УДК 332.87, 69.009.001.573, 004.9
JEL Q410, Q550, L740
ORCID ID: 0000-0003-0764-9630
DOI https://doi.org/10.17721/tppe.2024.49.14

Піменов С., PhD,
Здобувач ступеня доктора наук, Економічний
факультет, Вища Школа Безпеки та
Економіки, Пловдів, Болгарія
Sedj78@gmail.com

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЦИФРОВІЗАЦІЯ: ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ДЕФІЦИТУ

На тлі глобальних викликів, таких як геополітична нестабільність, екологічні загрози та соціальні кризи, енергетична система України опинилася під безпрецедентним тиском, що вимагає тактичного реагування на руйнування енергетичної інфраструктури, а також довгострокових стратегічних рішень для забезпечення її стійкості та енергоефективності. Наразі зусилля держави зосереджені на оперативних заходах, зокрема відновленні пошкоджених електростанцій, підтримці децентралізованих джерел енергії та залученні іноземної допомоги для покриття сезонних потреб. Однак, попри наявні національні програми, зокрема Національний план з енергоефективності, існує низка невирішених аспектів, що потребують деталізації та адаптації до поточних умов. Зокрема, не вистачає конкретних кроків для інтеграції децентралізованих джерел у будівельні проекти, гнучких механізмів роботи під час руйнувань інфраструктури, а також стимулів для широкого використання зелених технологій у масовій забудові.

Дослідження спрямоване на аналіз можливостей і викликів щодо підвищення енергоефективності українського будівельного сектору за допомогою інноваційних рішень, таких як штучний інтелект (ШІ), машинне навчання (МН), цифрові двійники та екологічні матеріали. У роботі застосовані методи контент-аналізу, порівняльного та ситуаційного аналізу, а також експертного оцінювання для визначення практичних рекомендацій як для будівельних компаній, так і для урядових структур. Результати свідчать, що найефективнішими в умовах війни є технології, які підвищують автономність та стійкість будівель, зокрема цифрові двійники та інтернет речей (IoT). Масштабніші рішення, такі як розумні енергоефективні будівлі, потребують іноземних інвестицій і можуть бути реалізовані в післявоєнний період. Впровадження ШІ та МН не лише підвищує енергоефективність, а й сприяє зниженню вуглецевого сліду, що має позитивний вплив на екологію та сприяє адаптації до змін клімату.

Ключові слова: Енергетичний дефіцит, Енергоефективність будівель, Цифровізація, Штучний інтелект, AI, Україна, Будівельна галузь, Вуглецевий слід, Цифрові двійники, Інтернет речей, IoT

Постановка проблеми. Енергетична система України сьогодні опинилася під безпрецедентним тиском, що ставить під загрозу її життєво важливі функції. Постійні масовані атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури, зокрема теплоелектростанції, гідроелектростанції та інші критичні елементи, призводять до значних втрат енергопотужностей. За оцінками на вересень 2024 року, внаслідок цих ударів країна втратила близько 9 гігават електричної потужності, що становить половину від необхідного рівня для зимового періоду [1]. Відновлення пошкоджених об'єктів ускладнюється через регулярні атаки та обмежений доступ до необхідних ресурсів і технологій. Без кардинальних змін у підходах до енергоефективності й цифровізації країна може зіткнутися з критичними дефіцитами електроенергії, особливо в пікові періоди споживання, такі як зима.

На сьогодні Україна зосереджена на термінових тактичних діях для відновлення зруйнованої енергетичної інфраструктури. За підтримки Європейського Союзу та інших міжнародних партнерів реалізуються проекти з ремонту пошкоджених електростанцій, облаштування пунктів обігріву та розширення децентралізованих джерел енергії. Наприклад, ЄС виділив 160 млн євро на підготовку до зими, частина яких спрямовується на встановлення сонячних електростанцій і тимчасових генераторів [2]. Також планується збільшити обсяги імпорту електроенергії на 2 гігавата, що дозволить забезпечити до 12% зимового енергоспоживання України [3]. Однак, попри цю допомогу, енергосистема залишається вкрай вразливою перед ризиком повторних атак.

Ці виклики потребують не лише тактичного реагування, але й стратегічного підходу, який включатиме цифрові інновації для підвищення енергоефективності, особливо у будівельному секторі, що включає цифровізацію та підвищення енергоефективності будівель. Це не тільки зменшить залежність від централізованих джерел енергії, але й скоротить загальне споживання в умовах постійних загроз для інфраструктури.

Аналіз останніх публікацій. В Україні діє кілька стратегічних програм для енергоефективності та енергозбереження на державному рівні. Основним документом є *Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року*. Цей план визначає ключові кроки для досягнення енергоефективної трансформації економіки та скорочення викидів парникових газів. У плані передбачено зменшення викидів на 65% від рівня 1990 року та досягнення частки відновлюваних джерел на рівні 27% від загального кінцевого енергоспоживання [4]. Крім того, уряд прагне посилити диверсифікацію джерел енергопостачання та знизити залежність від імпорту енергоносіїв.

Також варто відзначити *Фонд енергоефективності*, який з 2024 року розпочав активну підтримку енергомодернізації та відновлення пошкоджених об'єктів. Фонд надає фінансову та технічну підтримку для впровадження заходів з енергоефективності, особливо в житловому секторі, та співпрацює з міжнародними організаціями, такими як Європейський Союз та ПРООН, для залучення інвестицій та технологій [5].

Окрім цього, у межах *Національного плану з енергетики та клімату* (НПЕК), схваленого у 2024 році, передбачено розвиток децентралізованих джерел енергії, що має підвищити енергетичну незалежність України та зробити систему менш уразливою до атак. НПЕК став важливою частиною євроінтеграційного процесу України, оскільки він відповідає європейським регламентам та має залучити значні інвестиції на відновлення і модернізацію енергетичної інфраструктури країни [6].

Невирішені частини проблеми. Незважаючи на існуючі стратегічні програми на державному рівні, з урахуванням розгортання технологій Четвертої індустріальної революції, важливо розуміти конкретні кроки реалізації цих програм, а також визначити, яку саме користь можуть принести нові технології для українського ландшафту в умовах обмежених фінансових, енергетичних і людських ресурсів під час воєнного та післявоєнного стану. Таким чином, основні невирішені питання, які слід відзначити:

– *Недостатня інтеграція стратегії децентралізації енергопостачання в будівельні проекти.* Хоча Національний план з енергетики та клімату (НПЕК) передбачає розвиток децентралізованих джерел енергії, на рівні будівельного сектору бракує чітких рекомендацій для інтеграції таких рішень у нові будівельні проекти та реконструкцію існуючих об'єктів. Це обмежує можливості для підвищення автономності будівель та їх стійкості до зовнішніх атак.

– *Відсутність адаптивних механізмів для роботи в умовах постійних руйнувань інфраструктури.* Сучасні стратегії та плани енергоефективності України зосереджені на довгостроковій перспективі, але вони потребують додаткових рішень для функціонування в умовах постійних загроз. Будівлі в умовах руйнувань потребують гнучких, адаптивних технологій, що дозволять підтримувати оптимальне енергоспоживання та комфорт за умови порушення централізованого енергопостачання.

– *Недостатнє залучення зелених технологій та матеріалів у масовій забудові.* Хоча уряд підтримує використання відновлюваних джерел енергії, а стратегії включають декарбонізацію, існує брак стимулів та нормативної бази для широкого застосування зелених матеріалів і технологій у нових житлових та комерційних забудовах. Це обмежує енергоефективність будівель та їхню екологічну стійкість, особливо на рівні окремих домогосподарств.

– *Недостатній рівень інтеграції технологій штучного інтелекту та машинного навчання.* Хоча програма передбачає використання децентралізованих джерел, ідея застосування ШІ та МН для моніторингу й прогнозування енергоспоживання залишається недостатньо вивченою на рівні державної стратегії. Це стримує можливості для підвищення ефективності енергетичних систем будівель та оптимізації їх використання в умовах нестабільного енергозабезпечення.

Ці аспекти потребують подальшої розробки та конкретних практичних рішень, що дозволять створити більш адаптивні, автономні й енергоефективні будівлі, здатні протистояти сучасним викликам.

Мета статті. Метою статті є дослідження основних викликів та можливостей для підвищення енергоефективності будівельної галузі України в умовах воєнного та післявоєнного стану. Для досягнення мети в дослідженні вирішуються наступні завдання: По-перше, визначимо конкретні кроки для інтеграції нових технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання, децентралізовані системи енергопостачання та зелені матеріали в будівельні проекти. По-друге, проаналізуємо адаптивні рішення, які могли б забезпечити стійкість будівель в умовах обмежених ресурсів і підвищеного ризику руйнувань інфраструктури. По-третє, сформуємо рекомендації для впровадження інноваційних рішень, що сприятимуть підвищенню енергетичної автономності та стійкості будівельної галузі України у довгостроковій перспективі.

Ця мета та завдання дозволять науково обґрунтувати необхідність трансформації будівельної галузі України відповідно до вимог сучасних викликів, забезпечуючи стійкість та енергонезалежність інфраструктури.

Методи дослідження. Дослідження здійснено шляхом комплексного аналізу наукових праць і звітів з питань енергоефективності, зелених технологій та інновацій у будівельній галузі. Основна увага була приділена виявленню інсайтів і узагальнень щодо застосування штучного інтелекту, машинного навчання, цифрових двійників, IoT та інших технологій для потенційного застосування в будівельному секторі України. У дослідженні застосовано низку наукових методів і підходів:

– *Метод контент-аналізу* використовувався для систематичного аналізу наукових джерел з тематики енергоефективності та зелених технологій. Застосування цього методу дало можливість виявити ключові напрямки досліджень, що стосуються прогнозування енергоспоживання, оптимізації систем вентиляції, використання адаптивних матеріалів і децентралізованих систем енергопостачання.

– *Метод групування та систематизації* було використано для класифікації наукових робіт за основними напрямками, виділеними у попередньому аналізі. Це дозволило створити узагальнене бачення поточних підходів і технологічних рішень, що є основою для подальших інсайтів і їх застосування до українського контексту.

– *Методи порівняльного та ситуаційного аналізу* були застосовані для оцінки можливостей впровадження міжнародного досвіду в українському контексті. За допомогою порівняльного аналізу було виявлено найбільш релевантні для України технологічні рішення, а ситуаційний аналіз дозволив оцінити їх застосовність в умовах поточних викликів - руйнувань інфраструктури, обмежених ресурсів і підвищених ризиків для централізованих енергетичних систем.

– *Методи експертного оцінювання та системного аналізу* були використані для розробки практичних рекомендацій. Експертне оцінювання дозволило визначити пріоритетність та реалістичність впровадження різних технологічних рішень, а системний аналіз забезпечив комплексний підхід до формування рекомендацій для українських будівельних компаній та державних органів. На основі цих методів було розроблено рекомендації щодо впровадження адаптивних систем управління енергоспоживанням, децентралізованих енергорішень та інноваційних зелених технологій, спрямованих на підвищення стійкості будівель до сучасних викликів.

Результати дослідження. Розглянемо останній ключові світові тренди в енергоефективності, які використовуючи штучний інтелект, інтернет речей та машинне навчання, підвищують ефективність будівельної галузі.

1. Сталий розвиток будівництва та зелені технології для підвищення енергоефективності. Останні дослідження підтверджують зростання значущості сталого будівництва та зелених технологій як інструментів у боротьбі з кліматичними змінами та для підвищення енергоефективності будівель. Цифровізація й активне застосування штучного інтелекту та машинного навчання сприяють створенню прогнозних моделей, що дозволяють оптимізувати енергоспоживання, особливо в умовах урбанізації та явища міських теплових островів (UHI). Використання комбінації фізичної симуляції та ШІ дозволяє більш точно передбачати енергетичні потреби в різних кліматичних сценаріях,

що підвищує не лише енергоефективність, але й забезпечує комфортний тепловий режим у приміщеннях [7].

Серед головних завдань сталого будівництва — інтеграція технологій МН та багатокритеріальної оптимізації для поліпшення енергетичної продуктивності будівель та зменшення їх вуглецевого сліду. Такі технології стають особливо актуальними на тлі змін клімату, які вимагають адаптивних рішень для забезпечення сталого теплового комфорту у міських середовищах. За останні п'ять років застосування ШІ та МН для моделювання та прогнозування енергоспоживання у великих містах набуло великого поширення, оскільки цей підхід дозволяє точніше передбачати майбутні потреби у енергоресурсах та знижувати витрати енергії [7].

2. Моделювання та прогнозування енергоспоживання. Моделювання систем опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC) за допомогою нейронних мереж відіграє важливу роль у підвищенні енергоефективності будівель і забезпеченні комфортного мікроклімату для користувачів. Використання моделей на основі ШІ дозволяє передбачати роботу HVAC-систем і адаптувати їх до специфічних умов навколишнього середовища, що значно знижує енергоспоживання. Наприклад, дослідження показують, що моделі МН, застосовані для прогнозування кліматичних умов, можуть бути надзвичайно корисними для проектування енергоефективних конструкцій, здатних протистояти кліматичним змінам і забезпечувати стабільний комфорт для мешканців [8, 9].

Особлива увага приділяється механізмам оптимізації теплообміну, прогнозування теплового навантаження та підвищення рівня комфорту у будівлях [10, 11]. Сучасні методи машинного навчання, такі як CNN-LSTM, ефективно моделюють теплову динаміку будівель та оптимізують HVAC-системи, що дозволяє знизити енергоспоживання на 15,7–22,3% [12]. Моделі градієнтного бустингу, зокрема LightGBM, CatBoost та XGBoost, забезпечують точне прогнозування енергоспоживання у офісних будівлях та пропонують ефективні рішення для підвищення енергоефективності [13].

3. Цифрові двійники та IoT для підвищення енергоефективності будівель. Цифрові двійники й Інтернет речей відіграють ключову роль у прогнозуванні й оптимізації енергоефективності будівель. Ці технології дозволяють проводити моніторинг та управління енергетичними системами в реальному часі, що сприяє створенню більш стійкого та екологічно безпечного міського середовища. Використання цифрових двійників дозволяє інтегрувати фактичні дані для підвищення експлуатаційної ефективності та зменшення витрат на енергоресурси, що є важливим кроком до екологічної стійкості будівель [14].

Крім того, цифрові двійники в поєднанні з IoT надають унікальні можливості для управління теплообміном у будівлях і підвищення їхньої енергоефективності. Наприклад, застосування предиктивних моделей, таких як LSTM (Long Short-Term Memory) і фільтр Калмана, забезпечує точне прогнозування енергоспоживання завдяки аналізу часових рядів даних та оптимізації енергетичних процесів [15, 16]. Такі технології відкривають нові перспективи для сталого будівництва, особливо в умовах невизначеності, пов'язаної зі змінами клімату [17].

Важливим напрямом досліджень є застосування автономних агентів машинного навчання та адаптивних систем, які навчаються на основі реальних даних. Це дозволяє суттєво підвищити енергоефективність будівель, що демонструється у роботах, де ШІ та

система управління на основі мережі Петрі оптимізують термодинамічні параметри будівель, наприклад, вибір типу вікон і ізоляційних матеріалів [18]. Застосування цифрових двійників і багатокритеріальної оптимізації дозволяє більш точно моделювати енергетичні характеристики будівель, пропонуючи ефективні рішення для підвищення їх енергоефективності [19, 20].

Цей підхід сприяє створенню адаптивних і стійких систем, які здатні швидко реагувати на зміни кліматичних умов і знижувати енергоспоживання, забезпечуючи тривалу економічну та екологічну вигоду для будівельної галузі України.

4. Використання екологічних матеріалів та зелених технологій. Розвиток сталого будівництва й інтеграція зелених технологій є важливими елементами у підвищенні енергоефективності будівель, зокрема для зменшення їхнього вуглецевого сліду. Основні напрями досліджень включають широкий спектр тем, від фізичного моделювання до застосування штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування й оптимізації енергоспоживання [21].

Дослідження демонструють ефективність використання ШІ для проектування зелених будівель у сферах, які потребують особливої уваги до екологічної чистоти матеріалів та енергоспоживання під час експлуатації. Застосування методів, як-от випадкові ліси та оптимізація за допомогою алгоритмів мурах, підтверджують актуальність автоматизованих систем управління енергією та матеріалами у будівництві [22].

Інноваційні підходи у використанні адаптивних матеріалів, таких як фазоперехідні матеріали (PCM) та аерогелі, дозволяють значно підвищити теплову ефективність будівель. Наприклад, у роботі описано застосування системи, що складається з 10% полікарбонату та 90% алюмінію, яка виявилась більш енергоефективною у порівнянні з використанням лише одного матеріалу, що значно скорочує енергоспоживання на опалення та охолодження [23].

Цифровізація всіх етапів життєвого циклу будівлі, від проектування до експлуатації, стає важливим інструментом для підвищення енергоефективності та адаптації будівель до змін клімату. Застосування таких технологій дозволяє суттєво знизити загальне енергоспоживання, а також мінімізувати викиди вуглецю на всіх етапах життєвого циклу будівлі [24].

5. Пасивні заходи енергоефективності, зокрема біокліматичний дизайн та використання природної вентиляції, залишаються важливими елементами сталого будівництва. В умовах змін клімату виникає потреба у розробці точних моделей, здатних адаптуватися до кліматичних змін, що дозволяє ефективніше використовувати пасивні рішення у будівельних проектах [25]. Інтеграція штучного інтелекту у процес прогнозування кліматичних ризиків значно підвищує ефективність таких рішень і дозволяє уникати додаткових енергетичних витрат.

Дослідження показують, що застосування термографії та оптимізація життєвого циклу будівель стають особливо актуальними в контексті створення майже нульових будівель (NZEB), які відповідають найвищим стандартам енергоефективності. Використання ШІ допомагає прогнозувати майбутні потреби у енергоресурсах і оптимізувати процес управління енергетичними системами для мінімізації енергетичних втрат [16]. У дослідженні [26] акцентується увага на використанні безпілотних літальних

апаратів та інфрачервоних камер для виявлення ділянок теплових втрат у будівлях, що сприяє розробці ефективних стратегій для поліпшення енергоефективності.

Крім того, застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу термофізичних характеристик будівель, таких як вентильовані фасади, дозволяє точніше моделювати теплові потоки і створювати адаптивні енергетичні моделі, які оптимізують використання енергії у будівлях [27].

6. Оптимізація вентиляційних систем за допомогою штучного інтелекту та великих даних стала ключовим напрямом досліджень, спрямованих на зниження вуглецевого сліду будівель і підвищення їхньої стійкості. Це особливо важливо в умовах кліматичних змін, коли ефективність вентиляційних систем має значний вплив на загальне енергоспоживання будівель [28; 29]. Дослідження показують, що моделі машинного навчання, які прогнозують охолоджувальні навантаження та енергоспоживання, дозволяють оцінити ефективність різних стратегій управління вентиляцією, особливо в висотних будівлях [30].

Варто зазначити, що механічна вентиляція та системи кондиціонування повітря є одними з найбільших споживачів електроенергії у будівлях, на які припадає понад половину загальних енергетичних витрат [31]. Проблема поглиблюється кліматичними змінами, які підсилюють зв'язок між зростанням температур і збільшенням викидів парникових газів. Для ефективного використання природних ресурсів, таких як денне світло та природна вентиляція, особливо в регіонах з теплим кліматом, важливо інтегрувати пасивні заходи. Адаптація цих заходів дозволяє створити більш збалансовані енергосистеми будівель, що підкреслює важливість управління вентиляційними системами для зменшення енергетичних витрат.

7. Вуглецевий слід будівель. Скорочення вуглецевого сліду будівель є критично важливим завданням у контексті глобального енергоспоживання та кліматичних змін, оскільки на будівлі припадає до 50% світового споживання енергії та приблизно 30% викидів парникових газів [32]. Це підкреслює важливість підвищення енергоефективності для досягнення цілей сталого розвитку.

Застосування штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування енергоефективності будівель, як на рівні окремих об'єктів, так і на рівні міських територій, стає потужним інструментом для вирішення цієї проблеми. Дослідження свідчать, що точне прогнозування енергоспоживання вимагає врахування як кліматичних змін, так і функціональних характеристик будівель. Хоча успіхи у застосуванні ШІ є значними, прогнозування енергоефективності на міському рівні потребує подальших досліджень, зокрема для врахування взаємодії різних просторових функцій і кліматичних сценаріїв [33].

Сучасні системи управління, базовані на МН, дозволяють ефективно балансувати між комфортом і енергоспоживанням у розумних і енергоефективних будівлях (SEE), знижуючи викиди парникових газів [34]. Наприклад, прогнозні моделі з використанням генетичних алгоритмів здатні покращувати енергоефективність існуючих будівель на основі історичних даних [35, 36]. Також застосування багатокритеріальної оптимізації теплових характеристик будівель демонструє важливість ШІ в адаптації будівель до мінливих кліматичних умов [37].

Новітні розробки, такі як хмарні технології та автоматизація управління енергоспоживанням, не тільки оптимізують споживання енергії, а й допомагають виявляти

аномалії, створюючи адаптивні звіти для різних зацікавлених сторін, що сприяє зниженню вуглецевого сліду [38, 39]. Методи оптимізації життєвого циклу будівель, засновані на цифрових технологіях, допомагають мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище на всіх етапах – від проектування до експлуатації та утилізації.

8. Адаптація будівель до змін клімату. Адаптація будівель до змін клімату стала одним із ключових напрямів досліджень, що включає використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для підвищення енергоефективності в умовах змінних кліматичних умов. Серед найбільш перспективних рішень — застосування алгоритмів XGBoost та генетичної оптимізації, які підвищують ефективність теплоізоляції та природного освітлення, особливо в тропічних регіонах, що потребують кліматично адаптованих рішень [40].

Адаптація систем управління будівлями до змін клімату також є пріоритетним напрямом. Наприклад, застосування МН для прогнозування теплових навантажень і моделювання термодинамічних характеристик будівель дозволяє знизити їх енергоспоживання та адаптуватися до коливань температур і вологості [41]. Дослідження також підкреслюють значущість використання технологій, які забезпечують надійність і безпеку будівель у контексті кліматичних змін. Це включає управління та оптимізацію енергоспоживання за допомогою ШІ для підтримання високого рівня енергоефективності.

Значним кроком у цьому напрямі є використання eXplainable AI (XAI) для прогнозування енергоспоживання в умовах різних кліматичних сценаріїв, включаючи варіанти "бізнес як звично" та перехід до стійких джерел енергії. Результати демонструють, що кліматичні зміни можуть значно збільшити витрати на охолодження, тому адаптаційні заходи є необхідними для мінімізації негативних економічних та екологічних наслідків [42].

9. Енергоефективність будівель у контексті сталого розвитку та економічної ефективності. Зростаючий інтерес до використання штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації енергоспоживання у будівельній галузі зумовлений як екологічними, так і економічними вигодами. Затримки у впровадженні цих технологій можуть призвести до значних економічних втрат, що підкреслює важливість прискорення їх інтеграції. Енергоефективні рішення не лише знижують споживання енергії, але й створюють економічні переваги для галузі сталого розвитку [20].

Застосування великих даних, ШІ та IoT для підвищення енергоефективності та стійкості будівель сприяє комплексному задоволенню потреб політики, бізнесу та технологій, що є важливим для успішного переходу до сталого будівництва [29]. Особливу увагу приділяють цифровізації процесів на всіх етапах життєвого циклу будівель — від проектування до експлуатації та реконструкції. Цифрові технології, такі як Building Information Modeling (BIM) та системи управління будівлями (BMS), значно підвищують ефективність використання ресурсів та мінімізують екологічний вплив будівель [43].

Використання ШІ та машинного навчання у проектуванні й експлуатації будівель покращує їхню адаптацію до кліматичних змін, роблячи ці технології важливою складовою будівельної індустрії майбутнього. Незважаючи на переваги, залишається необхідність у подальшому дослідженні практичних аспектів інтеграції цих технологій та оцінці довгострокових економічних ефектів і внеску в стійкий розвиток міст [44, 45, 46].

Висновки.

Проведене дослідження підтверджує важливість інтеграції цифрових технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання, цифрові двійники та Інтернет речей, для підвищення енергоефективності будівельної галузі України в умовах воєнного та післявоєнного періодів. З огляду на завдання дослідження, можна зробити наступні висновки:

1. Технології, які вже можна використовувати в Україні. Для підвищення енергоефективності в Україні в умовах війни та ризиків руйнування генеруючих потужностей найбільш актуальними є технології, що забезпечують автономність та стійкість будівель. Зокрема, цифрові двійники та IoT для управління енергетичними системами в реальному часі є важливими для ефективного розподілу енергії та швидкої адаптації до змін умов. Ці рішення дозволяють швидко регулювати витрати тепла і світла в будівлях та швидко адаптувати енергоспоживання до обмежених ресурсів, що значно підвищує стійкість інфраструктури в умовах кризових ситуацій.

Також вагоме значення мають пасивні заходи енергоефективності, такі як біокліматичний дизайн і природна вентиляція, оскільки вони дозволяють скорочувати енерговитрати на підтримання комфортного мікроклімату без додаткових технічних систем. Такі підходи є економічно вигідними, надійними й не потребують значних інвестицій, що робить їх ефективними навіть за умов обмеженого фінансування та обмеженого доступу до ресурсів.

2. Технології, які потребують інвестицій. Інтеграція масштабних проектів зі створення розумних енергоефективних будівель (SEE) та широкого використання зелених технологій вимагає значних іноземних інвестицій і більш стабільного середовища. Ці рішення передбачають застосування сучасних систем на базі штучного інтелекту, таких як Building Information Modeling (BIM) та системи управління будівлями (BMS), які дозволяють досягати високих стандартів енергоефективності та оптимізації ресурсів. Реалізація таких проектів стане можливою в умовах відновлення економіки та наявності доступу до іноземних фінансових і технологічних ресурсів, які надаватимуть можливості для довгострокового сталого розвитку будівельної галузі в Україні.

Окремим напрямом для інвестицій є впровадження адаптивних матеріалів, таких як фазоперехідні матеріали (PCM) та аерогелі, які значно покращують теплоізоляційні властивості будівель, але вимагають значних витрат на етапі виробництва та логістики. Такі інновації можуть забезпечити ефективність у довгостроковій перспективі, проте їх реалізація доцільна у більш стабільний післявоєнний період.

3. Вуглецевий слід та зовнішнє середовище. Запровадження ШІ та МН у будівельній галузі України має не лише технологічні та економічні переваги, але й вагомий екологічний ефект. Ці технології відкривають нові можливості для сталого розвитку, забезпечуючи економічну вигоду та позитивний екологічний вплив. Використання ШІ для оптимізації енергоспоживання дозволяє суттєво знизити вуглецевий слід будівель, що сприяє покращенню екологічної ситуації та зменшенню негативного впливу на зміни клімату. Завдяки високоточним прогнозам і регулюванню енерговитрат на основі реальних даних Україна має можливість зменшити обсяги викидів CO_2 та інших парникових газів. Це допомагає не лише забезпечити відповідність світовим екологічним стандартам, а й

створити сприятливе зовнішнє середовище, що підтримує зусилля міжнародної спільноти у боротьбі зі змінами клімату.

4. Рекомендації для будівельних підприємств.

– Інвестувати у впровадження цифрових технологій для управління енергоспоживанням. Будівельним компаніям рекомендується активно використовувати цифрові двійники та IoT для оптимізації енергетичних систем будівель. Це дозволить контролювати і регулювати споживання ресурсів у режимі реального часу, знижуючи залежність від централізованих джерел енергії та підвищуючи стійкість будівель.

– Використовувати біокліматичний дизайн та пасивні методи енергозбереження. Впровадження природної вентиляції, орієнтації будівель для максимального використання денного світла та оптимізації теплової ізоляції допоможе зменшити енергетичні витрати на опалення та охолодження без великих капіталовкладень.

– Враховувати адаптивні матеріали та інноваційні технології. Компаніям слід розглядати можливість впровадження сучасних теплоізоляційних матеріалів, таких як PCM або аерогелі, для підвищення енергоефективності будівель. Застосування таких матеріалів є актуальним для довгострокових проектів, особливо в містах зі значними коливаннями температур.

– Інтегрувати системи на основі штучного інтелекту для оптимізації HVAC-систем. Використання ШІ для управління системами опалення, вентиляції та кондиціонування дозволить не тільки знизити енерговитрати, але й підвищити рівень комфорту користувачів, що сприятиме зростанню попиту на такі об'єкти.

– Забезпечити адаптивність до різних кліматичних сценаріїв. Враховуючи можливі зміни клімату, компаніям важливо передбачити стійкість будівельних рішень до екстремальних погодних умов, що дозволить створювати більш надійні та екологічно сталі проекти.

5. Рекомендації для уряду.

– Розробити нормативно-правові акти для стимулювання використання енергоефективних та екологічних технологій. Уряд має створити стимули для будівельних компаній, що впроваджують цифрові рішення та зелені технології, зокрема податкові пільги та субсидії, які підтримуватимуть використання цифрових двійників, IoT та ШІ в управлінні енергетичними системами будівель.

– Сприяти розвитку фінансування для проєктів у галузі відновлюваної енергетики та стійких будівель. Інвестиції з боку уряду та залучення міжнародних фондів допоможуть створити стабільну фінансову підтримку для реалізації великих проектів, які потребують значного капіталовкладення.

– Запровадити програми публічно-приватного партнерства (PPP) для відбудови та модернізації будівельної інфраструктури. За умов залучення приватного капіталу до проектів зі сталого будівництва можна забезпечити фінансування довгострокових проектів із відновлення будівельної інфраструктури в післявоєнний період.

– Підтримати наукові дослідження та розвиток інновацій у галузі енергоефективності. Створення грантових програм для наукових установ і технологічних стартапів у сфері будівництва та енергетики сприятиме розробці локальних рішень для України та дозволить інтегрувати передові світові технології.

– Посилити вимоги до енергоефективності будівель у державних стандартах. Уряд має встановити суворіші стандарти для нових будівель і капітального ремонту з акцентом на використання енергоефективних технологій. Це сприятиме формуванню більш екологічно відповідальної та економічно ефективної будівельної інфраструктури.

– Інформувати громадськість і підтримувати освітні програми. Важливо розвивати програми з підвищення обізнаності серед населення щодо переваг енергоефективності та відповідального споживання енергії, що дозволить створити сприятливий соціальний клімат для запровадження нових технологій.

Література.

1. Яновські, К. (2024). Вересень 2024р. – Атаки на енергетичну інфраструктуру України становлять загрозу ключовим аспектам життя напередодні зими. URL: https://ukraine.ohchr.org/en/Attacks-On-Ukraines-Electricity-Infrastructure (дата запиту: 19.09.2024)
2. Мілер, А. (2024). MEA: Зима стане серйозним випробуванням для України. URL: https://www.dw.com/ru/mea-predstoasaa-zima-stanet-sereznym-ispytaniem-dla-energosistemy-ukrainy/a-70273381 (дата запиту: 19.09.2024)
3. Ємець, М. (2024). ЄС взимку підтримає Україну імпортом електроенергії, що забезпечить 12% потреб. URL: https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/09/19/7194494/ (дата запиту: 19.09.2024)
4. Міністерство Економіки (2024). Україна затвердила Національний план з енергетики та клімату в день початку перемовин про вступ до ЄС. URL: https://me.gov.ua/News/Detail?lang=uk-UA&id=2642aff1-2328-4bad-b03f-6f0f7dc292c8 (дата запиту: 25.06.2024)
5. Урядовий портал. (2023). Голова Держенергоефективності окреслила ключові кроки для енергоефективної трансформації та декарбонізації України і плани на 2024 рік. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/holova-derzhenerhoefektyvnosti-okreslyla-kliuchovi-kroky-dlia-enerhoefektyvnoi-transformatsii-ta-dekarbonizatsii-ukrainy-i-plany-na-2024-rik (дата запиту: 13.12.2023)
6. Урядовий портал. (2021). Уряд схвалив Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-shvaliv-nacionalnij-plan-dij-z-energoefektivnosti-na-period-do-2030-roku (дата запиту: 29.12.2021)
7. Zhang, Y., Teoh, B. K., & Zhang, L. (2024). Multi-objective optimization for energy-efficient building design considering urban heat island effects. Applied Energy, 376. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124117
8. Alawadi, S., Mera, D., Fernández-Delgado, M., & Taboada, J. A. (2017). Comparative study of artificial neural network models for forecasting the indoor temperature in smart buildings. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 10268 LNCS. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59513-9_4
9. Manapragada, N. V. S. K., Shukla, A. K., Pignatta, G., Yenneti, K., Shetty, D., Nayak, B. K., & Boorla, V. (2022). Development of the Indian Future Weather File Generator Based on Representative Concentration Pathways. Sustainability (Switzerland), 14(22). https://doi.org/10.3390/su142215191
10. Goulart Tavares, G., Capriles, P. V. Z., & Goliatt, L. (2021). Automatic Evolutionary Settings of Machine Learning Methods for Buildings' Thermal Loads Prediction. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12981 LNAI. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86230-5_15
11. Scola, L. (2021). Artificial Intelligence Against Climate Change. In Lecture Notes in Networks and Systems (Vol. 284). https://doi.org/10.1007/978-3-030-80126-7_29
12. Shafiq, M., Bhavani, N. P. G., Venkata Naga Ramesh, J., Veeresha, R. K., Talasila, V., & Sulaiman Alfurhood, B. (2024). Thermal modeling and Machine learning for optimizing heat transfer in smart city infrastructure balancing energy efficiency and Climate Impact. Thermal Science and Engineering Progress, 54. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102868
13. Bassi, A., Shenoy, A., Sharma, A., Sigurdson, H., Glossop, C., & Chan, J. H. (2021). Building Energy Consumption Forecasting: A Comparison of Gradient Boosting Models. ACM International Conference Proceeding Series. https://doi.org/10.1145/3468784.3470656

14.Renganayagalu, S. K., Bodal, T., Bryntesen, T.-R., & Kvalvik, P. (2024). Optimising Energy Performance of buildings through Digital Twins and Machine Learning: Lessons learnt and future directions. 2024 4th International Conference on Applied Artificial Intelligence, ICAPAI 2024. https://doi.org/10.1109/ICAPAI61893.2024.10541224

15.Yang, F., & Mao, Q. (2023). Auto-Evaluation Model for the Prediction of Building Energy Consumption That Combines Modified Kalman Filtering and Long Short-Term Memory. Sustainability (Switzerland), 15(22). https://doi.org/10.3390/su152215749

16.Mousavi, S., Gheibi, M., Wacławek, S., Smith, N. R., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Behzadian, K. (2023). Low-energy residential building optimisation for energy and comfort enhancement in semi-arid climate conditions. Energy Conversion and Management, 291. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117264

17.Kermiche, A., Rouzzi, C., & Bellatreche, L. (2023). ExplainerX: An Integrated and Explainable AI Framework for Nearly Zero-Energy Buildings. Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Big Data, BigData 2023, 2411–2420. https://doi.org/10.1109/BigData59044.2023.10386148

18.Alanne, K., & Sierla, S. (2022). An overview of machine learning applications for smart buildings. Sustainable Cities and Society, 76. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103445

19.Gan, V. J. L., Lo, I. M. C., Ma, J., Tse, K. T., Cheng, J. C. P., & Chan, C. M. (2020). Simulation optimisation towards energy efficient green buildings: Current status and future trends. Journal of Cleaner Production, 254. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120012

20.Guariso, G., & Sangiorgio, M. (2020). Valuing the Cost of Delayed Energy Actions. IFAC-PapersOnLine, 53(2), 16575–16580. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.783

21.Pei, W. (2022). THE APPLICATIONS OF THE GREEN BUILDING DESIGN CONCEPT IN MEDICAL BUILDING DESIGN. Res Militaris, 12(1), 173–187.

22.Qiu, Y., Wang, H., & Zhang, Q. (2021). Energy-efficient and Sustainable Construction Technologies and Simulation Optimisation Methods. Proceedings - 2021 International Conference on E-Commerce and E-Management, ICECEM 2021, 341–351. https://doi.org/10.1109/ICECEM54757.2021.00075

23.Javanmard, Z., Davtalab, J., Nikpour, M., & Sivandipour, A. (2024). Integrating machine learning and parametric design for energy-efficient building cladding systems in arid climates: Sport hall in Kerman. Journal of Building Engineering, 97. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110693

24.Zhou, Y. (2022). A multi-stage supervised learning optimisation approach on an aerogel glazing system with stochastic uncertainty. Energy, 258. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124815

25.Gooroochurn, M. (2024). Mechatronics Implementation of Passive Building Elements to Improve Thermal Comfort and Promote Energy Efficiency in Buildings. In Artificial Intelligence, Engineering Systems and Sustainable Development: Driving the UN SDGs. https://doi.org/10.1108/978-1-83753-540-820241013

26.Gertsvolf, D., Berardi, U., & Horvat, M. (2021). Aerial Infrared Thermography and Artificial Intelligence-Based Fault Detection and Diagnosis Methods for Building Energy Systems: A Review of the State-of-the-Art. ZEMCH International Conference, 530–540.

27.Summa, S., Mircoli, A., Potena, D., Ulpiani, G., Diamantini, C., & di Perna, C. (2022). Combining artificial intelligence and building engineering technologies towards energy efficiency: the case of ventilated façades. Construction Innovation, 24(7), 44–64. https://doi.org/10.1108/CI-11-2021-0229

28.Mui, K. W., Wong, L. T., Satheesan, M. K., & Balachandran, A. (2021). A hybrid simulation model to predict the cooling energy consumption for residential housing in Hong Kong. Energies, 14(16). https://doi.org/10.3390/en14164850

29.Hernández-Moral, G., Mulero-Palencia, S., Serna-González, V. I., Rodríguez-Alonso, C., Sanz-Jimeno, R., Marinakis, V., Dimitropoulos, N., Mylona, Z., Antonucci, D., & Doukas, H. (2021). Big data value chain: Multiple perspectives for the built environment. Energies, 14(15). https://doi.org/10.3390/en14154624

30.Sha, H., Moujahed, M., & Qi, D. (2021). Machine learning-based cooling load prediction and optimal control for mechanical ventilative cooling in high-rise buildings. Energy and Buildings, 242. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110980

31.Gooroochurn, M., Mallet, D., Jahmeerbacus, I., Shamachurn, H., & Sayed Hassen, S. Z. (2022). A Framework for AI-Based Building Controls to Adapt Passive Measures for Optimum Thermal Comfort and

Energy Efficiency in Tropical Climates. In Lecture Notes in Networks and Systems: Vol. 359 LNNS. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89880-9_39

32.Fathi, S., Srinivasan, R. S., Kibert, C. J., Steiner, R. L., & Demirezen, E. (2020). AI-based campus energy use prediction for assessing the effects of climate change. Sustainability (Switzerland), 12(8), 1–22. https://doi.org/10.3390/SU12083223

33.Fathi, S., & Srinivasan, R. (2019). Climate change impacts on campus buildings energy use: An AI-based Scenario Analysis. UrbSys 2019 - Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Urban Building Energy Sensing, Controls, Big Data Analysis, and Visualization, Part of BuildSys 2019, 112–119. https://doi.org/10.1145/3363459.3363540

34.Liu, Z., Zhang, X., Sun, Y., & Zhou, Y. (2023). Advanced controls on energy reliability, flexibility and occupant-centric control for smart and energy-efficient buildings. Energy and Buildings, 297. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113436

35.Zhang, D., Ding, Y., & Jiang, X. (2023). A segmented evaluation model for building energy performance considering seasonal dynamic fluctuations. Energy Conversion and Management, 298. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117780

36.Li, Z., Zhao, Y., Xia, H., & Xie, S. (2023). A multi-objective optimization framework for building performance under climate change. Journal of Building Engineering, 80. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107978

37.Bamdad, K., Mohammadzadeh, N., Cholette, M., & Perera, S. (2023). Model Predictive Control for Energy Optimization of HVAC Systems Using EnergyPlus and ACO Algorithm. Buildings, 13(12). https://doi.org/10.3390/buildings13123084

38.Bumpei, M., & Yashiro, T. (2019). Research on inefficiency analysis method of building energy utilizing time series data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 294(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/294/1/012052

39.Papadopoulos, S., & Kontokosta, C. E. (2019). Grading buildings on energy performance using city benchmarking data. Applied Energy, 233–234, 244–253. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.053

40.Yan, H., Ji, G., & Yan, K. (2022). Data-driven prediction and optimization of residential building performance in Singapore considering the impact of climate change. Building and Environment, 226. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109735

41.Akköse, G., Duran, A., Dino, İ. G., & Akgül, Ç. M. (2023). Machine learning based evaluation of window parameters on building energy performance and occupant thermal comfort under climate change | Makina öğrenmesi ile pencere parametrelerinin bina performansına etkisinin iklim değişikliği gözetilerek incelenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38(4), 2069–2084. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1069164

42.Chakraborty, D., Alam, A., Chaudhuri, S., Başağaoğlu, H., Sulbaran, T., & Langar, S. (2021). Scenario-based prediction of climate change impacts on building cooling energy consumption with explainable artificial intelligence. Applied Energy, 291. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116807

43.Asif, M., Naeem, G., & Khalid, M. (2024). Digitalization for sustainable buildings: Technologies, applications, potential, and challenges. Journal of Cleaner Production, 450. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141814

44.Boutahri, Y., & Tilioua, A. (2024). Machine learning-based predictive model for thermal comfort and energy optimization in smart buildings. Results in Engineering, 22. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102148

45.Zhou, Y., & Liu, J. (2024). Advances in emerging digital technologies for energy efficiency and energy integration in smart cities. Energy and Buildings, 315. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114289

46.Um-e-Habiba, Ahmed, I., Asif, M., Alhelou, H. H., & Khalid, M. (2024). A review on enhancing energy efficiency and adaptability through system integration for smart buildings. Journal of Building Engineering, 89. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109354

References.

1. Janowski, K. (2024). Sept. 2024 – Attacks On Ukraine's Electricity Infrastructure Threaten Key Aspects of Life As Winter Approaches. Retrieved September 19, 2024 from: https://ukraine.ohchr.org/en/Attacks-On-Ukraines-Electricity-Infrastructure

2. Miler, A. (2024). IEA: Winter will be a serious test for Ukraine. Retrieved September 19, 2024 from: https://www.dw.com/ru/mea-predstoasaa-zima-stanet-sereznym-ispytaniem-dla-energosistemy-ukrainy/a-70273381

3. Yemets, M. (2024). In winter, the EU will support Ukraine by importing electricity, which will provide 12% of needs. Retrieved September 19, 2024 from: https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/09/19/7194494/

4. Ministry of Economy (2024). Ukraine approved the National Energy and Climate Plan on the day of the start of EU accession negotiations. Retrieved June 25, 2024 from: https://me.gov.ua/News/Detail?lang=uk-UA&id=2642aff1-2328-4bad-b03f-6f0f7dc292c8

5. Uriadovy Portal (2024). The head of the State Energy Efficiency Agency outlined key steps for energy-efficient transformation and decarbonization of Ukraine and plans for 2024. Retrieved December 13, 2023 from: https://www.kmu.gov.ua/news/holova-derzhenerhoefektyvnosti-okreslyla-kliuchovi-kroky-dlia-enerhoefektyvnoi-transformatsii-ta-dekarbonizatsii-ukrainy-i-plany-na-2024-rik

6. Uriadovy Portal (2021). The government approved the National Energy Efficiency Action Plan for the period up to 2030. Retrieved December 29, 2021 from: https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-shvaliv-nacionalnij-plan-dij-z-energoefektivnosti-na-period-do-2030-roku

7. Zhang, Y., Teoh, B. K., & Zhang, L. (2024). Multi-objective optimization for energy-efficient building design considering urban heat island effects. Applied Energy, 376. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124117

8. Alawadi, S., Mera, D., Fernández-Delgado, M., & Taboada, J. A. (2017). Comparative study of artificial neural network models for forecasting the indoor temperature in smart buildings. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 10268 LNCS. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59513-9_4

9. Manapragada, N. V. S. K., Shukla, A. K., Pignatta, G., Yenneti, K., Shetty, D., Nayak, B. K., & Boorla, V. (2022). Development of the Indian Future Weather File Generator Based on Representative Concentration Pathways. Sustainability (Switzerland), 14(22). https://doi.org/10.3390/su142215191

10. Goulart Tavares, G., Capriles, P. V. Z., & Goliatt, L. (2021). Automatic Evolutionary Settings of Machine Learning Methods for Buildings' Thermal Loads Prediction. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12981 LNAI. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86230-5_15

11. Scola, L. (2021). Artificial Intelligence Against Climate Change. In Lecture Notes in Networks and Systems (Vol. 284). https://doi.org/10.1007/978-3-030-80126-7_29

12. Shafiq, M., Bhavani, N. P. G., Venkata Naga Ramesh, J., Veeresha, R. K., Talasila, V., & Sulaiman Alfurhood, B. (2024). Thermal modeling and Machine learning for optimizing heat transfer in smart city infrastructure balancing energy efficiency and Climate Impact. Thermal Science and Engineering Progress, 54. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102868

13. Bassi, A., Shenoy, A., Sharma, A., Sigurdson, H., Glossop, C., & Chan, J. H. (2021). Building Energy Consumption Forecasting: A Comparison of Gradient Boosting Models. ACM International Conference Proceeding Series. https://doi.org/10.1145/3468784.3470656

14. Renganayagalu, S. K., Bodal, T., Bryntesen, T.-R., & Kvalvik, P. (2024). Optimising Energy Performance of buildings through Digital Twins and Machine Learning: Lessons learnt and future directions. 2024 4th International Conference on Applied Artificial Intelligence, ICAPAI 2024. https://doi.org/10.1109/ICAPAI61893.2024.10541224

15. Yang, F., & Mao, Q. (2023). Auto-Evaluation Model for the Prediction of Building Energy Consumption That Combines Modified Kalman Filtering and Long Short-Term Memory. Sustainability (Switzerland), 15(22). https://doi.org/10.3390/su152215749

16. Mousavi, S., Gheibi, M., Wacławek, S., Smith, N. R., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Behzadian, K. (2023). Low-energy residential building optimisation for energy and comfort enhancement in semi-arid climate conditions. Energy Conversion and Management, 291. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117264

17.Kermiche, A., Rouzzi, C., & Bellatreche, L. (2023). ExplainerX: An Integrated and Explainable AI Framework for Nearly Zero-Energy Buildings. Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Big Data, BigData 2023, 2411–2420. https://doi.org/10.1109/BigData59044.2023.10386148

18.Alanne, K., & Sierla, S. (2022). An overview of machine learning applications for smart buildings. Sustainable Cities and Society, 76. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103445

19.Gan, V. J. L., Lo, I. M. C., Ma, J., Tse, K. T., Cheng, J. C. P., & Chan, C. M. (2020). Simulation optimisation towards energy efficient green buildings: Current status and future trends. Journal of Cleaner Production, 254. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120012

20.Guariso, G., & Sangiorgio, M. (2020). Valuing the Cost of Delayed Energy Actions. IFAC-PapersOnLine, 53(2), 16575–16580. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.783

21.Pei, W. (2022). THE APPLICATIONS OF THE GREEN BUILDING DESIGN CONCEPT IN MEDICAL BUILDING DESIGN. Res Militaris, 12(1), 173–187.

22.Qiu, Y., Wang, H., & Zhang, Q. (2021). Energy-efficient and Sustainable Construction Technologies and Simulation Optimisation Methods. Proceedings - 2021 International Conference on E-Commerce and E-Management, ICECEM 2021, 341–351. https://doi.org/10.1109/ICECEM54757.2021.00075

23.Javanmard, Z., Davtalab, J., Nikpour, M., & Sivandipour, A. (2024). Integrating machine learning and parametric design for energy-efficient building cladding systems in arid climates: Sport hall in Kerman. Journal of Building Engineering, 97. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110693

24.Zhou, Y. (2022). A multi-stage supervised learning optimisation approach on an aerogel glazing system with stochastic uncertainty. Energy, 258. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124815

25.Gooroochurn, M. (2024). Mechatronics Implementation of Passive Building Elements to Improve Thermal Comfort and Promote Energy Efficiency in Buildings. In Artificial Intelligence, Engineering Systems and Sustainable Development: Driving the UN SDGs. https://doi.org/10.1108/978-1-83753-540-820241013

26.Gertsvolf, D., Berardi, U., & Horvat, M. (2021). Aerial Infrared Thermography and Artificial Intelligence-Based Fault Detection and Diagnosis Methods for Building Energy Systems: A Review of the State-of-the-Art. ZEMCH International Conference, 530–540.

27.Summa, S., Mircoli, A., Potena, D., Ulpiani, G., Diamantini, C., & di Perna, C. (2022). Combining artificial intelligence and building engineering technologies towards energy efficiency: the case of ventilated façades. Construction Innovation, 24(7), 44–64. https://doi.org/10.1108/CI-11-2021-0229

28.Mui, K. W., Wong, L. T., Satheesan, M. K., & Balachandran, A. (2021). A hybrid simulation model to predict the cooling energy consumption for residential housing in Hong Kong. Energies, 14(16). https://doi.org/10.3390/en14164850

29.Hernández-Moral, G., Mulero-Palencia, S., Serna-González, V. I., Rodríguez-Alonso, C., Sanz-Jimeno, R., Marinakis, V., Dimitropoulos, N., Mylona, Z., Antonucci, D., & Doukas, H. (2021). Big data value chain: Multiple perspectives for the built environment. Energies, 14(15). https://doi.org/10.3390/en14154624

30.Sha, H., Moujahed, M., & Qi, D. (2021). Machine learning-based cooling load prediction and optimal control for mechanical ventilative cooling in high-rise buildings. Energy and Buildings, 242. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110980

31.Gooroochurn, M., Mallet, D., Jahmeerbacus, I., Shamachurn, H., & Sayed Hassen, S. Z. (2022). A Framework for AI-Based Building Controls to Adapt Passive Measures for Optimum Thermal Comfort and Energy Efficiency in Tropical Climates. In Lecture Notes in Networks and Systems: Vol. 359 LNNS. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89880-9_39

32.Fathi, S., Srinivasan, R. S., Kibert, C. J., Steiner, R. L., & Demirezen, E. (2020). AI-based campus energy use prediction for assessing the effects of climate change. Sustainability (Switzerland), 12(8), 1–22. https://doi.org/10.3390/SU12083223

33.Fathi, S., & Srinivasan, R. (2019). Climate change impacts on campus buildings energy use: An AI-based Scenario Analysis. UrbSys 2019 - Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Urban Building Energy Sensing, Controls, Big Data Analysis, and Visualization, Part of BuildSys 2019, 112–119. https://doi.org/10.1145/3363459.3363540

34.Liu, Z., Zhang, X., Sun, Y., & Zhou, Y. (2023). Advanced controls on energy reliability, flexibility and occupant-centric control for smart and energy-efficient buildings. Energy and Buildings, 297. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113436

35.Zhang, D., Ding, Y., & Jiang, X. (2023). A segmented evaluation model for building energy performance considering seasonal dynamic fluctuations. Energy Conversion and Management, 298. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117780

36.Li, Z., Zhao, Y., Xia, H., & Xie, S. (2023). A multi-objective optimization framework for building performance under climate change. Journal of Building Engineering, 80. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107978

37.Bamdad, K., Mohammadzadeh, N., Cholette, M., & Perera, S. (2023). Model Predictive Control for Energy Optimization of HVAC Systems Using EnergyPlus and ACO Algorithm. Buildings, 13(12). https://doi.org/10.3390/buildings13123084

38.Bumpei, M., & Yashiro, T. (2019). Research on inefficiency analysis method of building energy utilizing time series data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 294(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/294/1/012052

39.Papadopoulos, S., & Kontokosta, C. E. (2019). Grading buildings on energy performance using city benchmarking data. Applied Energy, 233–234, 244–253. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.053

40.Yan, H., Ji, G., & Yan, K. (2022). Data-driven prediction and optimization of residential building performance in Singapore considering the impact of climate change. Building and Environment, 226. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109735

41.Akköse, G., Duran, A., Dino, İ. G., & Akgül, Ç. M. (2023). Machine learning based evaluation of window parameters on building energy performance and occupant thermal comfort under climate change | Makina öğrenmesi ile pencere parametrelerinin bina performansına etkisinin iklim değişikliği gözetilerek incelenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38(4), 2069–2084. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1069164

42.Chakraborty, D., Alam, A., Chaudhuri, S., Başağaoğlu, H., Sulbaran, T., & Langar, S. (2021). Scenario-based prediction of climate change impacts on building cooling energy consumption with explainable artificial intelligence. Applied Energy, 291. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116807

43.Asif, M., Naeem, G., & Khalid, M. (2024). Digitalization for sustainable buildings: Technologies, applications, potential, and challenges. Journal of Cleaner Production, 450. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141814

44.Boutahri, Y., & Tilioua, A. (2024). Machine learning-based predictive model for thermal comfort and energy optimization in smart buildings. Results in Engineering, 22. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102148

45.Zhou, Y., & Liu, J. (2024). Advances in emerging digital technologies for energy efficiency and energy integration in smart cities. Energy and Buildings, 315. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114289

46.Um-e-Habiba, Ahmed, I., Asif, M., Alhelou, H. H., & Khalid, M. (2024). A review on enhancing energy efficiency and adaptability through system integration for smart buildings. Journal of Building Engineering, 89. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109354

Pimenow S., PhD
Doctoral Candidate,
Faculty of Economics, VUSI,
Plovdiv, Bulgaria
Sedj78@gmail.com

ENERGY EFFICIENCY AND DIGITALIZATION: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR UKRAINE'S CONSTRUCTION INDUSTRY IN THE CONTEXT OF ENERGY SHORTAGES

Against the backdrop of global challenges such as geopolitical instability, environmental threats, and social crises, Ukraine's energy system has come under unprecedented pressure, requiring tactical responses to the destruction of energy infrastructure as well as long-term strategic solutions to ensure its resilience and energy efficiency. Currently, state efforts focused on operational measures, including the restoration of damaged power plants, support for decentralized energy sources, and mobilizing foreign aid to meet seasonal demands. However, despite existing national programs, such as the National Energy Efficiency Plan, several unresolved aspects require further detailing and adaptation to current conditions. Specifically, there is a lack of concrete steps for integrating decentralized sources into building projects, flexible mechanisms to operate during infrastructure disruptions, and incentives for the widespread use of green technologies in large-scale construction.

This research aims to analyze the opportunities and challenges related to enhancing the energy efficiency of Ukraine's construction sector through innovative solutions such as artificial intelligence (AI), machine learning (ML), digital twins, and eco-friendly materials. The study utilizes methods of content analysis, comparative and situational analysis, as well as expert evaluation to develop practical recommendations for both construction companies and government bodies. The results indicate that technologies enhancing building autonomy and resilience, particularly digital twins and IoT, are the most effective during wartime. Larger-scale solutions, such as smart energy-efficient buildings, require foreign investment and they may be implemented in the post-war period. The introduction of AI and ML not only improves energy efficiency but also helps reduce the carbon footprint, which positively affects at the environment and aids in adapting to climate change.

Keywords: *Energy Shortage, Building Energy Efficiency, Digitalization, Artificial Intelligence, AI, Ukraine, Construction Industry, Carbon Footprint, Digital Twins, Internet of Things, IoT*