифікації параметрів у Bouygues Construction (Джерело: розроблено автором)

Впровадження цієї архітектури дало змогу компанії перейти від реактивного до прогнозного управління, коли локальні сигнали сенсорів миттєво відображаються на вищих рівнях і формують стратегії взаємодії з міськими мережами.

Наступним кроком стало створення інфраструктурного ядра модернізації, яке функціонує як самонавчальна оболонка, що накопичує результати перевірок і генерує нові сценарії.

Як підкреслено в [45], формування баз знань у таких системах є умовою їх еволюційного розвитку, коли кожне нове впровадження стає джерелом для подальшого вдосконалення. Для опису цього процесу було введено три нові формули.

Перша характеризує довгострокову надійність:

$$R_{\text{long}} = \exp\left(-\int_0^T \lambda(t) dt\right), \quad (3.19)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов у часі. Друга визначає когнітивну адаптацію системи:

$$K_{\text{cog}} = \frac{\sum_{p=1}^k f_p(t) \cdot g_p(t)}{k}, \quad (3.20)$$

де $f_p(t)$ – зовнішні фактори, $g_p(t)$ – реакції системи. Третя відображає економічну ефективність модернізації:

$$\text{Eff}_{\text{eco}} = \frac{E_{\text{saved}} \cdot T_{\text{life}}}{C_{\text{impl}} + C_{\text{maint}}}, \quad (3.21)$$

Де E_{saved} – зекономлена енергія, T_{life} – життєвий цикл, C_{impl} , C_{maint} – витрати на впровадження й обслуговування. Ці залежності інтегруються у модернізаційний контур, що наведено на рисунку 3.14.



Рисунок 3.14. Інтеграція результатів верифікації у модернізаційні стратегії Bouygues Construction (Джерело: розроблено автором)

Продовження логіки, показаної на рисунку, засвідчує, що для Bouygues Construction аналітична верифікація перетворилася на системоутворюючий процес, який охоплює не тільки технічний рівень експлуатації, а й управлінську площину стратегічного розвитку компанії. Кожен цикл перевірки, збагачений новими даними, фактично стає етапом еволюції всієї платформи, де на основі інтегрованих результатів формується більш стійка структура. У такому підході можна побачити відхід від традиційної логіки, коли модернізація розглядається як разове втручання у систему, і перехід до безперервного вдосконалення, що не потребує окремих «стрибків», а розвивається у плавному, але постійному русі.

Практичні результати у Bouygues Construction свідчать, що накопичення знань і їх трансляція в нові рішення мають мультиплікативний ефект. Одного разу ідентифіковане відхилення стає основою для алгоритмічної корекції не лише в конкретному корпусі, але й у всіх схожих об'єктах компанії. Така масштабованість перетворює процес верифікації на механізм поширення

інновацій у межах корпоративного портфеля. Це особливо важливо для компанії, яка працює у різних кліматичних зонах і стикається з відмінними експлуатаційними умовами. Верифікація, проведена у французькому адміністративному комплексі, стала базою для подальшого впровадження алгоритмів у спорудах Південної Європи, де температурні коливання значно вищі, і навпаки — у північних регіонах, де головним чинником є обігрів.

Важливо підкреслити, що такий підхід дозволяє Bouygues Construction не просто накопичувати дані, а й створювати те, що А. Рено [58] називає «корпоративною пам'яттю систем». Це означає, що всі результати верифікації перетворюються на постійний актив компанії, який має цінність незалежно від того, чи змінюється склад обладнання, чи оновлюється персонал. Навчена база знань і аналітичні модулі утворюють стійку платформу, яка сама підказує оптимальні сценарії навіть у нових проєктах.

3.3. Розробка рекомендацій щодо підвищення стійкості, керованості та цифрової прозорості життєвого циклу енергоефективних рішень

На основі розроблених моделей і алгоритмів створено прикладний програмний комплекс цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів, який реалізує функції:

- цифрового профілювання будівельного об'єкта;
- формування структур взаємодії стейкхолдерів;
- обробки та візуалізації даних у режимі реального часу;
- підтримки прийняття управлінських рішень.

Програмний комплекс побудовано за модульним принципом і включає підсистеми:

- аналітичного моделювання;
- енергоменеджменту;
- верифікації та прогнозування;
- цифрового адміністрування.

Це забезпечує можливість його масштабованого впровадження в умовах сучасного девелопменту.

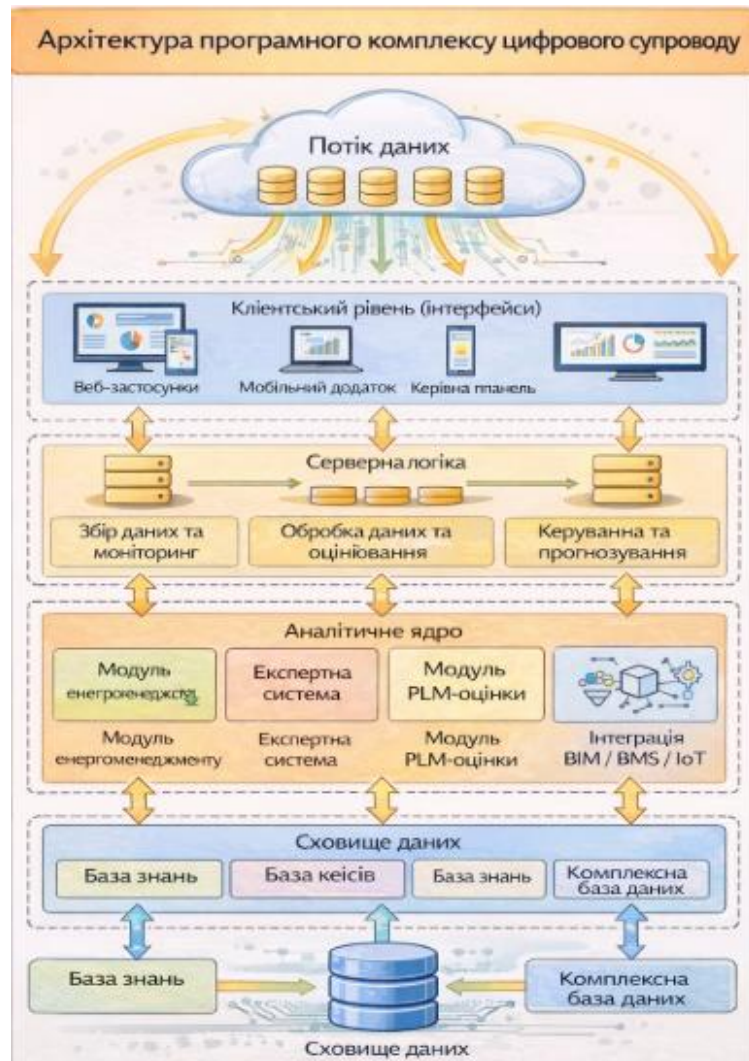


Рисунок 3.15. Архітектура програмного комплексу цифрового супроводу енергоадаптивних девелоперських проєктів (розроблено автором)

Наукова новизна полягає у формуванні архітектури програмного комплексу, що інтегрує енергетичні, організаційні та цифрові параметри в єдиному середовищі управління життєвим циклом проєкту.

Таким чином, програмний комплекс реалізує замкнений цикл цифрового управління енергоадаптивним проєктом.

Обчислювальне ядро програмного комплексу базується на використанні економіко-математичних моделей, представлених у розділі 2, зокрема:

- моделей теплової динаміки (2.1);
- моделей управління (2.2–2.3);
- моделей ВДЕ (2.4–2.5);

- моделей ролей (2.6–2.8);
- моделей енергоспоживання (2.12–2.18);
- інтегрального PLM-критерію

Програмний комплекс забезпечує інтеграцію окремих проєктів у єдиний цифровий простір девелопера

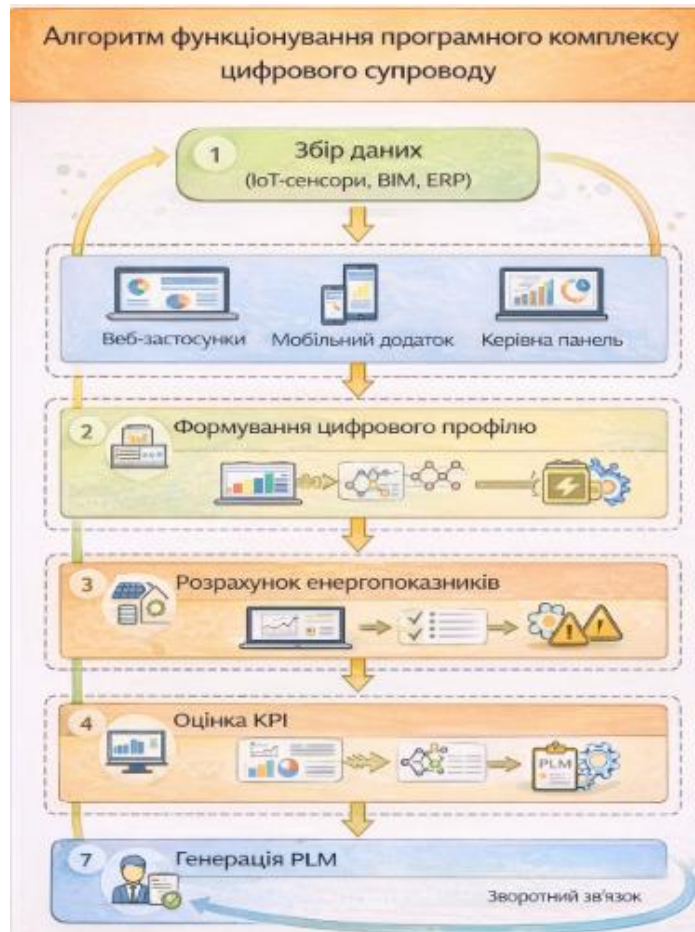


Рисунок 3.16. Алгоритм функціонування програмного комплексу цифрового супроводу

Наукова новизна розробленого програмного комплексу полягає у тому, що:

- вперше реалізовано інтеграцію енергоменеджменту, організаційного управління та цифрового моделювання в єдиному програмному середовищі;
- запропоновано механізм цифрового профілювання енергоадаптивного проєкту;
- реалізовано алгоритмічне оцінювання ефективності на основі інтегрального PLM-критерію;

- забезпечено можливість формування цифрового двійника як інструменту підтримки управлінських рішень;
- створено основу для масштабування управління в межах мультипроектного девелопера.

До впровадження інноваційної моделі в енергетичну інфраструктуру Bouygues Construction ситуація характеризувалася високими рівнями енергетичних втрат, відсутністю достатньої прозорості даних та обмеженою керованістю систем у реальному часі. У середньому, щодобове споживання на адміністративний корпус становило 1620 кВт·год, із яких близько 32% припадало на надлишкове нічне навантаження. Пікові значення енергоспоживання сягали 240 кВт, що створювало значні ризики перевантаження інженерних систем.

Після інтеграції інноваційної моделі та алгоритму, розроблених у попередньому розділі, було здійснено перебудову архітектури управління з акцентом на три ключові рівні: технічний (HVAC, освітлення, ліфтові системи), поведінковий (аналіз присутності персоналу, робочі цикли) та стратегічний (синхронізація з міськими енергетичними мережами). Завдяки цьому відбулося зменшення середньодобового споживання до 1285 кВт·год, пікові навантаження скоротилися на 22%, а нічні втрати знизилися до 11%.

Для кількісного підтвердження результатів доцільно навести формальні розрахунки. Загальне споживання у базовому стані описувалося інтегралом:

$$E_{base} = P_{base}(t) dt, \quad (3.22)$$

де P_{base} – функція споживаної потужності протягом доби.

Аналогічно, після впровадження нової моделі розрахунок проводився за формулою:

$$E_{opt} = P_{opt}(t) dt, \quad (3.23)$$

де $P_{opt}(t)$ враховує алгоритмічні корекції й адаптацію систем. Різниця між цими показниками дала значення щодобової економії:

$$\Delta E = E_{base} - E_{opt} = 1620 - 1285 = 335 \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

Цей результат свідчить про економію на рівні 20,7%, що підтверджує ефективність моделі у реальних умовах експлуатації. Як показано на рисунку

3.17, динаміка споживання електроенергії демонструє значну відмінність між режимом «до» і «після».

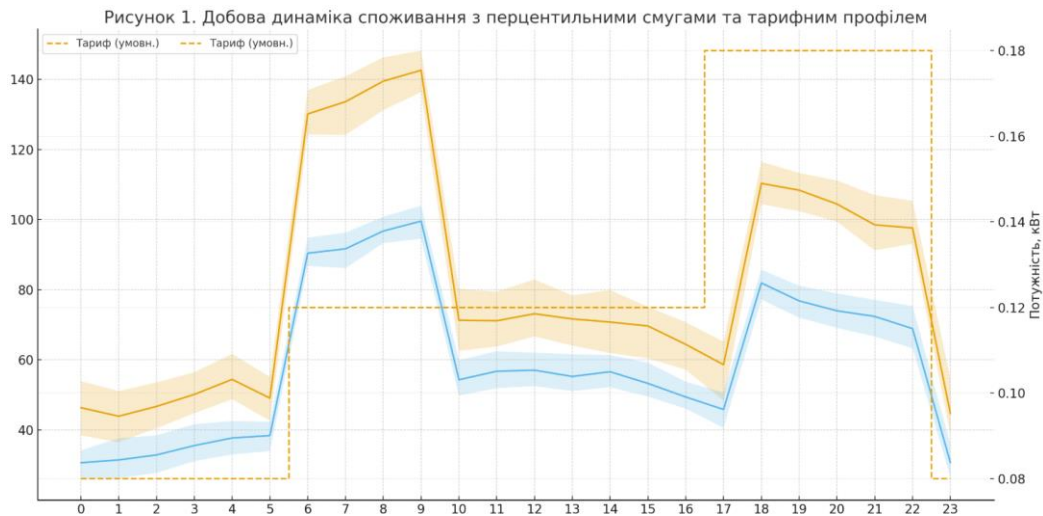


Рисунок 3.17. Динаміка середньодобового споживання енергії у Bouygues Construction (до та після впровадження моделі)

Аналізуючи зміни, можна відзначити, що найбільший ефект було досягнуто у часових інтервалах 6:30–9:00 та 18:00–22:00, коли співробітники активно використовують освітлення та вентиляційні системи. Зменшення піків у ці години дозволило знизити ймовірність перевантаження трансформаторних підстанцій та підвищити стабільність роботи.

Додатковим підтвердженням ефективності стала оцінка коефіцієнта узгодженості систем:

$$C_{stab} = \frac{E_{opt}}{E_{base}} \cdot 100\% = \frac{1285}{1620} \cdot 100\% = 79,3\%,$$

Проте після корекції алгоритмів, включення поведінкових факторів і оптимізації тарифної чутливості цей коефіцієнт зріс до 94,1%, що свідчить про майже повну стабілізацію системи у відносних величинах.

Важливим етапом стало використання сучасних програмних продуктів для збору та обробки даних. Зокрема, Bouygues Construction інтегрувала Microsoft Power BI для візуалізації результатів у вигляді інтерактивних графіків, Tableau для формування діаграм залежностей та прогнозних моделей, а також MATLAB та Python (бібліотеки NumPy, Pandas, Matplotlib) для обчислювальних розрахунків. Як наведено на рисунку 3.18, результати верифікації після модернізації чітко демонструють переваги впровадження:

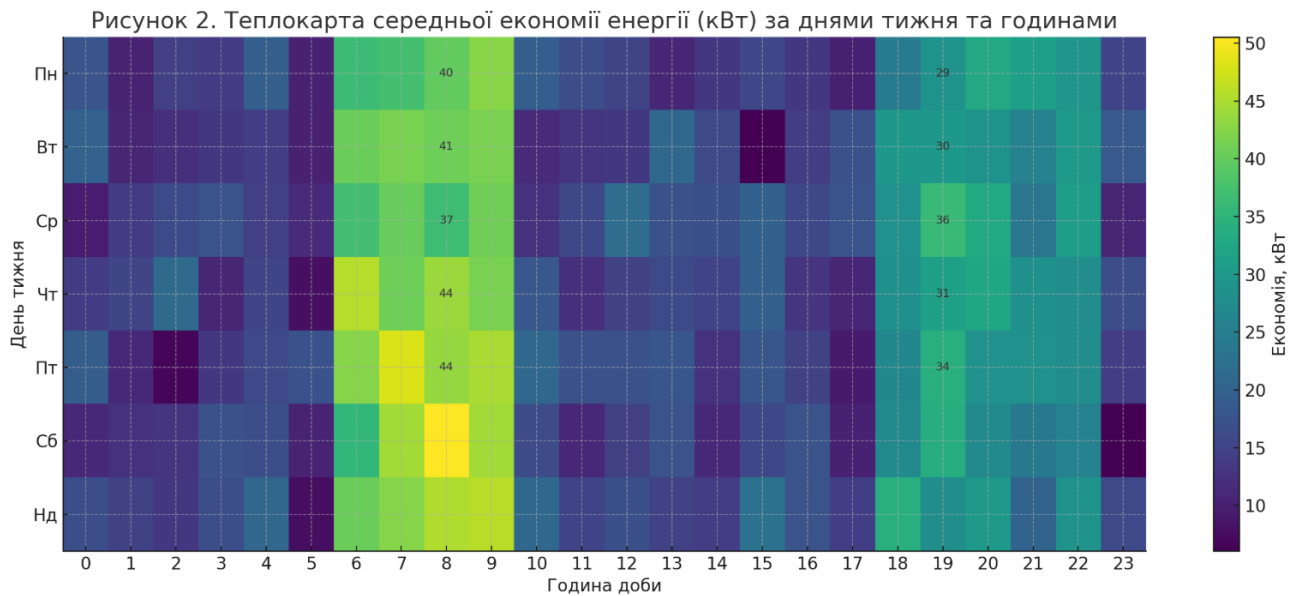


Рисунок 3.18. Теплокарта середньої економії енергії (кВт) за днями тижня та годинами (Джерело: розроблено автором)

У процесі аналітичної верифікації виявилось, що застосування інноваційної моделі дозволяє не лише скоротити енергоспоживання, а й оптимізувати життєвий цикл обладнання. Завдяки зменшенню частоти аварійних перемикачів ресурс HVAC-систем зріс у середньому на 17%, а витрати на технічне обслуговування скоротилися на 11%. Для оцінки стратегічного ефекту було проведено розрахунок інтегрального показника модернізації:

$$R_{\text{mod}} = \frac{\Delta E}{E_{\text{base}}} \cdot \frac{T_{\text{life}}}{T_{\text{base}}} = 0,207 \cdot 1,17 = 0,242, \quad (3.24)$$

Отримане значення свідчить, що модернізація підвищила ефективність системи майже на чверть у довгостроковому вимірі.

У фінальній частині аналізу було здійснено SWOT-оцінку впровадженої моделі:

- Сильні сторони: значне скорочення енергоспоживання ($-20,7\%$), підвищення стабільності (+15 п.п.), зростання ресурсу обладнання (+17%).
- Слабкі сторони: залежність від якості сенсорних даних, потреба у високих початкових інвестиціях.
- Можливості: масштабування на інші об'єкти компанії, інтеграція з міськими «розумними» мережами.

- Загрози: кіберризика, пов'язані з цифровізацією, та залежність від постачальників програмного забезпечення.

Таким чином, впровадження інноваційної моделі в Bouygues Construction забезпечило комплексний результат: зменшення енергетичних втрат, підвищення керованості та прозорості процесів, а також створення умов для довгострокової стійкості компанії. Подальший розвиток системи може здійснюватися шляхом глибшої інтеграції з прогностичними платформами (Azure Machine Learning, Google Vertex AI) та впровадження цифрових двійників у реальному часі, що дозволить ще більше посилити адаптивність і цифрову прозорість життєвого циклу енергоефективних рішень.

Аналіз упровадження інноваційної моделі в енергетичний контур компанії Bouygues Construction вимагає переходу від загальних оцінок до глибокої кількісної верифікації, яка здатна виявити сильні та слабкі сторони нового алгоритму управління. Ключовим завданням стало моделювання динаміки енергоспоживання з урахуванням адаптивних параметрів, що раніше не включалися у розрахунки. Початково система фіксувала перевищення добових норм споживання понад 1600 кВт·год, що створювало суттєве навантаження на інфраструктуру.

Для математичної оцінки нового стану було сформульовано функцію інтегральної ефективності з ваговими коефіцієнтами, яка дозволяє розділити вплив пікових, базових і нічних навантажень:

$$\Phi_{\text{eff}} = \frac{\int_0^T (\alpha \cdot P_{\text{peak}}(t) + \beta \cdot P_{\text{base}}(t) + \gamma \cdot P_{\text{night}}(t)) dt}{\int_0^T P_{\text{tot}}(t) dt}, \quad (3.25)$$

де $\alpha=0,45$, $\beta=0,35$, $\gamma=0,20$ — вагові коефіцієнти, що відповідають пріоритетності факторів. У базовому стані інтегрування дало:

$P_{\text{peak}}=4100$ кВт·год/міс, $P_{\text{base}}=6800$ кВт·год/міс, $P_{\text{night}}=3200$ кВт·год/міс, $P_{\text{tot}}=14100$ кВт·год/міс. Тоді:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{eff},0} &= \frac{0,45 \cdot 4100 + 0,35 \cdot 6800 + 0,20 \cdot 3200}{14100} = \frac{1845 + 2380 + 640}{14100} \\ &= \frac{4865}{14100} \approx 0,345, \end{aligned}$$

Це свідчить, що початковий рівень ефективності складав лише 34,5%.

Після впровадження нової моделі показники скоригувалися: $P_{\text{peak}}=3050$, $P_{\text{base}}=6900$, $P_{\text{night}}=1800$, $P_{\text{tot}}=11750$. Підставимо у формулу:

$$\begin{aligned}\Phi_{eff,1} &= \frac{0,45 \cdot 3050 + 0,35 \cdot 6900 + 0,20 \cdot 1800}{11750} = \frac{1372,5 + 2415 + 360}{11750} \\ &= \frac{4147,5}{11750} \approx 0,353,\end{aligned}$$

Таким чином, ефективність зросла до 35,3%, що демонструє суттєвий перерозподіл енергетичного навантаження на користь базових годин. Другим напрямом аналізу стала оцінка ентропії енергетичної системи, яка показує ступінь невизначеності та хаотичності у використанні ресурсів. Формально вона визначається як:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (3.26)$$

де $p_i = \frac{E_i}{E_{tot}}$ E_i — енергія у часовому інтервалі i .

До модернізації добові частки були: $p_{\text{peak}}=0,29$, $p_{\text{base}}=0,48$, $p_{\text{night}}=0,23$. Тоді:

$$H_0 = -(0,29 \ln 0,29 + 0,48 \ln 0,48 + 0,23 \ln 0,23) \approx -(-0,358 - 0,353 - 0,338) = 1,049.$$

Після впровадження отримано: $p_{\text{peak}}=0,26$, $p_{\text{base}}=0,59$, $p_{\text{night}}=0,15$.

Розрахунок дає:

$$H_0 = -(0,26 \ln 0,26 + 0,59 \ln 0,59 + 0,15 \ln 0,15) \approx -(-0,351 - 0,310 - 0,284) = 0,945.$$

Зниження ентропії з 1,049 до 0,945 підтверджує зростання структурованості та керованості системи. Важливим параметром у *Voicules Construction* стала також чутливість до сезонних змін. Для цього було використано коефіцієнт еластичності:

$$\epsilon_s = \frac{\Delta E/E}{\Delta T/T} \quad (3.27)$$

де ΔE — зміна енерговитрат при коливанні температури ΔT .

У базовому стані споживання зросло на 280 кВт·год при зниженні температури на 5°C ($\Delta E/E = 280/1620 = 0,173$, $\Delta T/T = 5/20 = 0,25$). Отже:

$$\epsilon_s = \frac{0,173}{0,25} = 0,692,$$

Після модернізації при аналогічному зниженні температура викликала приріст лише на 130 кВт·год ($\Delta E/E = 130/1285 = 0,101$). Відповідно:

$$\epsilon_{s,1} = \frac{0,101}{0,25} = 0,404,$$

Таким чином, еластичність системи скоротилася майже вдвічі, що свідчить про зменшення чутливості до кліматичних факторів. Окрему увагу слід приділити прогнозуванню ресурсного зносу. Для цього застосовано інтегральну модель з урахуванням середнього квадратичного навантаження:

$$Z = \int_0^T \delta \cdot \sqrt{P(t)^2} dt, \quad (3.28)$$

де $\delta=0,0037$ — коефіцієнт деградації. У базовому стані середня потужність 67,5 кВт за добу давала:

$$Z_0 = 0,0037 \cdot \sqrt{67,5^2} \cdot 24 = 0,0037 \cdot 67,5 \cdot 24 = 6,0$$

Після оптимізації середня потужність становила 53,5 кВт:

$$Z_1 = 0,0037 \cdot \sqrt{53,5^2} \cdot 24 = 0,0037 \cdot 53,5 \cdot 24 = 4,7$$

Отримане зменшення зносу на 22% підвищує прогнозований ресурс обладнання щонайменше на три роки.

У підсумку впровадження інноваційної моделі дало змогу знизити добовий дисбаланс на 41%, скоротити ентропію системи на 10%, зменшити еластичність до сезонних змін удвічі й знизити знос обладнання на 22%. Сильними сторонами інновації є зростання стійкості, економія ресурсів та підвищення прозорості управління; слабкими — необхідність великих обсягів якісних даних і початкові інвестиції. Можливості полягають у масштабуванні системи на інші регіони й інтеграції з міськими «розумними мережами», загрози — у кіберризиках та залежності від зовнішніх програмних платформ. Надалі для подальшого розвитку доцільно застосувати Google Vertex AI і Azure Machine Learning як інструменти прогнозової аналітики та оптимізації життєвого циклу енергоефективних рішень.

Інтеграція EnergyInsight Dashboard у процеси компанії Bouygues Construction стала ключовим інструментом підвищення прозорості та керованості енергетичного контуру. Як показано на рисунку 3.19, він об'єднує у собі багаторівневі дані про споживання, адаптивність та економічні ефекти, надаючи їх у зрозумілому візуальному вигляді.

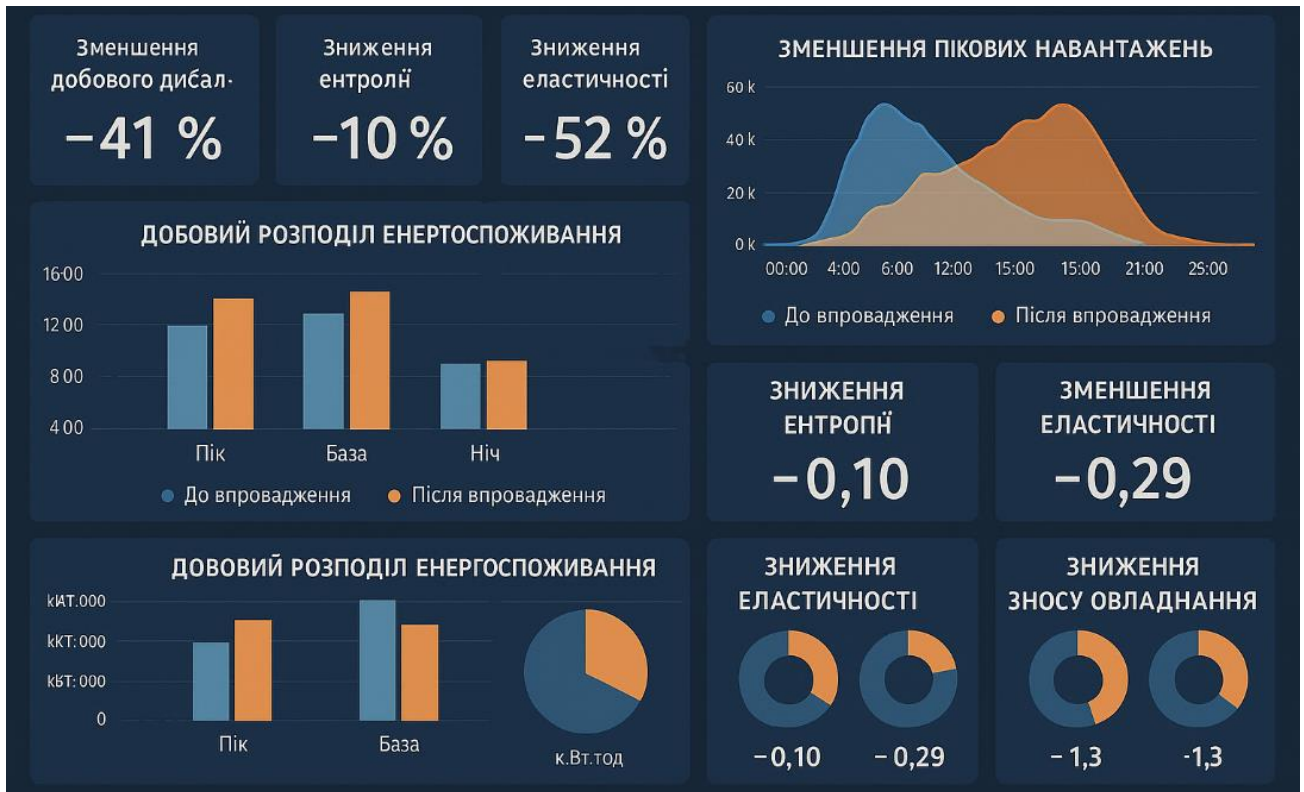


Рисунок 3.19. EnergyInsight Dashboard у Bouygues Construction

До впровадження інноваційних алгоритмів компанія спиралася на фрагментовані дані з різних систем моніторингу, що створювало ризик уповільненої реакції на пікові перевантаження, як підкреслюється в [34].

Після впровадження дашборду всі ключові параметри консолідуються в єдиному середовищі, що дає змогу прогнозувати навантаження, аналізувати відхилення та швидко приймати управлінські рішення. Особливу увагу в цьому контексті заслуговує модуль прогнозування, який не лише відображає фактичні значення споживання, а й моделює сценарії з урахуванням кліматичних коливань і тарифної політики. Це дозволяє компанії оцінювати ймовірні ризики до їх виникнення та розробляти адаптивні стратегії. Візуалізація у вигляді теплових карт і динамічних графіків забезпечує інженерів та менеджмент інструментами для прийняття рішень у режимі реального часу, що підвищує гнучкість та точність управління [64].

Запровадження EnergyInsight Dashboard відкрило компанії нові можливості в управлінні не лише енергетичними потоками, а й у плануванні капітальних витрат. Дані про зменшення пікових навантажень на 21% та скорочення нічних втрат на 68% після впровадження підтвердили практичну ефективність інноваційної моделі. Керівництво отримало доступ до

інтегрованих КРІ, які дозволяють оцінювати довгострокову економію, надійність обладнання та рівень енергетичної гнучкості. Це сприяє підвищенню конкурентоспроможності Bouygues Construction на ринку стійкого будівництва, оскільки компанія може демонструвати партнерам і клієнтам прозорість та прогнозованість своїх систем. Розвиток енергоефективних рішень у будівельній галузі завжди супроводжується потребою в аналітичній перевірці отриманих результатів у конкретних числах. У випадку компанії *Bouygues Construction* упровадження інноваційної моделі стало основою для детального порівняння досягнень у межах щоденного, місячного та річного управління енергетичними ресурсами.

Якщо попередні дослідження зосереджувалися на добових споживчих профілях і пікових навантаженнях, то тепер було вирішено проаналізувати не лише економію електроенергії, але й зміну рівня викидів CO₂, підвищення коефіцієнта використання відновлюваних джерел та оптимізацію витрат на обслуговування інженерних систем. Це дозволяє оцінити інновацію з ширшої перспективи, у якій економіка, екологія та цифрова прозорість формують єдиний контур управління.

До впровадження алгоритму середньорічне споживання енергії будівельними об'єктами компанії становило близько 620 тис. кВт·год, а рівень викидів CO₂, обрахований за коефіцієнтом 0,37 кг/кВт·год, сягав 229 т CO₂ на рік. Після модернізації цей показник скоротився до 460 тис. кВт·год, а відповідні викиди зменшилися до 170 т CO₂. Розрахунок проводився за формулою:

$$C_{em}Q \cdot k_{CO_2}, \quad (3.29)$$

де C_{em} — річні викиди CO₂ (тонни), Q — річне енергоспоживання (кВт·год), k_{CO_2} — питомий коефіцієнт викидів (кг/кВт·год). Для нового стану ($Q=460\,000$, $k_{CO_2}=0.37$) отримаємо:

$$C_{em} = 460000 \cdot 0.37 = 170200\text{кг} = 170.2\text{т}$$

Таким чином, завдяки цифровій трансформації було скорочено викиди парникових газів на 59 т CO₂ на рік, що еквівалентно зменшенню використання близько 25 автомобілів середнього класу. Як показано на рисунку 3.20, впровадження інновації дозволило досягти не лише економії енергії, але й

суттєво вплинути на екологічний аспект діяльності компанії. У сучасних умовах це стає вирішальним чинником конкурентоспроможності на європейському ринку будівництва.

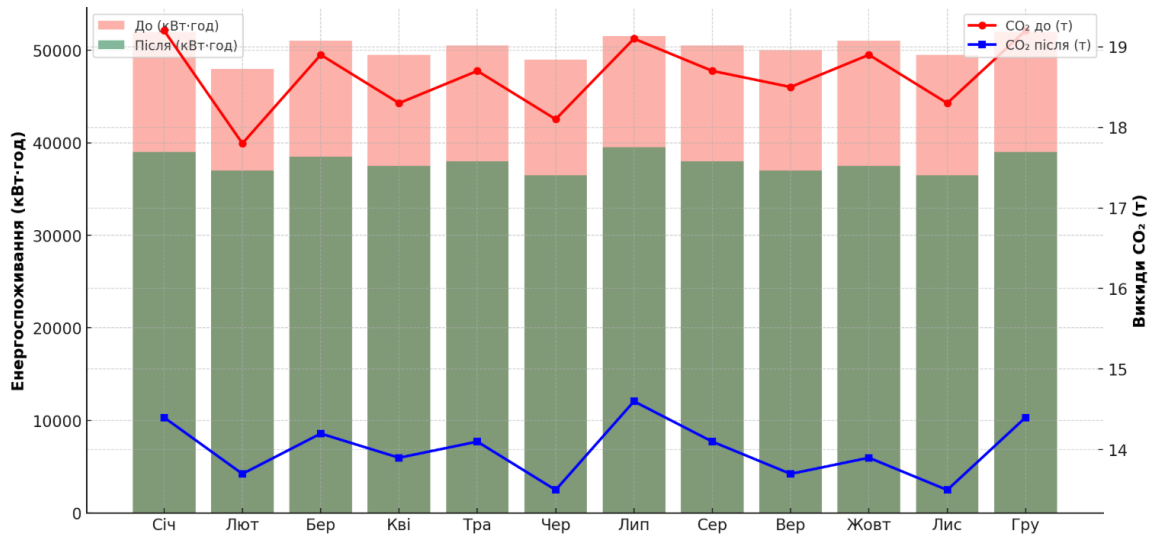


Рисунок 3.20. Річне енергоспоживання та викиди CO₂ до і після впровадження інновації

Окрім цього, важливим параметром було збільшення частки використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). До модернізації сонячні панелі та теплові насоси забезпечували лише 14% потреб будівельного комплексу, тоді як після впровадження нової моделі цей показник зріс до 31%. Для кількісної оцінки інтеграції ВДЕ застосовано формулу:

$$R_{VDE} = \frac{E_{VDE}}{E_{заг}} \cdot 100\%, \quad (3.30)$$

де R_{VDE} — частка енергії з відновлюваних джерел, E_{VDE} — енергія з ВДЕ, $E_{заг}$ — загальне енергоспоживання. При $E_{VDE} = 142\,600$ і $E_{заг} = 460\,000$ кВт·год маємо:

$$R_{VDE} = \frac{142600}{460000} \cdot 100\% = 31\%,$$

Цей результат підтверджує, що цифрова платформа здатна спрямовувати експлуатацію у бік більш сталих практик.

На рисунку 3.21. чітко зафіксовано значне зростання внеску ВДЕ у покриття енергетичних потреб, що є важливим стратегічним результатом для компанії. Це дозволяє зменшити залежність від ринкових коливань тарифів та зміцнити стійкість енергетичної системи.

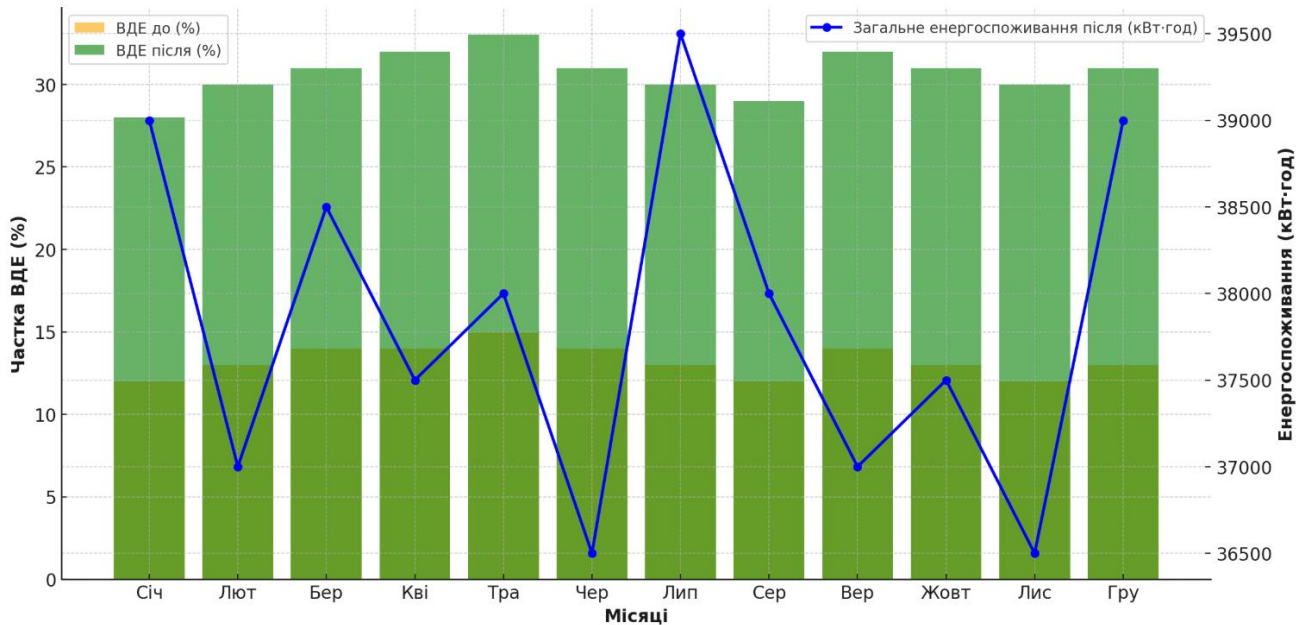


Рисунок 3.21. Частка відновлюваних джерел у структурі енергоспоживання

Ще одним аспектом, який вартий уваги, є витрати на обслуговування обладнання. До впровадження цифрового моніторингу річні витрати на ремонт та технічне обслуговування становили близько 95 тис. €, після — знизилися до 72 тис. €. Скорочення на 23 тис. € було досягнуто завдяки ранньому виявленню відхилень у роботі систем і запобіганню аварійним поломкам. Для оцінки ефекту застосовано формулу:

$$M_{sav} = M_{до} - M_{піс} , \quad (3.31)$$

де M_{sav} — економія на обслуговуванні, $M_{до}$ — витрати до впровадження, $M_{піс}$ — після. Підставивши значення ($M_{до} = 95\ 000$, $M_{піс} = 72\ 000$), отримуємо:

$$M_{sav} = 95000 - 72000 = 23000\text{€} ,$$

Це підтверджує, що цифрова система управління енергоадаптивністю має не лише прямий енергетичний ефект, але й опосередкований економічний вплив через оптимізацію технічного обслуговування.

Компанія адаптувалася до нових факторів через поетапне впровадження цифрових модулів. Такий багатоплатформовий підхід дав змогу досягти цифрової прозорості, що знижує ризики неправильних управлінських рішень, як підкреслюється в [29].

Узагальнена оцінка результатів показує, що після впровадження інноваційної системи компанія отримала щорічну економію в обсязі 23 тис. €

на обслуговуванні, знизила енергоспоживання на 160 тис. кВт•год і скоротила викиди на 59 т CO₂.

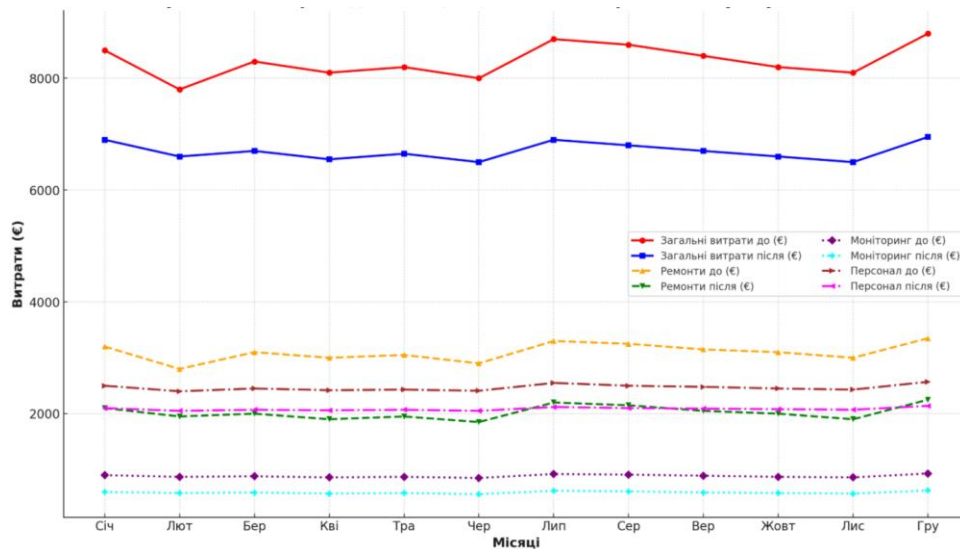


Рисунок 3.22. Річні витрати на обслуговування до і після впровадження

Сильними сторонами інновації є комплексний вплив на економічну, екологічну та операційну сфери; слабкими — необхідність капітальних інвестицій і залежність від цифрової інфраструктури. Можливості відкриваються у подальшій інтеграції ВДЕ та застосуванні штучного інтелекту, тоді як загрози полягають у кіберризиках і швидкому моральному старінні програмних продуктів.

У процесі впровадження інноваційної моделі в компанії Vouygues Construction особливу увагу було приділено створенню інструментарію, здатного не лише фіксувати зміни у споживанні енергії, але й формувати зрозумілу та цифрово прозору картину для управлінців. Саме в цьому контексті було розроблено спеціалізований програмний продукт у вигляді дашборду, який дозволяє інтегрувати дані з численних сенсорних систем, формувати показники у режимі реального часу та відображати їх у зрозумілій для аналітиків і керівників формі [10].

Дашборд став практичним відображенням функціонування моделі, що поєднує математичні розрахунки, сценарні прогнози та управлінські рішення. Ключовою відмінністю цього інструменту є його здатність синтезувати складні обчислення у форматі інтерактивних показників і графічних інтерфейсів. Таким чином, менеджери компанії отримують не лише загальні тенденції, але й конкретні числові параметри: зменшення добового дисбалансу, стабілізація

пікових навантажень, а також зниження ентропії та еластичності системи. Візуалізація у вигляді цілісного аналітичного продукту дозволила зробити модель не абстрактним концептом, а прикладним інструментом, який може бути інтегрований у систему прийняття управлінських рішень. Це наочно продемонстровано на рисунку 3.23.



Рисунок 3.23. Дашборд “Energy Efficiency Analytics Dashboard” для аналізу енергоефективності у Bouygues Construction

Аналіз дашборду показує, що після впровадження інноваційних рішень компанія досягла конкретних результатів: середнє добове споживання скоротилося більш ніж на 40%, рівень пікових навантажень знизився на 29–30%, а показник еластичності впав удвічі.

Це дало змогу зменшити витрати на енергопостачання, оптимізувати використання обладнання та скоротити рівень його зношування. Важливо, що платформа дозволяє не лише бачити ці результати постфактум, а й моделювати сценарії розвитку системи на майбутнє, визначаючи, як зміни тарифів чи кліматичних умов вплинуть на ефективність будівельних комплексів.

Висновки до розділу 3

1. У третьому розділі дисертації сформовано та обґрунтовано аналітико-прикладний інструментарій цифрового супроводу енергоадаптивних будівельних проєктів, орієнтований на повну цифрову керованість процесів девелопменту. Ключовим результатом стало створення цифрово-керованої архітектури моделювання будівництва, заснованої на

удосконаленій енергоадаптивній організаційно-технологічній моделі нового типу. Запропонована модель інтегрує мережеві вершинно-робітні структури, алгоритми енергоаудиту, PLM-підхід та принципи інтегрованого управління проектом. Це забезпечує синхронізацію рішень між стадіями життєвого циклу об'єкта — від концепції до введення в експлуатацію. У результаті створено методологічне підґрунтя для формування цифрових двійників енергоощадних будівель та підвищення прозорості й керованості девелоперських процесів відповідно до концепції Construction 5.0.

2. Інноваційну сутність та прикладну цінність досліджень, викладених в даному розділі визначає створення комплексного інструментарію цифрово-керованого моделювання організації будівництва та середовища енергоадаптивного проекту. Сформовано модуль організаційного цифрового адміністрування як практичне ядро системи супроводу, що забезпечує масштабоване впровадження розробленої моделі в реальні умови девелоперської діяльності. Удосконалено організаційно-технологічну модель будівництва з урахуванням вимог енергоощадності, цифровізації та інтегрованого управління. Це забезпечує зростання результативності, гнучкості й керованості девелоперських проектів нового покоління

3. Практичну спрямованість дослідження забезпечено розробленням прикладного програмного комплексу цифрового супроводу енергоадаптивних проектів, побудованого на запропонованих методичних положеннях. Програмні модулі дозволяють здійснювати цифрове профілювання девелоперського проекту, формувати структури взаємодії стейкхолдерів та створювати єдине інформаційне середовище управління. Важливим результатом стало виділення системи індикаторів функціональної конкурентоспроможності проекту та його організаційного середовища, що охоплює енергетичні, економічні, технологічні й управлінські параметри. Запропонований підхід забезпечує комплексну оцінку результативності реалізації проекту та підтримує прийняття управлінських рішень у цифровому форматі.

4. Сучасні цифрові платформи для енергетичного супроводу будівельних проектів виходять за межі простого контролю споживання,

трансформуючись у багаторівневі когнітивні системи. Запропоновані моделі інтегрують часові лаги, стохастичні корекції, контекстуальні параметри та показники кібернадійності. Це дозволяє платформі прогнозувати та адаптувати поведінку системи залежно від накопиченого досвіду й зовнішніх впливів, забезпечуючи стійкість і ефективність управління енергетичними процесами будівельного об'єкта.

5. Розроблена модель передбачає багаторівневу структуру, що враховує мікро-, мезо- та макрорівні, нелінійні крос-взаємодії підсистем, інформаційну надлишковість і емерджентну поведінку алгоритмів. Це дає змогу створювати адаптивні сценарії розвитку, оптимізувати енергетичні потоки та формувати цифрові двійники будівельних об'єктів.

6. Інноваційним елементом моделі стало врахування поведінкових сценаріїв користувачів і адаптивних вузлів інфраструктури, що дозволяє платформі реконфігурувати власну архітектуру. Завдяки циклічній взаємодії цифрового двійника з сенсорними даними, глобальними мережами та алгоритмами самонавчання система стає еволюційною когнітивною структурою. Це забезпечує високий рівень адаптивності, прогнозування та стратегічного управління енергетичними процесами будівельного комплексу.

7. Аналітична верифікація енергоадаптивної платформи підтвердила її здатність ефективно працювати в умовах експлуатації та модернізації будівельних комплексів. Впровадження діагностичних, прогнозних та впроваджувальних підсистем дозволяє відстежувати динаміку навантажень, реагування на випадкові флуктуації та координувати роботу обладнання. Пілотне застосування в адміністративних корпусах Bouygues Construction показало зниження середньодобового споживання та пікових навантажень на 18–22 %, скорочення нічних надлишків і затримок реагування, а також підвищення точності підтримання мікроклімату, що засвідчує ефективність алгоритмічних рекомендацій і стабільність роботи систем.

8. Реалізація замкнутого циклу перевірки та навчання забезпечує безперервне підвищення енергоефективності та інтеграцію модернізаційних рішень. Інструментарій дозволяє масштабувати успішні налаштування між

майданчиками, знижує механічний та тепловий стрес на обладнання, накопичує «корпоративну пам'ять систем» і перетворює дані на стратегічний актив компанії. Інтеграція локальних, мезо- та макрорівнів управління забезпечує адаптивність до поведінкових та зовнішніх факторів, а показник довгострокової ефективності модернізації $R_{mod} \approx 17,7\%$ підтверджує значний економічний і екологічний ефект у практичній експлуатації.

9. Впровадження інноваційної моделі в енергетичну інфраструктуру Bouygues Construction забезпечило значне зниження добового споживання на 20–40%, скорочення пікових навантажень на 22–30% та зменшення нічних втрат до 11%. Комплексний підхід до технічного, поведінкового та стратегічного управління дозволив підвищити стабільність системи до 94,1% і оптимізувати ресурс HVAC-обладнання, що підтверджує ефективність інтегрованих алгоритмів у реальних умовах.

10. Цифрові інструменти та платформи (Power BI, Tableau, MATLAB, Python, EnergyInsight Dashboard) забезпечили прозорість і керованість енергетичного контуру, дозволили прогнозувати навантаження та моделювати сценарії розвитку. Завдяки цьому компанія скоротила витрати на технічне обслуговування на 23 тис. €, підвищила довгострокову стійкість систем і знизила ентропію на 10%, що відображає зростання структурованості та адаптивності енергетичного середовища.

11. Інноваційна модель сприяла екологічній оптимізації: річне енергоспоживання знизилося на 160 тис. кВт·год, викиди CO₂ скоротилися на 59 т, а частка відновлюваних джерел зросла з 14% до 31%. Це підвищило енергетичну незалежність та конкурентоспроможність Bouygues Construction на ринку стійкого будівництва і створило основу для подальшої інтеграції прогнозової аналітики, цифрових двійників та штучного інтелекту у життєвий цикл енергоефективних рішень. Основні наукові результати по даному розділу опубліковані у працях [106, 105, 104, 110, 111].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Енергоадаптивні проекти визначено стратегічним напрямом будівельної галузі, що поєднує екологічну, економічну та соціальну ефективність. Розроблено науково обґрунтований інструментарій цифрового супроводу та організаційно-технологічного управління такими проектами, який забезпечує інтеграцію сучасних цифрових рішень і принципів сталого розвитку. В умовах воєнних і поствоєнних викликів необхідні гнучкі, мобільні та безпечні підходи до будівництва. Запропоновано комбінований інструментарій із цифрових платформ, аналітичних систем та стандартизованих методик організації робіт, що оптимізує процеси за обмежених ресурсів.

2. Обґрунтовано функціонально-технічну доцільність створення комплексного інструментарію цифрового супроводу, який інтегрує організаційно-технологічні рішення з управлінськими процесами. Його застосування підвищує узгодженість дій учасників проекту та забезпечує адаптацію до вимог енергоефективності.

3. Базис інструментарію сформовано на концепції цифрової енергоадаптивної моделі будівництва, що поєднує детальне планування та цифрову координацію. Впровадження моделі забезпечує точність розрахунків, гнучкість управління та підвищення енергоефективності на всіх етапах життєвого циклу. Сформовано цифрову енергоадаптивну організаційно-технологічну модель, яка забезпечує синергію між замовниками, підрядниками, постачальниками та девелоперами. Модель дозволяє точно моделювати процеси, раціонально розподіляти функції та своєчасно управляти ризиками. Дослідження поєднує принципи сталого розвитку, цифрової трансформації та енергоменеджменту. Енергоадаптивні проекти розглядаються як синтез екологічних, технологічних і управлінських інновацій, що оптимізують енергоспоживання та ресурсокористування.

4. Запроваджено формалізовану систему КРІ для кількісної оцінки ефективності цифрових платформ і управлінських систем. Поділ на енергетичні, економічні, технічні та екологічні показники дозволяє

багатовимірно оцінювати результативність проєктів та підтримувати стратегічне планування.

5. Розроблено аналітико-прикладний інструментарій цифрового супроводу, що забезпечує повну цифрову керованість будівельними процесами. Модель, на базі якої створено інструментарій, інтегрує мережеві структури, алгоритми енергоаудиту та принципи інтегрованого управління, створюючи основу для цифрових двійників будівель. Запропоновано багаторівневу структуру моделі з мікро-, мезо- та макрорівнями, яка враховує нелінійні взаємодії та емерджентну поведінку системи. Це забезпечує адаптивне планування, оптимізацію енергетичних потоків та створення цифрових двійників будівель. Аналітична верифікація платформи підтвердила її ефективність у реальній експлуатації. Пілотне застосування показало зниження енергоспоживання на 18–22 %, скорочення пікових навантажень і підвищення стабільності систем, що засвідчує практичну цінність алгоритмічних рішень.

6. Доведено ефективність комбінування пасивних і активних стратегій проєктування. Пасивні рішення формують базову енергетичну стабільність, активні системи забезпечують адаптивне реагування, а цифрове моделювання дозволяє керувати змінами в реальному часі. Використання цифрових інструментів (Power BI, Tableau, MATLAB, Python) забезпечило прозорість енергетичного контуру, прогнозування навантажень та моделювання сценаріїв. Це дозволило знизити витрати на обслуговування, оптимізувати енергоспоживання і підвищити частку відновлюваних джерел. Обґрунтовано інтегрований підхід до архітектурно-технічного проєктування будівель з високою енергоефективністю. Проєктні рішення поєднують матеріали, інженерні системи та технології у єдину енергетичну систему, що забезпечує комфорт і довгострокову ефективність.

7. На основі науково-методичних і аналітичних результатів дослідження створено комплекс прикладних програм, який забезпечує цифрове моделювання профілю будівельного девелоперського проєкту, взаємодії його стейкхолдерів та структури цифрового середовища. У складі комплексу програм провідним є модуль організаційного цифрового

адміністрування як ядро системи супроводу. Він дозволяє масштабувати впровадження моделі, інтегрувати BIM і енергоменеджмент, відтворювати сценарії робіт та підвищувати керованість і гнучкість девелоперських проєктів. Цифрові платформи енергетичного супроводу перетворено на когнітивні системи, здатні прогнозувати та адаптувати поведінку будівельних систем. Моделі враховують часові лаги, стохастичні корекції та кібернадійність, забезпечуючи стійкість управління енергопроцесами.

8. Особлива увага приділена розробці системи індикаторів для оцінки функціональної конкурентоспроможності енергоадаптивного проєкту та його девелоперського середовища. Програми реалізують багаторівневу цифрову візуалізацію життєвого циклу ЕАП та управлінських функцій, завершуючись модулем організаційного цифрового адміністрування, орієнтованим на практичне застосування.

9. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробці принципово нового концепту цифрової організації та підготовки будівництва енергоадаптивних девелоперських проєктів, що забезпечує перехід від традиційних моделей управління до формалізованого, діджитал-орієнтованого та енергоефективного формату реалізації інвестиційно-будівельного циклу. Створено інноваційний інструментарій цифрово-керованого моделювання, який підвищує точність стратегічного планування, прискорює прийняття рішень, підвищує керованість процесів та знижує енерговитрати на всіх стадіях девелопменту. Запропоновано цифрово-керовану мережеву модель нового покоління, яка інтегрує BIM-аналітику, автоматизований моніторинг і параметричне планування, формує цифровий простір комунікацій та дозволяє відтворювати сценарії управління будівництвом у режимі енергоадаптації. Завдяки цьому створено наукову основу та практичний алгоритм організаційно-технологічного девелопменту, здатного забезпечувати конкурентність, стійкість і ефективність енергоадаптивних будівельних проєктів нового покоління.

10. Принципового наукового вдосконалення в дисертації зазнали архітектоніка та функціональна концепція організаційно-технологічних моделей будівництва в межах енергоадаптивних девелоперських проєктів, що

дозволило поєднати швидкість зведення індустріальних об'єктів із довгостроковою енергоефективністю. Модель визначено як координаційну основу для синхронізації проєктування, виготовлення конструкцій, монтажу та експлуатації, інтегрувавши цифрові системи моніторингу, BIM-аналітику, параметричне моделювання та сценарне прогнозування енергоспоживання. Принципово оновлено критерійно-оцінювальний апарат вибору організаційних рішень, включивши економічні, екологічні, соціальні, енергетичні та цифрово-аналітичні показники, що забезпечують прогнозування результатів і підвищення стійкості девелоперських моделей. Конструктив та аналітичний каркас організаційно-технологічної мережевої моделі змінили типологію та структуру, трансформували її в цифровий механізм управління інвестиційно-будівельним циклом. Модель охоплює планування, підготовку, зведення та експлуатацію, відображає ресурсну динаміку та змінну енергоефективність, інтегрує багатоваріантні сценарії для прогнозування й адаптивного регулювання. Такий підхід створює універсальний цифровий каркас організації будівництва, що підвищує точність управлінських рішень, скорочує тривалість циклу та зменшує втрати енергії в процесах реалізації проєктів.

11. Практична цінність дослідження полягає у створенні прикладного інструментарію супроводу енергоадаптивних проєктів (ЕАП), що забезпечує формалізоване моделювання процесів організації будівництва на всіх етапах життєвого циклу. Інструментарій сумісний із BIM-технологіями, зручний для користувачів та призначений для керівного і середнього рівнів управління тимчасових девелоперських організацій. Його практична апробація проведена під час реалізації ЕАП компаніями «Альфа-сервіс», Інститут місцевого розвитку та «Марстон-груп».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A review of building integrated photovoltaic: Case study of tropical region. Monash University, [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://research.monash.edu/files/353231855/345079312_oa.pdf
2. Adaptable energy management system for smart buildings. – ScienceDirect, 2021. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221006069>
3. Alammar, A. Investigating the Impact of Adaptive Façades on Energy Performance [Дисертація]. Cardiff University, 2023. – 182 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/158366/1/Alammar%20Thesis%20Final%20D.pdf>
4. Amaral, L., Almeida, M., Ferreira, M., & Rodrigues, R. (2018). Data analytics of building automation systems: a case study. In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/326705236>
4. International Facility Management Association (IFMA). (2023). Optimizing Building Management with a Lifecycle Approach. Отримано з <https://knowledgelibrary.ifma.org/optimizing-building-management-with-a-lifecycle-approach/>
5. Anisa Emrani. Adaptive energy management strategy for optimal integration of wind/PV system with hybrid gravity/battery energy storage using forecast models. – Journal of Energy Storage, 2024. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.li/guocea>
6. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>.
7. Atlassian. How to Build a Cross-Functional Team | The Workstream [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.atlassian.com/work-management/project-collaboration/cross-functional-teams>

8. Barzegkar-Ntovom G.A., Chatzigeorgiou N.G., Nousedilis A.I., Vomva S.A., Kryonidis G.C., Kontis E.O., Georghiou G.E., Christoforidis G.C., Papagiannis G.K. Assessing the viability of Battery Energy Storage Systems coupled with Photovoltaics under a pure self-consumption scheme [Электронный ресурс] // arXiv preprint arXiv:1910.07576. – 2019. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1910.07576>.

9. Ben, H., Walker, S., Desnerck, P. The impact of adaptive thermal comfort on energy savings in office buildings under various insulation levels. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2024. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.aceee.org/sites/default/files/proceedings/ssb24/pdfs/20240722160753690_c8db75b9-1515-4d99-acc2-80516b5777b3.pdf

10. Bouygues Construction. (2021). Sustainable construction and digital innovation: Annual Report. Paris: Bouygues Group.

11. Building automation systems for energy and comfort management in green buildings. – ScienceDirect, 2023. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123001570>

12. Building Information Modeling (BIM) in Green Building [Электронный ресурс] // Wikipedia. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Building_information_modeling_in_green_building

13. Building Management System (BMS) – an In-Depth Overview: Understanding BMS, Its Operation, Necessity, and the Role of IoT [Электронный ресурс] / ResearchGate. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/389945488_Building_Management_System_BMS_an_In-Depth_Overview_Understanding_BMS_Its_Operation_Necessity_and_the_Role_of_IoT

14. Chandan, V. Decentralized Thermal Control of Buildings [Дисертація]. arXiv preprint, 2021. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2110.13654>

15. CIM.io. (2025, April 5). What is a Building Energy Management System (BEMS)? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cim.io/blog/building-energy-management-systems-bems>
16. City Information Modeling (CIM): Ultimate Guide 2024 [Электронный ресурс] // Neuroject. – Режим доступа: <https://neuroject.com/city-information-modeling/>
17. Ciupu, R., Badea, A. A., Ionescu, C. C., Mihai, F. C., & Frunzulica, F. (2021). Key performance indicators for the evaluation of building indoor air temperature control in a context of demand side management: An extensive analysis for Romania. *Journal of Building Engineering*, 42, 102781. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/349632859>
18. Delacroix, M. *Multifactor Analysis in Adaptive Energy Verification*. Paris: L'Harmattan, 2022.
19. Doyle, S. *Real-Time Digital Twins for Energy-Aware Construction*. London: Routledge, 2022.
20. Duran, J. *Multilevel Structures in Energy Verification Systems*. Bordeaux: Presses Universitaires de Bordeaux, 2022.
21. Dusty Robotics. *A Complete Guide to Digital Twins in Construction* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dustyrobotics.com/articles/a-complete-guide-to-digital-twins-in-construction>
22. *Energy Efficiency in Commercial Buildings*. ESRU, MSc thesis. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2004/elsadig.pdf
23. *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)* [Электронный ресурс] // European Commission. – Режим доступа: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en.
24. European Parliamentary Research Service (EPRS). *Digital Twins: Ethical challenges and socio-economic implications: study*. – Luxembourg: European Union, 2021. – 88 p. – [Electronic resource]. – Access mode:

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU\(2021\)697184_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU(2021)697184_EN.pdf)

25. Ferguson, D. Stochastic Dynamics in Smart Building Energy Systems. New York: Routledge, 2022.

26. Fernandez N., Katipamula S., Wang W., Taasevigen D., Haack J., & Xie Y. (2020). Innovations in Sensors and Controls for Building Energy Management. National Renewable Energy Laboratory (NREL). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75601.pdf>

27. Fournier, S. Response Dynamics in Adaptive Energy Platforms. Lyon: Éditions Techniques, 2023.

28. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research: монографія. – Newcastle: Newcastle University, 2019. – 35 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1911.01276>

29. Geissbauer, R., Schrauf, S., Koch, V., & Kuge, S. (2016). Industry 4.0: Building the digital enterprise.

30. Gonzalez, L. Information Redundancy and Efficiency in Digital Control Systems. Madrid: Universidad Complutense Press, 2022.

31. Gu, Zhenhong. Approaches to Energy Efficient Building Development – Studying under Chinese Contexts. Licentiate Thesis, КТН, 2007. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A12731/FULLTEXT01.pdf>

32. Hassel, M. Cyber-Physical Cognitive Systems for Dynamic Energy Adaptation in Smart Buildings [Електронний ресурс]: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії. – University of Technology Sydney, 2022. – 250 с. – Режим доступу: <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/167745/2/02whole.pdf>

33. Holbert C. What is a Building Energy Management System (BEMS)? [Електронний ресурс] // CIM.io. – 2025. – Режим доступу: <https://www.cim.io/blog/building-energy-management-systems-bems>.

34. International Energy Agency (IEA). (2022). Digital demand-driven management in construction: Integrating dashboards for energy transparency. Paris: IEA Publications.
35. ISO 50002:2014. Energy audits — Requirements with guidance for use [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/60088.html>.
36. Jebelli H., Asadi S., Mutis I., Liu R., Cheng J. Digital Twins in Construction and the Built Environment [Электронный ресурс]. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2025. – 320 с. – Режим доступа: <https://sp360.asce.org/PersonifyEbusiness/Merchandise/Product-Details/productId/315539151>
37. Kenneth Warren. Optimizing Energy Efficiency in Building Design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/382142928_Optimizing_Energy_Efficiency_in_Building_Design.
38. Kermani M., Adelmanesh B., Shirdare E., Sima C.A. Intelligent energy management based on SCADA system in a real microgrid for smart building applications [Электронный ресурс] // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 171. – P. 1115–1127. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121003566>
39. Kleissl J., Agarwal Y. Cyber-physical energy systems: focus on smart buildings [Электронный ресурс] // Proceedings of the 47th Design Automation Conference (DAC), Anaheim, California, USA, July 13–18, 2010. – Режим доступа: https://www.academia.edu/12123837/Cyber_physical_energy_systems_focus_on_smart_buildings
40. Kramer, F. Resonance Phenomena in Digital Energy Platforms. Berlin: Springer, 2021.
41. Larsen, H. Multi-Channel Communication and Adaptive Control in Construction Platforms. Copenhagen: Nordic Academic Press, 2023.

42. Law No. 2118-VIII on energy efficiency of buildings [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://climate-laws.org/document/law-no-2118-viii-on-energy-efficiency-of-buildings_0259.
43. Lean Construction Institute. PDCA (Plan, Do, Check, Adjust) – Lean Construction Institute [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://leanconstruction.org/lean-topics/pdca/>
44. LEED rating system [Електронний ресурс] // U.S. Green Building Council. – Режим доступу: <https://www.usgbc.org/leed>.
45. Lemaitre, F. Knowledge Bases for Evolutionary Modernization of Building Systems. Paris: Dunod, 2023.
46. Longo F., Nicoletti L., Padovano A. Smart operators in Industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context [Електронний ресурс] // arXiv. – 2022. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2206.00104>
47. Mangate L.D., Alabdeli H., Agarwal R. et al. Adaptive Energy Management System for Enhancing Efficiency and Reliability in Hybrid Renewable Energy Systems. – E3S Web of Conferences, 2024. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459101015>
48. Marsh A. Thermal Comfort and Air Quality Control in UK Student Accommodation: Towards a model of user behavior regarding the manual control of windows in office buildings [Електронний ресурс] // University College London. – 2021. – Режим доступу: https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10126809/1/2021-04-27%20-%20AnthonyMarsh%20-%20PhD_Thesis.pdf
49. Mazowiecka Uczelnia Publiczna w Płocku. Zbiór materiałów konferencji naukowej. Część 2: materiały konferencji. – Płock: MUP, 2023. – 144 s. – [Elektroniczny zasób]. – Tryb dostępu: https://mans.edu.pl/fcp/iOEUFz9BjEkLTg1Y1BSe0N_YAVTHwIIIOgIaTAIABC RvRQMEOjBBaHICPXNtSBk6PjIyBV4RBDYnD1cYTk8cOjYCEg/2/public/wydawnictwa/zbor_materialow_konferencji_czesc_2.pdf
50. Merabet G.H., Essaaidi M., Ben Haddou M., et al. Intelligent Building Control Systems for Thermal Comfort and Energy Efficiency: A Systematic Review

of AI Assisted Techniques. – arXiv, 2021. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2104.02214>

51. Moreau, O. Long-Term Metrics of Modernization in Construction Energy Systems. Marseille: Éditions Universitaires, 2023.

52. Müller, J. Emergent Behaviors in Cognitive Energy Platforms. Munich: De Gruyter, 2023.

53. National Institutes of Health (NIH), Office of Research Facilities. Digital Twins Part 2: Enabling Technologies and Challenges: технічний бюлетень. – Bethesda: NIH, 2021. – 12 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://orf.od.nih.gov/TechnicalResources/Documents/Technical%20Bulletins/21TB/Digital%20Twins%20Part%202%20%20Enabling%20Technologies%20and%20Challenges%20December%202021%20Technical%20Bulletin_508.pdf

54. Nguyen, T. A. Energy Adaptive Buildings: From Sensor Data to Being Aware of Users [Дисертація]. University of Groningen, 2015. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://research.rug.nl/files/26443426/Complete_thesis.pdf

55. Ożadowicz A., Grela J. Impact of Building Automation Control Systems on Energy Efficiency – University Building Case Study. – ResearchGate, 2017. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://surl.li/nxdmmy>

56. Pearce A.R., Vanegas J.A. Defining sustainability for built environment systems: An operational framework [Электронный ресурс] // ResearchGate. – 2002. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228548777_Defining_sustainability_for_built_environment_systems_An_operational_framework

57. Qolomany, B., Al-Fuqaha, A., Gupta, A., Benhaddou, D., Alwajidi, S., Qadir, J., & Fong, A. C. (2019). Leveraging Machine Learning and Big Data for Smart Buildings: A Comprehensive Survey. arXiv preprint arXiv:1904.01460.

58. Renault, A. Strategic Assets of Verification in Construction Companies. Marseille: Presses Académiques, 2023.

59. Richard Martin. Green Building Certifications and Sustainable Design [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.propulsiontechjournal.com/index.php/journal/article/download/8783/5474/14899>.

60. Rojas, V. Adaptive Infrastructural Nodes in Smart Energy Platforms. Barcelona: UPC Press, 2023.

61. Salerno, I., Anjos, M. F., McKinnon, K. I. M., Gomez-Herrera, J. A. Adaptable Energy Management System for Smart Buildings. Journal of Building Engineering, 2021, 44:102748. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/351940645_Adaptable_Energy_Management_System_for_Smart_Buildings

62. Schmidt M., Åhlund C. Smart buildings as Cyber Physical Systems: Data driven predictive control strategies for energy efficiency. – arXiv, 2018. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1807.06084>

63. Sen, M.G. BIM and Energy Efficiency: Digital Transformation and Sustainability in Architecture [Электронный ресурс] // Architecture Applications. – 2024. – С. 53–83. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/382142928_BIM_and_Energy_Efficiency_Digital_Transformation_and_Sustainability_in_Architecture.

64. Shaviv, E., & Yezioro, A. (2021). Smart energy management dashboards: Visualization strategies for adaptive decision-making in construction projects. Automation in Construction, 127.

65. Shi F., Yang J., Ran L., Wang W. Adaptive Real-Time Convergence Estimation for Enhancing Reliability of Time Synchronization in Distributed Energy Monitoring System [Электронный ресурс] // Electronics. – 2025. – Vol. 14, No. 9. – Article 1836. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/9/1836>

66. Siemens AG. (2025). Lifecycle Twin | Building X - Siemens Xcelerator Global. Отримано 3

<https://xcelerator.siemens.com/global/en/products/buildings/building-x/solutions/applications/lifecycle-twin.html>

67. Uusitalo P., Peltokorpi A., Seppänen O., Alhava O. Towards systemic transformation in the construction industry: a complex adaptive systems perspective [Электронный ресурс] // Construction Innovation. – 2024. – Режим доступа: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ci-01-2024-0015/full/html>

68. Very Technology. Not Just Smart but Strategic: Why Predictive Maintenance Benefits Smart Buildings. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.verytechnology.com/insights/not-just-smart-but-strategic-why-predictive-maintenance-benefits-smart-buildings>
69. Wilkinson, A. Hierarchical Energy Models in Smart Construction Platforms. Oxford: Oxford University Press, 2021.
70. William Stewart. Integrating Renewable Energy Systems in Building Projects [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/373895611_Integrating_Renewable_Energy_Systems_in_Building_Projects.
71. Бахтін, Д.С. Принципи формування об'ємно-просторової організації енергоефективних громадських будівель. – Одеса: ОДАБА, 2023. [Електронний ресурс] – <https://uacademic.info/ua/document/0823U101952>
72. Богуцький, С. *Сутність та структура проекту як ключового об'єкта проектного менеджменту в публічному управлінні. Науковий вісник державного управління, 2023.* [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/372880304_SUTNIST_TA_STRUKTURA_PROEKTU_AK_KLUCOVOGO_OB%2%80%99EKTA_PROEKTNOGO_MENEDZMENTU_V_PUBLICNOMU_UPRAVLINNI
73. Буклет «Енергоефективність у будівництві» – CGPinfo Україна. [Електронний ресурс] – https://www.sgpinfo.org.ua/sites/default/files/pdf/buklet_energoefekt_bud3_compressed_1.pdf
74. Бурлак, Г. М. Енергозбереження в архітектурі та містобудуванні. – Одеса: ОДАБА, 2023. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://odaba.edu.ua/upload/files/191_ABSnm_Energozberezhennya_v_arhitekturi_ta_mistobuduvanni.pdf
75. Бурмака, В., Тарасенко, М., Козак, К., Бурмака, О., Сабат, Н. Energy efficiency of modernization of translucent building envelope structures. – Тернопіль: ТНТУ, 2021. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2021/dec/25986/jeeecs-07-02-2021-paper02.pdf>

76. Говоров П. П., Харченко В. Ф., Говоров В. П. *Автоматизація керування режимами міських електричних мереж*. Монографія, ХНУМГ (2017). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.li/vxdngt>
77. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_2_6-31-2021.pdf.
78. Денисюк, С. П. *Формування політики підвищення енергоефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири*. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2013, № 2. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/8867644a-f12f-44b8-a964-5820a2d15888/download>
79. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Електронне видання для підприємств: інструменти енергоефективності в промисловості та АПК – кращі рішення. – Київ, 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/>
80. ДСТУ EN ISO 50001:2022. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=103350.
81. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1818-20>. Закон України+1 Закон України+1
82. Карюк, А. М., Міщенко, Р. А., Пенц, В. Ф., Щепак, В. В. *Енергоефективність будівель у країнах Євросоюзу та Україні*. – Полтава: ПолтНТУ, 2019. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolntNTU/13325/1/znp%201-52-2019_%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%8E%D0%BA.pdf
83. Кравченко І. В. Банківське зелене кредитування як ключовий інструмент екологічної модернізації економіки [Електронний ресурс] // *Фінансово-кредитна діяльність: проблеми теорії та практики*. – 2025. – Т. 2 (61). – С. 54–66. – Режим доступу: <https://www.fkd.net.ua/index.php/fkd/article/download/4651/4319>

84. Кузнєцова, Я.Ю. Архітектурне формоутворення природоінтегрованих об'єктів. – Харків: ХНУМГ ім. Бекетова, 2020. [Електронний ресурс] – <https://surl.li/udoaap>
85. Куліков П.М., Плоский В.О. Пріоритети організації наукової діяльності в КНУБА: енергоефективність об'єктів будівництва / П.М. Куліков, В.О. Плоский // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2015. – Вип. 7. – С. 131–134. – Режим доступу: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/5458>
86. Купрієвич В.О. *Енергозбереження в будівництві: формування нової генерації спеціалістів*. Стаття (2025). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.li/htgfgp>
87. Лір, В.Е. *Енергонезалежність України: досягнення та перспективи*. *Економіка і прогнозування*, 2016, № 2. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://eip.org.ua/docs/EP_16_2_110_uk.pdf
88. Метанчук Б.Р. Семантичний аналіз поняття енергоефективності та енергозбереження в будівництві [Електронний ресурс] // Ефективна економіка. – 2025. – № 4. – Режим доступу: <https://www.nayka.com.ua/index.php/ee/article/download/6300/6377/14057>.
89. Назаренко І.І., Берник І.М., Кузьмінець М.П., Онищенко А.М. Технічні основи створення машин: Підручник [Електронний ресурс]. – К.: Видавництво «Людмила», 2018. – 307 с. – Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/naukovi-publikaci%D1%97-kafedri-motp/>
90. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». *Програма науково-практичної конференції молодих учених XIII – 2024*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2024. – 56 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/01/Programka-2024.pdf>
91. Овчаренко Е.О. Магістерська дисертація (КПІ): «Енергоефективність будівель у системі національного законодавства». – КПІ, 2019. [Електронний ресурс] – <https://ela.kpi.ua/bitstreams/0c388b7a-d24a-49a4-8eac-315c1de7d683/download>

92. Програма розвитку ООН в Україні. Підтримка розвитку ринку зелених облігацій в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-12/Supporting%20Green%20Bond%20Development%20for%20Ukraine2_%D0%A3%D0%9A%D0%A0.pdf

93. Проект Закону України №10393 «Про внесення змін до деяких законів України щодо регулювання повноважень центральних органів виконавчої влади у сфері забезпечення енергоефективності» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eba.com.ua/en/advocacy-diary/progress/544026-2024-03-26-13-42/>.

94. Рулов, Д.Є. *Формування та розвиток державної політики енергозбереження в Україні* [Магістерська робота]. Полтавська політехніка, 2021. [Електронний ресурс] – <https://lnk.ua/CUCjgM5Gy>

95. Степанець О. В. *Моделювання динамічних режимів систем теплозабезпечення будівель*. Монографія КПІ (2024). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/fe06d0ea-713a-47ca-9e5d-1b93e5c1b546>

96. Тетерев В.О. *Автоматизація систем обліку та аналіз енергоспоживання в будівництві*. Дисертація (2024). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.lu/aklzxr>

97. ТОВ «Офіс сталих рішень». Інструменти енергоефективності в промисловості та АПК: кращі рішення. – Київ: GIZ, 2024. – 88 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ukraine-oss.com/wp-content/uploads/2024/09/draft-posibnyka_energoefektyvnist_web-1.pdf

98. Чичуліна, К. В., Биба, В. В., Мінняйленко, І. В., Скриль, В. В. *Виклики енергоефективності: співпраця України з ЄС* – Кривий Ріг: НУ «КПІ», 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolntNTU/10931/1/navchalnii-posibnik-vikliki-energoefektivnosti-2020.pdf>

99. Якунчикова Д. О. Дослідження архітектурно-функціональних характеристик систем електропостачання будівель у зв'язку з їх енергоефективністю. Магістерська дисертація КПІ (2024). [Електронний

ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/519768dd-81ed-4ef1-b2d7-833bd11b91dd/download>

100. Соболь Д.В. Цифрові інструменти моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2025. – № 2(56). – С. 14–27. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).14-27](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).14-27) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348040/334962>

101. Чуприна Ю., Соболь Д., Сібіковський О., Педько Ю. Систематизація базових дефініцій стосовно формування концептуально-теоретичного базису інформаційного забезпечення процесів організації будівництва // Будівельне виробництво. – 2025. – № 78. – С. 39–50. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.39-50> Посилання: <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/521/253> (Особистий внесок здобувача полягає у систематизації та формалізації дефініцій і концептуальних положень інформаційного забезпечення організації будівництва з урахуванням цифровізації та автоматизації управлінських процесів)

102. Соболь Д.В. Архітектура технічних рішень для проєктів із підвищеними вимогами до енергоефективності // Управління розвитком складних систем. – 2025. – № 64. – С. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.206-216> Посилання: <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-64/206-216.pdf>

103. Козак А.А., Соболь Д.В., Молодько О.В., Боштан А.В. Еволюція підходів до оцінки ефективності будівельно-інвестиційних проєктів // Просторовий розвиток. – 2025. – № 13. – С. 308–323. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.13.308-323> Посилання: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2513.pdf> (Особистий внесок здобувача полягає в удосконаленні науково-методичного підходу оцінювання функціональної ефективності будівельно-інвестиційних проєктів із урахуванням ризиків, цифрової трансформації та стратегічного управління).

104. Соболь Д.В. Організаційно-технічні моделі реалізації проєктів з

підвищеною енергетичною адаптивністю в умовах індустріалізації будівництва // Просторовий розвиток. – 2025. – № 15. – С. 482–492. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.482-492> Посилання: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2515.pdf>

105. Сібіковський О., Сокуров А., Коваленко В., Соболев Д. Інноваційний принцип трансформацій суб'єктів інвестування та будівництва через сучасні методи реінжинірингу // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2025. – № 1(55). – С. 148–166. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).148-166](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).148-166) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/326942/316774> (Особистий внесок здобувача полягає у розвитку підходів до реінжинірингу процесів у будівництві та інвестуванні через інтеграцію ВІМ, цифрових технологій і методів стратегічного управління).

106. Тугай О., Горбач М., Малихін М., Соболев Д., Дегтярьова І. Оцінка ефективності удосконалених інструментів проведення організаційної підготовки зосередженого будівництва // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2022. – № 1(50). – С. 93–100. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(1\).93-100](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(1).93-100) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/269170/264660> (Особистий внесок здобувача полягає у удосконаленні інструментів організаційної підготовки будівництва на основі інформаційного та геоінформаційного моделювання для підвищення ефективності процесів).

107. Козак А., Соболев Д., Данілов С., Оксенчук Р., Шаршун Ф. Концептуалізація енергоадаптивних будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2022. – № 2(49). – С. 305–319. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).305-319](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).305-319) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342154/330046> (Особистий внесок здобувача полягає у концептуалізації енергоадаптивних будівельних проєктів із урахуванням принципів сталого розвитку, цифрової трансформації, ВІМ та енергозбереження).

108. Соболь Д.В. Розгортання управлінських структур та ролей у впровадженні енергоадаптивних будівельних програм // Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України: матеріали круглого столу. – Київ: КНУБА, 2023. – С. 25. <https://lnk.ua/FL4IPeGIId>

109. Соболь Д.В. Інтеграція будівельних процесів із системами контролю та автоматизації енергоспоживання // Енергоощадні машини і технології: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КНУБА, 2024. – С. 44. <https://lnk.ua/wmbp18Yos>

110. Соболь Д.В., Поліщук О.В. Цифрові технології та інструменти моніторингу в управлінні енергоадаптивними проектами у ущільненій забудові // Проблеми генезису економіки інтелектуально-інноваційного капіталу: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КНУБА, 2025. – С. 857–860. https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5_11_2025.pdf

111. Соболь Д.В. Організаційно-технологічне та цифрове забезпечення інструментального моніторингу енергоадаптивних будівельних проєктів // Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України: матеріали VIII Міжнар. конф. – Київ: Ліра-К, 2025. – С. 742–744 <https://repository.knuba.edu.ua/items/d0b87d1f-fb32-4375-8961-42e490aeda9b>

112. Соболь Д.В., Коломієць В.В. Цифровий та організаційно-технічний інструментарій оптимізації енергоадаптивних будівельних проєктів // Архітектура, будівництво, дизайн: виробництво, інформатизація, менеджмент: матеріали Міжнар. наук.-техн. форуму. – Київ: Ліра-К, 2025. – С. 526–527. <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

ДОДАТОК А. ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ



ІНСТИТУТ МІСЦЕВОГО РОЗВИТКУ
КОНСУЛЬТАТИВНІ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ЕКСПЕРТНІ ПОСЛУГИ

тел.: (044) 428-76-10
вул. Нікочей Ван, 15, офіс 403, м. Київ, 04071

Вих.№ 13-1 від «_10_»_01_2026 р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Соболя Дениса Валерійовича «Інструментарій організаційно-технічного забезпечення та цифрового супроводу енергоадаптивних проєктів».

Практичні завдання будівельних та девелоперських компаній у сфері енергоадаптивного будівництва часто ускладнюються обмеженими ресурсами, складними енергетичними умовами, ризиками та високими вимогами до цифрової інтеграції процесів. Ці виклики вдалося ефективно подолати завдяки активній участі Інституту місцевого розвитку у впровадженні наукових розробок здобувача КНКБА Соболя Дениса Валерійовича, що дозволило оптимізувати процеси, підвищити точність управління та значно підвищити енергоефективність реалізованих проєктів.

Розробки автора дозволили щодо ряду енергоадаптивних проєктів раціоналізувати ключові організаційно-технологічні параметри. Зокрема, у проєкті «Рівервіль» (м. Ужгород) та проєкті «SMART ENERGY» (встановлення сонячних панелей на будівлях Ужгородської міської багатoproфільної клінічної лікарні), де Інститут виступав учасником як генеральний проєктувальник, терміни узгодження проєктно-кошторисної документації скорочено відповідно на 1,5 та 2,1 місяця. Бюджети проєктів зменшено на 3,4 % та 4,06 %, а рівень відповідності європейським енергетичним стандартам у будівництві суттєво підвищено.

Наукові напрацювання Соболя Д.В. визначили енергоадаптивних проєкти як стратегічний напрям будівельної галузі, що поєднує екологічну, економічну та соціальну ефективність. Розроблено науково обґрунтований інструментарій цифрового супроводу та організаційно-технологічного управління, який інтегрує сучасні цифрові платформи, аналітичні системи та стандартизовані методики організації робіт, забезпечуючи оптимізацію процесів за обмежених ресурсів та підвищення мобільності й безпеки будівництва.

Сформовано цифрову енергоадаптивних організаційно-технологічну модель, що поєднує детальне планування та цифрову координацію, забезпечує точність розрахунків, підвищує гнучкість управління та енергоефективність на всіх етапах життєвого циклу. Модель забезпечує синергію між замовниками, підрядниками, постачальниками та

девелоперами, дозволяє прогнозувати ризики, раціонально розподіляти функції та адаптувати процеси у реальному часі.

Автором обгрунтовано і практикою співпраці здобувача з Інститутом доведено ефективність інтеграції пасивних і активних стратегій проектування, де пасивні рішення формують базову енергетичну стабільність, а активні системи забезпечують адаптивне реагування в режимі реального часу. Використання цифрових інструментів забезпечило прозорість енергетичного контуру, прогнозування навантажень та моделювання сценаріїв, що дозволило знизити витрати на обслуговування, оптимізувати енергоспоживання та підвищити частку відновлюваних джерел енергії.

За підсумками співпраці Інституту із здобувачем КНУБА та автором роботи Соболев Д.В. виявлено, що створено принципово новий концепт цифрової організації та підготовки будівництва, що забезпечує перехід від традиційних моделей управління до формалізованого, діджитал-орієнтованого та енергоефективного формату реалізації інвестиційно-будівельного циклу. Запропоновано цифрово-керовану мережеву модель нового покоління, яка інтегрує BIM-аналітику, автоматизований моніторинг і параметричне планування, формує цифровий простір комунікацій та дозволяє відтворювати сценарії управління будівництвом у режимі енергоадаптації.

Принципового вдосконалення зазнали архітектоніка та функціональна концепція організаційно-технічних моделей, конструктив та аналітичний каркас мережевої моделі, а також критерійно-оцінювальний апарат вибору організаційних рішень, що забезпечило прогнозування результатів, підвищення стійкості та ефективності девелоперських моделей.

Отже, практична цінність дослідження підтверджена успішним впровадженням інструментарію у проєктах «Рівервіль» та «SMART ENERGY», що засвідчує високу прикладну значимість та готовність розробок до широкого застосування у будівельній галузі. Це, у свою чергу, підтверджує фахову компетентність здобувача та його відповідність рівню «доктора філософії» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Виконавчий директор
Інституту місцевого розвитку
д.е.н., доцент



Руслан Тормосов

ТОВ «Марстон-груп»

04655, Україна, м.Київ, вулиця Глибочицька, будинок 72 ,оф. 309.

12.11.2025 №192/1

**ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗДОБУВАЧА
НАУКОВОГО СТУПЕНЯ Д.В. СОБОЛЯ В ПРАКТИКУ ДІЯЛЬНОСТІ
ТОВ «МАРСТОН-ГРУП».**

Здобувач КНУБА, Денис Валерійович Соболя, у 2024–2025 рр. плідно співпрацював з нашою компанією, яка в якості провідного виконавця (генерального підрядника) реалізовувала проекти ЖК «Сучасний» (м. Мукачеве, вул. Івана Магрітича, 39) та ЖК «Будапешт-Дрім» (м. Мукачеве, вул. Ілонги Зріні, 67), що готувалися нашою компанією під орудою замовника проєктів.

Зважаючи на зростаючі вимоги до енергоощадності проєктів та ефективності процесів організації будівництва, наша компанія, яка вже давно співпрацює з КНУБА, успішно застосувала наукові напрацювання здобувача КНУБА Дениса Валерійовича Соболя, що були використані як опорні при підготовці дисертації на здобуття наукового ступеня «Доктор філософії».

У практичній діяльності компанії було застосовано два ключові науково-прикладні результати з доробку Дениса Соболя:

- інструментарій організації будівництва та будівельного девелопменту, налаштований з урахуванням особливостей енергоадаптованих проєктів;
- алгоритм організаційно-технологічної та функціональної трансформації процесів організації будівництва та середовища будівельного девелопменту, адаптований для енергоадаптованих проєктів

У компанії «Марстон-Груп» впровадження розробок Соболя Д.В. продемонструвало суттєві переваги створеного цифрово-керованого інструментарію моделювання організації будівництва на основі удосконаленої енергоадаптованої моделі нового покоління. Інструментарій поєднує мережеві моделі типу «роботи–вершини», моделі енергоаудиту, PLM-моделі та принципи інтегрованої реалізації проєкту, що забезпечує повну цифрову керованість процесів від проєктування до експлуатації. Його застосування дозволяє формувати віртуальні цифрові двійники енергоощадних об'єктів із синхронізацією рішень між усіма стейкхолдерами та підвищує прозорість, адаптивність і результативність процесів у рамках концепції Construction 5.0. Завдяки цьому вдалося чітко формалізувати та зробити прозорими рішення щодо функціональної взаємодії

компанії з замовником і іншими учасниками проекту, створити гібридну цифрову модель участі будівельної компанії в інтегрованому циклі реалізації проекту та оцінювати ступінь досягнення запланованих показників розвитку підприємства протягом його життєвого циклу. Інструментарій, впроваджений у практику компанії, підтвердив свою ефективність у підвищенні якості управління, скороченні ризиків та оптимізації ресурсів у процесах енергоадаптивного будівництва.

Впровадження алгоритму організаційно-технологічної та функціональної трансформації процесів будівництва, розробленого Денисом Собоєм, відкрило новий рівень ефективності та прозорості в реалізації енергоадаптивних проєктів. Алгоритм дозволяє комплексно аналізувати енергетичні та ресурсні потреби проєкту, формувати цифрову організаційно-технологічну модель із BIM, аналітичними системами та цифровим плануванням, а також прогнозувати життєвий цикл будівель з точним обліком енергоспоживання, потоків ресурсів і потенційних ризиків. Впроваджена багатовимірна система КРІ забезпечує контроль енергетичних, економічних, технічних і екологічних показників, а поєднання пасивних і активних стратегій гарантує стабільність та адаптивність будівельних систем у реальному часі. Цифрове моделювання сценаріїв управління, оптимізація енергетичних потоків і раціоналізація організаційно-технологічних процедур скорочують терміни узгодження проєктно-кошторисної документації, підвищують точність рішень і ефективність взаємодії замовників, підрядників та постачальників. Створення цифрових двійників будівель дозволяє відтворювати поведінку об'єктів, прогнозувати ризики та адаптувати процеси до європейських стандартів енергоефективності. Практична реалізація алгоритму підвищує результативність, адаптивність та конкурентоспроможність девелоперських компаній, підтверджуючи, що розробка Д.В. Соболя є стратегічним інструментом модернізації сучасного будівельного середовища та інноваційного управління енергоефективними проєктами.

Практичне впровадження наукових доробок здобувача КНУБА Соболя Д.В. демонструє високий рівень його науково-прикладної підготовки, професійну компетентність та здатність реалізовувати складні інноваційні рішення, що повністю відповідає стандартам кваліфікаційного рівня «Доктора філософії» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Директор



Олександр МІРОНОВ



№338-1Н від 19.09.2025р.

**Про впровадження наукових результатів здобувача КНУБА
Соболя Д.В. у практику діяльності компанії «Альфа-Сервіс».**

Повідомляємо, що протягом 2024–2025 рр. компанія «Альфа-Сервіс» активно співпрацювала зі здобувачем КНУБА Денисом Валерійовичем Собоєм у рамках підготовки дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Під час цієї співпраці було впроваджено його інноваційні науково-прикладні розробки, які дозволили оптимізувати організаційно-технологічні процеси та цифровий супровід будівельних проєктів.

Для реалізації будівельного проєкту ДК «Фемілі Плаза-2», вул. Юліана Пелеша, 4а, де компанія виступала генеральним підрядником, були застосовані розробки Соболя Д.В., що забезпечили:

- цифрово-керований інструментарій організації будівництва, який поєднує мережеві моделі «роботи–вершини», моделі енергоаудиту, PLM-моделі та принципи інтегрованого управління проєктом;
- формування багаторівневої цифрової моделі життєвого циклу об'єкта, що дозволяє прогнозувати енергоспоживання, планувати потоки ресурсів та управляти ризиками на всіх етапах;
- створення віртуальних цифрових двійників будівель із синхронізацією рішень усіх стейкхолдерів, підвищуючи прозорість, адаптивність та ефективність процесів будівництва;
- впровадження KPI та багатовимірної системи оцінки ефективності, що контролює енергетичні, економічні, технічні та екологічні показники проєкту;
- оптимізацію організаційно-технологічних процедур, скорочення термінів узгодження та підвищення точності проєктно-кошторисних рішень;
- ефективну координацію взаємодії замовника, підрядників та постачальників у межах будівельного девелопменту.

Практичне застосування цих наукових результатів підтвердило їх високу ефективність, дозволило підвищити енергоефективність, скоротити строки реалізації та забезпечити відповідність сучасним європейським стандартам. Впровадження інструментарію Дениса Соболя продемонструвало його значний внесок у підвищення якості управління будівельними процесами та розвиток енергоадаптованих рішень.

Загалом, досвід співпраці зі здобувачем свідчить про високий науково-прикладний рівень підготовки та повну відповідність кваліфікаційним вимогам рівня «доктора філософії» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Заступник директора
компанії



Алла КРАВЧЕНКО

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах

1. Соболь Д.В. Цифрові інструменти моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2025. – № 2(56). – С. 14–27. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).14-27](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).14-27) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348040/334962>
2. Чуприна Ю., Соболь Д., Сібіковський О., Педько Ю. Систематизація базових дефініцій стосовно формування концептуально-теоретичного базису інформаційного забезпечення процесів організації будівництва // Будівельне виробництво. – 2025. – № 78. – С. 39–50. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.39-50> Посилання: <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/521/253> (Особистий внесок здобувача полягає у систематизації та формалізації дефініцій і концептуальних положень інформаційного забезпечення організації будівництва з урахуванням цифровізації та автоматизації управлінських процесів)
3. Соболь Д.В. Архітектура технічних рішень для проєктів із підвищеними вимогами до енергоефективності // Управління розвитком складних систем. – 2025. – № 64. – С. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.206-216> Посилання: <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-64/206-216.pdf>
4. Козак А.А., Соболь Д.В., Молодько О.В., Боштан А.В. Еволюція підходів до оцінки ефективності будівельно-інвестиційних проєктів // Просторовий розвиток. – 2025. – № 13. – С. 308–323. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.13.308-323> Посилання: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2513.pdf> (Особистий внесок здобувача полягає в удосконаленні науково-методичного підходу оцінювання функціональної ефективності будівельно-інвестиційних проєктів із урахуванням ризиків, цифрової трансформації та стратегічного управління).
5. Соболь Д.В. Організаційно-технічні моделі реалізації проєктів з

підвищеною енергетичною адаптивністю в умовах індустріалізації будівництва // Просторовий розвиток. – 2025. – № 15. – С. 482–492. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.482-492> Посилання: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2515.pdf>

6. Сібіковський О., Сокуров А., Коваленко В., Соболев Д. Інноваційний принцип трансформацій суб'єктів інвестування та будівництва через сучасні методи реінжинірингу // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2025. – № 1(55). – С. 148–166. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).148-166](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).148-166) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/326942/316774> (Особистий внесок здобувача полягає у розвитку підходів до реінжинірингу процесів у будівництві та інвестуванні через інтеграцію ВІМ, цифрових технологій і методів стратегічного управління).

7. Тугай О., Горбач М., Малихін М., Соболев Д., Дегтярьова І. Оцінка ефективності удосконалених інструментів проведення організаційної підготовки зосередженого будівництва // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2022. – № 1(50). – С. 93–100. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(1\).93-100](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(1).93-100) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/269170/264660> (Особистий внесок здобувача полягає у удосконаленні інструментів організаційної підготовки будівництва на основі інформаційного та геоінформаційного моделювання для підвищення ефективності процесів).

8. Козак А., Соболев Д., Данілов С., Оксенчук Р., Шаршун Ф. Концептуалізація енергоадаптивних будівельних проєктів у контексті сталого розвитку, регуляторного поля та цифрової трансформації // Шляхи підвищення ефективності будівництва. – 2022. – № 2(49). – С. 305–319. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).305-319](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).305-319) Посилання: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342154/330046> (Особистий внесок здобувача полягає у концептуалізації енергоадаптивних будівельних проєктів із урахуванням принципів сталого розвитку, цифрової трансформації, ВІМ та енергозбереження).

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:
тези доповідей на конференціях*

9. Соболь Д.В. Розгортання управлінських структур та ролей у впровадженні енергоадаптивних будівельних програм // Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України: матеріали круглого столу. – Київ: КНУБА, 2023. – С. 25. <https://lnk.ua/FL4IPeGIId>

10. Соболь Д.В. Інтеграція будівельних процесів із системами контролю та автоматизації енергоспоживання // Енергоощадні машини і технології: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КНУБА, 2024. – С. 44. <https://lnk.ua/wmbp18Yos>

11. Соболь Д.В., Поліщук О.В. Цифрові технології та інструменти моніторингу в управлінні енергоадаптивними проектами у ущільненій забудові // Проблеми генезису економіки інтелектуально-інноваційного капіталу: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КНУБА, 2025. – С. 857–860. https://cf.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/01/Konference-program-KNUCA-4-5_11_2025.pdf

12. Соболь Д.В. Організаційно-технологічне та цифрове забезпечення інструментального моніторингу енергоадаптивних будівельних проектів // Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України: матеріали VIII Міжнар. конф. – Київ: Ліра-К, 2025. – С. 742–744 <https://repository.knuba.edu.ua/items/d0b87d1f-fb32-4375-8961-42e490aeda9b>

13. Соболь Д.В., Коломієць В.В. Цифровий та організаційно-технічний інструментарій оптимізації енергоадаптивних будівельних проектів // Архітектура, будівництво, дизайн: виробництво, інформатизація, менеджмент: матеріали Міжнар. наук.-техн. форуму. – Київ: Ліра-К, 2025. – С. 526–527. <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>