

## АНОТАЦІЯ

**Федорченко М.А.** Інтелектуальна інформаційна система підтримки вибору альтернатив енергоощадних будівель з використанням штучного інтелекту. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 - «Інформаційні системи та технології». Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2026.

Дисертацію присвячено формуванню науково-методичних та прикладних методів вдосконалення і адаптації інтелектуальних інформаційних систем для вибору оптимальних альтернатив енергоощадних будівель, на ґрунті інтегрованого застосування штучного інтелекту, багатофакторного аналізу та локалізованих показників енергоефективності.

**Наукова новизна роботи** полягає у формуванні цифрового аналітичного простору та прикладного інструментарію для вибору альтернатив енергоощадних будівель з використанням штучного інтелекту, BIM-технологій, інтелектуальних аналітичних систем та автоматизованого виявлення енергетичних загроз упродовж життєвого циклу об'єкта.

### ***Вперше розроблено:***

- *інтелектуальну інформаційну систему автоматизованого керування процесами забезпечення енергоефективності будівель, у якій BIM-середовище реалізує функцію інтегратора єдиного цифрового простору, акумулювання та обміну даними між усіма стейкхолдерами проекту, а підсистема штучного інтелекту виступає аналітичним ядром підтримки рішень. Система побудована на принципах мікросервісної архітектури з API-взаємодією та централізованим адмініструванням параметрів енергоефективності, що забезпечує масштабованість та інтероперабельність компонентів протягом життєвого циклу об'єкта;*

- *адаптивну модель багатокритеріального вибору архітектурно-інженерних рішень із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки (fuzzy logic), нейронних мереж та методів опорних векторів (SVM), яка забезпечує*

формування раціональних параметрів у складних умовах багатофакторної невизначеності; на ґрунті IoT-компонентів, теплотехнічного моделювання та методів машинного навчання реалізовано когнітивну систему, здатну до самонавчання й прогнозування параметрів проєктування. Модель формує та реалізує нову парадигму когнітивно-керованого проєктування, що поєднує локальні показники енергоспоживання з глобальними критеріями техніко-економічної ефективності;

***удосконалено:***

- *інструментарій візуалізації енергетичних моделей та структуру цифрового аналітичного простору, що забезпечує аргументоване ухвалення проєктних рішень у процесі енергоефективного проєктування. Аналітичний простір реалізовано як інтегроване цифрове середовище, яке об'єднує BIM-моделі, алгоритми ШІ, засоби енергомоніторингу та DSS-модулі в єдиному інтелектуальному контурі аналізу;*

- *підхід до інтеграції теплотехнічного моделювання у BIM-середовище, що надає можливість здійснювати динамічний аналіз теплових режимів будівель на всіх етапах життєвого циклу, підвищуючи точність оцінювання енергетичних характеристик. Удосконалення передбачає використання просторово-геоприв'язаних даних (PostGIS) та взаємодію з BIM-серверами для синхронізації розрахункових і проєктних параметрів у реальному часі;*

***набули подальшого розвитку:***

- *концептуальні засади формування формалізованого простору проєктування, який враховує показники енергоефективності, внутрішню термодинаміку будівлі та зовнішні кліматичні впливи, що забезпечує комплексну оцінку ризиків і підвищує точність оптимізації рішень. Розширення підходу полягає у врахуванні сценаріїв багатофакторних загроз і адаптивному коригуванні параметрів моделі на основі прогнозних алгоритмів машинного навчання;*

- науково-прикладні положення автоматизованого виявлення енергетичних загроз і сценаріїв критичних впливів, зумовлених експлуатаційними та зовнішніми чинниками. Суттєво оновлено механізмів ранньої діагностики відхилень енергоспоживання на основі аналізу потокових IoT-даних та інтелектуальної класифікації ризиків.

### **Основний зміст дисертаційної роботи.**

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми підвищення ефективності проектування енергоощадних будівель шляхом створення інтелектуальної інформаційної системи підтримки рішень, що побудована на глибокій інтеграції BIM-технологій, інструментів штучного інтелекту та методів енергомодельовання. У межах дослідження сформовано методологічне підґрунтя для побудови формалізованого простору проектування, що враховує термодинамічні, конструктивні та кліматичні чинники. Розроблені алгоритми дозволяють здійснювати багатокритеріальний аналіз альтернативних архітектурно-інженерних рішень, моделювати теплопровідність і прогнозувати енергетичні втрати будівель з високою точністю. Практична реалізація запропонованої системи створює передумови для автоматизації процесів енергомодельовання, виявлення загроз енергоефективності та формування оптимальних рішень у цифровому середовищі проектування будівель.

*Провідна наукова інновація* полягає у розробці комплексної моделі адаптивного багатокритеріального вибору архітектурних і технічних рішень на ґрунті інтелектуальних алгоритмів нечіткої логіки, глибинних нейронних мереж та методів опорних векторів (Support Vector Machines, SVM), інтегрованих у BIM-середовище. Обґрунтовано концепцію формалізованого адміністрування досягнення цільових параметрів енергоефективності із застосуванням мікросервісної архітектури та модульної IT-інфраструктури. Запропонована система створює цифровий аналітичний простір, здатний до самонавчання та адаптації, що забезпечує динамічний моніторинг, прогнозування та оптимізацію енергетичних характеристик будівель

протягом усього життєвого циклу. Це відкриває нові можливості для практичного впровадження інтелектуальних технологій у сферу проєктування та керування енергоефективністю об'єктів будівництва.

За результатами дослідження виконано наступне:

1. Створено аналітичний простір для комплексної оцінки рівня енергоефективності будівель із використанням цифрових моделей, експертних систем та програмних модулів, що дозволяють прогнозувати тепловтрати, адаптивно моделювати огорожувальні конструкції та здійснювати індикативну оцінку ефективності енерговитрат. Проведена апробація підтвердила високу точність та надійність запропонованих рішень.

2. Запропоновано функціональну архітектуру інформаційного середовища для підтримки процесів енергоефективного проєктування, побудовану на мікросервісній структурі, що забезпечує масштабованість, автоматизацію та самонавчання на основі реальних даних енергоаудиту, інтегруючи цифрові моделі BIM та алгоритми штучного інтелекту в єдину систему підтримки рішень.

У першому розділі дисертаційної роботи *«Систематизація інформаційних технологій та їхніх компонент в контексті пошуку та вибору альтернатив проєктування енергоощадних будівель»* здійснено систематизацію інформаційних технологій та їхніх компонентів у контексті пошуку і вибору альтернатив проєктування енергоощадних будівель. Проведено опрацювання понятійного апарату щодо сумісного застосування штучного інтелекту та ІТ як теоретичного підґрунтя для обґрунтованого вибору проєктних рішень з раціональними енергетичними характеристиками. Розглянуто засади, візуально-графічні та інструментальні можливості BIM-технологій та інших ІТ-компонентів для автоматизації процесів проєктування у циклі підготовки проєктів енергоефективних будівель. Окремо сформульовано постановку задачі дослідження та наукову гіпотезу щодо доцільності інтеграції ІІІ у BIM-середовище для підвищення адаптивності та варіативності проєктних рішень. За результатами теоретичного аналізу сформовано системне уявлення про понятійно-категоріальний апарат

цифрового проектування, взаємозв'язки між інформаційними технологіями, ІІ, ВІМ, концепцією цифрового двійника та емерджентністю як властивістю цифрового середовища. Обґрунтовано зміну парадигми сучасного архітектурного проектування - від лінійного до адаптивного когнітивно-керованого процесу. Доведено роль ВІМ як інтегративної платформи для взаємодії геометричних моделей, інженерних даних, аналітичних блоків ІІ та сенсорної інформації ІоТ. Запропоновано підходи до вимірювання емерджентності та систематизовано інструментальні, візуальні й аналітичні компоненти ВІМ-середовища. Визначено наукову гіпотезу та ключові дослідницькі завдання, структуровано систему підзадач, що забезпечують формалізований вибір проектних альтернатив з урахуванням енергоефективності. Результати розділу 1 слугують теоретичним та методологічним підґрунтям для побудови аналітико-функціонального середовища та розробки цифрових прототипів у наступних розділах дисертації.

У другому розділі дисертації *«Методичні та функціонально-технічні компоненти застосування інформаційних технологій для автоматизованого проектування енергоефективних будівель»* комплексно обґрунтовано та реалізовано методичні, математичні та техніко-функціональні основи застосування інформаційних технологій для автоматизованого проектування енергоефективних будівель із застосуванням штучного інтелекту та ВІМ. Сформульовано та апробовано інтегрований когнітивно-еволюційний підхід (ІКЕП), який об'єднує глибоке навчання, еволюційні алгоритми, нечітку логіку та Байєсові мережі для багатокритеріального аналізу і прогнозування енергоспоживання, оцінки ризиків та генерації оптимальних архітектурних рішень. Розроблено чітку структуру вхідних параметрів на ґрунті ВІМ-моделі, що охоплює геометричні, конструктивні, інженерні та експлуатаційні характеристики будівлі, формуючи простір ознак для побудови моделей прогнозування енергоспоживання. Математичні формалізації глибокої нейронної мережі, стохастичного градієнтного спуску та функцій втрат (MSE, MAE, Huber) забезпечують високу точність та узагальненість моделей. Запропоновано та протестовано еволюційні алгоритми (NSGA-II та PSO) для

вибору оптимальних конфігурацій проєктних рішень за багатьма критеріями з урахуванням техніко-економічних, енергетичних та комфортних параметрів, а також реалізовано моделі на ґрунті нечіткої логіки для роботи в умовах невизначеності. Інновацією є використання Байєсових мереж для оцінки ризиків, що дозволяє враховувати ймовірнісну природу ризиків у процесі вибору проєктного рішення. Інтеграція цих підходів здійснена в рамках архітектури AI-BIM Regulatory Intelligence, яка забезпечує автоматизовану нормативну валідацію, генерацію проєктних альтернатив, їх багатокритеріальне ранжування та візуалізацію в середовищі Revit. Створено прототип мінімально життєздатного продукту (Minimum Viable Product, MVP), який слугує інструментом для архітекторів, інженерів, експертів та освітніх установ, є адаптованим до українського нормативного контексту та підтверджує практичну цінність запропонованої системи.

**У третьому розділі** дисертації *«Аналітико-прикладне забезпечення та спрямування ШІ на вибір варіантів енергоефективності будівель»* комплексно розглянуто аналітико-прикладні аспекти впровадження штучного інтелекту у процеси проєктування, аналізу та оптимізації енергоефективних будівель. Показано застосування можливостей ШІ для формалізованого розв'язання задач теплопровідності під час підготовки циклу проєктів енергоощадних будівель, що забезпечує врахування геометричних, матеріальних, кліматичних та експлуатаційних параметрів одночасно. Розроблено інтегрований аналітичний простір для виявлення сукупного рівня енергоефективності будівлі, який дозволяє об'єднати дані з BIM-моделей, сенсорних мереж та цифрових паспортів об'єктів. Формалізовано процесуальні та експертні компоненти цифрового простору, що забезпечують надійний стан будівлі щодо енергоефективності та адаптивне коригування проєктних рішень відповідно до змін у середовищі та експлуатаційних режимах. Особливу увагу приділено створенню моделі DNN (Deep Neural Network), навченої на підставі реальних даних енергоаудитів і симуляцій BIM, що дозволяє швидко оцінювати ефективність огорожувальних конструкцій з високою точністю ( $MAE < 5,2 \text{ Вт/м}^2$ ) та інтегрувати результати в цифрові двійники будівель. Запропоновано

процедури оптимізації теплоізоляційних матеріалів з використанням генетичних алгоритмів (GA) та нечіткої логіки (Fuzzy Logic), що скорочують час проєктування і підвищують точність ухвалення рішень. Розроблено підходи до прогнозування теплових втрат у динамічному часовому контексті, включно з сезонними змінами, кліматичними сценаріями (RCP 4.5/8.5) та умовами експлуатації будівлі. Для цього застосовані гібридні моделі LSTM/GRU та Prophet, що дозволяють передбачати зміну тепловтрат  $Q(t)$  на 3–5 років уперед, визначати періоди пікових втрат та критичні зони фасаду.

У четвертому розділі дисертації *«Реалізація моделі та експериментальні дослідження»* подано концепцію побудови інтегрованого аналітичного простору, який поєднує BIM, сенсорні дані, III та модулі ухвалення рішень. Інформаційна система виконує функцію як розрахунково-аналітичного ядра, так і когнітивного інструменту керування енергоефективністю, що підтримує динамічний моніторинг у реальному часі, 3D-візуалізацію даних та формування сукупного індексу енергоефективності (SBEI). Розроблена інформаційна система реалізована як модульно-інтегрована структура, де компоненти взаємодіють через уніфіковані потоки даних. Циклічний потік інформації від Revit, сенсорів та симуляторів - до аналітичних модулів, системи підтримки рішень (Decision Support System, DSS) та візуалізації - зворотньо впливає на адаптацію та повторне навчання моделей. Урахування українських нормативів, кліматичних особливостей і житлової забудови забезпечує високий рівень адаптації системи, позиціонуючи її як унікальне рішення для національного ринку автоматизованого енергоефективного проєктування та цифрового керування будівлями.

**Ключові слова:** інтелектуальна інформаційна система (ИС), мікросервісна архітектура, модель DNN, цифровий двійник, BIM, штучний інтелект, машинне навчання, глибинні нейронні мережі, нечітка логіка, багатокритеріальний аналіз, модульно-інтегрована структура, цифровий енергоаудит будівлі.

## ABSTRACT

***Fedorchenko M.A. Intelligent information system for supporting the selection of energy-saving building alternatives using artificial intelligence.*** - Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 126 - "Information Systems and Technologies". Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the formation of scientific, methodological and applied methods for improving and adapting intelligent information systems for selecting optimal alternatives for energy-saving buildings, based on the integrated application of artificial intelligence, multifactor analysis and localized energy efficiency indicators.

**The scientific novelty of the work lies** in the formation of a digital analytical space and applied tools for selecting alternatives for energy-efficient buildings using artificial intelligence, BIM technologies, intelligent analytical systems and automated detection of energy threats throughout the life cycle of the object.

**For the first time, the following was developed:**

- an intelligent information system for automated control of processes for ensuring energy efficiency of buildings, in which the BIM environment implements the function of an integrator of a single digital space, accumulation and exchange of data between all project stakeholders, and the artificial intelligence subsystem acts as an analytical core for decision support. The system is built on the principles of microservice architecture with API interaction and centralized administration of energy efficiency parameters, which ensures scalability and interoperability of components throughout the life cycle of the object.

- an adaptive model of multi-criteria selection of architectural and engineering solutions using fuzzy logic algorithms, neural networks and support vector methods (SVM), which ensures the formation of rational parameters in complex conditions of multifactor uncertainty; based on IoT components, thermal modeling and machine learning methods, a cognitive system capable of self-learning and forecasting design parameters has been implemented. The model

forms and implements a new paradigm of cognitively guided design, which combines local energy consumption indicators with global criteria of technical and economic efficiency.

**Improved:**

- the visualization tools of energy models and the structure of the digital analytical space, which ensures the reasoned adoption of design decisions in the process of energy-efficient design. The analytical space is implemented as an integrated digital environment that combines BIM models, AI algorithms, energy monitoring tools and DSS modules in a single intelligent analysis circuit.

- an approach to integrating thermal modeling into the BIM environment, which provides the ability to perform dynamic analysis of thermal regimes of buildings at all stages of the life cycle, increasing the accuracy of energy performance assessment. The improvement involves the use of spatially georeferenced data (PostGIS) and interaction with BIM servers to synchronize design and design parameters in real time.

**The following have been further developed:**

- conceptual principles for forming a formalized design space that takes into account energy efficiency indicators, internal thermodynamics of the building and external climatic influences, which provides a comprehensive risk assessment and increases the accuracy of solution optimization. The approach is expanded to include multifactor threat scenarios and adaptive adjustment of model parameters based on predictive machine learning algorithms;

- scientific and applied provisions for automated detection of energy threats and critical impact scenarios caused by operational and external factors. The mechanisms for early diagnosis of energy consumption deviations based on analysis of streaming IoT data and intelligent risk classification have been significantly updated.

**The main content of the dissertation work.**

The dissertation work is devoted to solving the scientific and applied problem of increasing the efficiency of designing energy-efficient buildings by creating an intelligent information system for decision support, which is built on the deep integration of BIM technologies, artificial intelligence tools and energy

modeling methods. Within the framework of the research, a methodological basis has been formed for building a formalized design space that takes into account thermodynamic, structural and climatic factors. The developed algorithms allow for multi-criteria analysis of alternative architectural and engineering solutions, modeling thermal conductivity and predicting energy losses of buildings with high accuracy. The practical implementation of the proposed system creates the prerequisites for automating energy modeling processes, identifying energy efficiency threats and forming optimal solutions in the digital environment of building design.

*The leading scientific innovation* is the development of a comprehensive model of adaptive multi-criteria selection of architectural and technical solutions based on intelligent fuzzy logic algorithms, deep neural networks and support vector machines (SVM) methods integrated into the BIM environment. The concept of formalized administration of achieving target energy efficiency parameters using microservice architecture and modular IT infrastructure is substantiated. The proposed system creates a digital analytical space capable of self-learning and adaptation, which provides dynamic monitoring, forecasting and optimization of energy characteristics of buildings throughout the entire life cycle. This opens up new opportunities for the practical implementation of intelligent technologies in the field of design and management of energy efficiency of construction facilities.

According to the results of the study, the following was accomplished:

1. An analytical space was created for a comprehensive assessment of the energy efficiency of buildings using digital models, expert systems and software modules that allow predicting heat loss, adaptively modeling enclosing structures and carrying out an indicative assessment of the efficiency of energy consumption. The testing confirmed the high accuracy and reliability of the proposed solutions.

2. A functional architecture of the information environment was proposed to support energy-efficient design processes, built on a microservice structure that provides scalability, automation and self-learning based on real energy audit data, integrating BIM digital models and artificial intelligence algorithms into a single decision support system.

**In the first section** of the dissertation work “Systematization of information technologies and their components in the context of searching for and selecting alternatives for designing energy-efficient buildings”, a systematization of information technologies and their components in the context of searching for and selecting alternatives for designing energy-efficient buildings was carried out. The conceptual apparatus for the joint use of artificial intelligence and IT as a theoretical basis for a well-founded choice of design solutions with rational energy characteristics was studied. The principles, visual-graphic and instrumental capabilities of BIM technologies and other IT components for automating design processes in the cycle of preparing projects for energy-efficient buildings were considered. The research problem statement and a scientific hypothesis were separately formulated regarding the feasibility of integrating AI into the BIM environment to increase the adaptability and variability of design solutions. Based on the results of theoretical analysis, a systematic understanding of the conceptual and categorical apparatus of digital design, the relationships between information technologies, AI, BIM, the concept of a digital twin, and emergence as a property of the digital environment has been formed. The paradigm shift in modern architectural design is justified - from a linear to an adaptive cognitively guided process. The role of BIM as an integrative platform for the interaction of geometric models, engineering data, analytical AI blocks, and IoT sensor information has been proven. Approaches to measuring emergence have been proposed and the instrumental, visual, and analytical components of the BIM environment have been systematized. A scientific hypothesis and key research tasks have been determined, and a system of subtasks has been structured that provide a formalized selection of design alternatives taking into account energy efficiency. The results of section 1 serve as a theoretical and methodological basis for building an analytical and functional environment and developing digital prototypes in the following sections of the dissertation.

**In the second section** of the dissertation “Methodological and functional-technical components of the application of information technologies for automated design of energy-efficient buildings”, the methodological, mathematical and technical-functional foundations of the application of information technologies for

automated design of energy-efficient buildings using artificial intelligence and BIM are comprehensively substantiated and implemented. An integrated cognitive-evolutionary approach (ICEA) has been formulated and tested, which combines deep learning, evolutionary algorithms, fuzzy logic and Bayesian networks for multi-criteria analysis and forecasting of energy consumption, risk assessment and generation of optimal architectural solutions. A clear structure of input parameters has been developed on the basis of the BIM model, which covers the geometric, structural, engineering and operational characteristics of the building, forming a feature space for building energy consumption forecasting models. Mathematical formalizations of deep neural networks, stochastic gradient descent and loss functions (MSE, MAE, Huber) provide high accuracy and generalizability of models. Evolutionary algorithms (NSGA-II and PSO) have been proposed and tested to select optimal configurations of design solutions according to many criteria, taking into account technical and economic, energy and comfort parameters, and fuzzy logic models have been implemented for working under uncertainty. The innovation is the use of Bayesian networks for risk assessment, which allows taking into account the probabilistic nature of risks in the process of choosing a design solution. The integration of these approaches is carried out within the framework of the AI-BIM Regulatory Intelligence architecture, which provides automated regulatory validation, generation of design alternatives, their multi-criteria ranking and visualization in the Revit environment. A prototype of a Minimum Viable Product (MVP) has been created, which serves as a tool for architects, engineers, experts, and educational institutions, is adapted to the Ukrainian regulatory context, and confirms the practical value of the proposed system.

The **third section** of the dissertation, “Analytical and applied support and direction of AI for the selection of energy efficiency options for buildings,” comprehensively considers the analytical and applied aspects of implementing artificial intelligence in the processes of design, analysis and optimization of energy-efficient buildings. The application of AI capabilities for the formal solution of thermal conductivity problems during the preparation of the design cycle of energy-efficient buildings is shown, which ensures that geometric,

material, climatic and operational parameters are taken into account simultaneously. An integrated analytical space has been developed to identify the overall level of energy efficiency of a building, which allows combining data from BIM models, sensor networks and digital passports of objects. The procedural and expert components of the digital space have been formalized, ensuring a reliable state of the building in terms of energy efficiency and adaptive adjustment of design solutions in accordance with changes in the environment and operational modes. Particular attention is paid to the creation of a DNN (Deep Neural Network) model trained on the basis of real data from energy audits and BIM simulations, which allows for rapid assessment of the efficiency of building envelopes with high accuracy ( $MAE < 5.2 \text{ W/m}^2$ ) and integration of the results into digital twins of buildings. Procedures for optimizing thermal insulation materials using genetic algorithms (GA) and fuzzy logic (Fuzzy Logic) are proposed, which reduce design time and increase the accuracy of decision-making. Approaches to predicting heat losses in a dynamic time context are developed, including seasonal changes, climate scenarios (RCP 4.5/8.5) and building operating conditions. For this purpose, hybrid LSTM/GRU and Prophet models are used, which allow predicting the change in heat loss  $Q(t)$  for 3–5 years in advance, determining peak loss periods and critical facade zones.

**The fourth section** of the dissertation, "Model Implementation and Experimental Studies," presents the concept of building an integrated analytical space consisting of BIM, sensor data, AI, and decision-making modules. The information system functions as both a computational and analytical core and a cognitive energy efficiency management tool that supports dynamic real-time monitoring, 3D data visualization, and the formation of a cumulative energy efficiency index. The developed information system is implemented as a modular-integrated structure, where components interact through unified data flows. The cyclical flow of information from Revit, sensors, and simulators to analytical modules, a decision support system (DSS), and visualization has a negative effect on the adaptation and retraining of models. Taking into account Ukrainian

standards, climatic features, and residential development provides a high level of system adaptation, positioning it as a unique solution for the national market of automated energy-efficient design and digital building management.

**Keywords:** intelligent information system (IIS), microservice architecture, DNN model, digital twin, BIM, artificial intelligence, machine learning, deep neural networks, fuzzy logic, multi-criteria analysis, modular-integrated structure, digital energy audit of a building.