

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 697.11:502.174.3

### Будівлі з близьким до нульового споживанням енергії в сучасних та історичних будівлях: виклики та рішення

І. Ю. Білоус<sup>1,а</sup>, Г. О. Гетманчук<sup>2</sup>, С. О. Крамаренко<sup>3</sup>, А. В. Гавриш<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна;

<sup>а</sup>Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

✉ e-mail: <sup>1</sup>bilouys\_inna@ukr.net

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-1655-8642>;

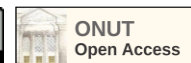
<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-1534-9793>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0000-1728-1169>

*Будівлі з близьким до нульового споживанням енергії (NZEB) є пріоритетним напрямом сталого розвитку в європейській та українській будівельній практиці. Особливу складність становить адаптація принципів NZEB до історичних об'єктів, де необхідно забезпечити баланс між енергоефективністю та збереженням архітектурної спадщини. Метою статті є узагальнення наукових підходів і практичного досвіду щодо реалізації NZEB у сучасних і, зокрема, історичних будівлях, а також аналіз нормативно-правових та технологічних викликів щодо інтеграції стандартів NZEB у історичну забудову. Методи дослідження включають систематичний аналіз понад 70 джерел наукової літератури, класифікованих за напрямками: нормативно-правове регулювання NZEB у країнах ЄС і Україні, технічні стратегії адаптації історичних будівель, використання відновлюваних джерел енергії, підключення до інфраструктури та заходи з енергоефективності. Особливу увагу приділяється реалізованим прикладам модернізації історичних об'єктів, які демонструють практичну можливість досягнення показників NZEB без шкоди для архітектурної цінності будівель. Згідно з діючими українськими нормативами, максимальні значення показника споживання первинної енергії з невідновлюваних джерел енергії (EP<sub>p</sub>) для будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії у разі реконструкції становлять: для житлових будівель – від 59 до 117 кВт·год/м<sup>2</sup> залежно від поверховості та темпе-ратурної зони; для громадських будівель дана величина залежить також від коефіцієнта компактності і становить 17-45 кВт·год/м<sup>2</sup>; для будівель закладів освіти – від 26 до 60 кВт·год/м<sup>2</sup>. Результати огляду свідчать про наявність широкого спектра можливостей для досягнення стандартів NZEB в історичних будівлях – від впровадження фотоелектричних систем і теплових насосів до використання сучасних систем мікроклімату та оптимізації систем гарячого водопостачання. Водночас наголошується на ва-жливіості проведення попередньої теплотехнічної діагностики та індивідуального підходу до кожного об'єкта. Отримані висновки можуть бути використані як аналітична база для подальшого розвитку нормативних рішень, адаптованих до історичних будівель, та як практичний орієнтир для проєктантів і фахівців у сфері енергоефективної реновації.*

**Ключові слова:** NZEB; Модернізація історичних будівель; Енергетичне моделювання; Реконструкція історичних будівель; Відновлювані джерела енергії; Сценарії енергозбереження

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v6i12.3173>

© The Author(s) 2025. This article is an open access publication  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. Вступ

За останні кілька десятиліть глобальне зростання населення та швидкий економічний розвиток призвели до значного збільшення споживання енергії, особливо будівлями. Щоб зменшити викиди парникових газів і енергоспоживання будівлі, необхідно оптимізувати будівельні матеріали та енергетичні технології. У всьому світі зростає інтерес до будівель з нульовим енергоспоживанням (НЗЕБ, або NZEB – Nearly Zero Energy Buildings) адже вони є важливим елементом політики сталого розвитку та енергоефективності. Зазвичай NZEB визначаються як будівлі, які генерують принаймні стільки ж енергії, скільки вони споживають за рік [1]. Існує багато підходів до реалізації NZEB, або шляхом мінімізації попиту на енергію в будівлях (через покращення конструкції будівель та/або поведінки мешканців), або через модернізацію та збільшення виробництва енергії з відновлюваних джерел.

Хоча у світі вже створено нормативну базу, яка регламентує вимоги до NZEB для нових та реконструйованих будівель, питання адаптації цих принципів до історичних об'єктів є науково-технічним викликом. Історичні будівлі, як правило, мають архітектурну, культурну та естетичну цінність, багато історичних споруд знаходяться під охороною держави чи ЮНЕСКО, що ускладнює втручання в їхню конструкцію та зовнішній вигляд. До того ж, обмежена наявність точних технічних даних про старі будівлі, а також неоднорідність матеріалів та конструкцій потребують індивідуального підходу до кожного об'єкта.

Аналіз публікацій показує зростання інтересу до енергетичної модернізації історичних будівель як стратегії зменшення споживання енергії [2].

Історичні будівлі традиційно будували з використанням місцевих ресурсів і матеріалів. Таким чином, шари стін будівлі можуть бути невідомими, а оригінальні креслення неточними. Тому дослідники зазвичай проводять дослідження енергетичної модернізації історичних будівель на основі енергетичного моделювання, і найбільш використовуваними інструментами для моделювання є програмні продукти EnergyPlus та DesignBuilder. Так, згідно дослідженням [3] на базі енергетичного моделювання, інтеграція фотоелектричних систем на залізничній станції Танджонг Пагар у Сінгапурі може скоротити споживання енергії до 83%, зберігаючи при цьому історичну цілісність.

У іншому дослідженні [4] на прикладі будівлі Університету Тирані в Албанії представлено результати досліджень, де оцінювалась ефективність шести варіантів втручання, включаючи теплоізоляцію, контроль освітлення, подвійне скління, зовнішнє затінення, природну вентиляцію та встановлення фотоелектричних панелей. Найефективнішим заходом виявилось впровадження PV-панелей, а загалом, комплекс рішень дозволив досягти середнього зниження енергоспоживання на 20,18 %, без втрати культурної цінності.

Реконструкцію слід проводити з огляду на збереження історичних цінностей та використання будівлі. У дослідженні [5] розглянуто три варіанти енергоефективної модернізації історичної будівлі з урахуванням вимог до збереження архітектурної спадщини. Авторами було запропоновано пакети, які варіюються від помірних заходів (використаття термостатів, регулювання системи опалення та вентиляції) до більш радикальних, що включають заміну вікон, теплоізоляцію стін, даху й підлоги. Максимальне зниження енергоспоживання (~40%) досягалося лише у разі незворотних втручання, які порушують автентичність будівлі. За результатами даного дослідження можливим є компромісне зменшення енергоспоживання без шкоди культурній цінності, але не повна енергоефективність.

При модернізації Музею авіації в Белграді [6] проведено технічну експертизу будівлі та проаналізовано шість моделей глибокої енергетичної реновації з використанням BIPV (інтегрованих фотоелектричних систем). Найменша потужність фотоелектричної системи – 163,3 кВт, що перевищує потужність теплового насоса (125 кВт), забезпечуючи енергетичний надлишок. Результати показали можливість досягнення Zero CO<sub>2</sub>-статусу та трансформації музею в Energy Plus Building (будівля, яка протягом року виробляє більше енергії з відновлюваних джерел, ніж сама споживає) з повним покриттям систем ОВК (системи опалення, вентиляції та кондиціонування) і освітлення за рахунок ВДЕ (відновлюваних джерел енергії).

Адаптація NZEB до історичних будівель є можливою, однак вимагає ретельно виваженого підходу, що враховує не лише енергетичні, але й культурні, архітектурні та економічні аспекти.

## 2. Мета та завдання

Метою роботи є огляд технологічних рішень, що забезпечують досягнення рівня NZEB. Для до-

сягнення поставленої мети були виконані наступні завдання: 1) аналіз досліджень реалізації концепції NZEB у сучасному та історичному контексті; 2) аналіз ефективності технічних рішень щодо їх енергоощадності, сумісності з історичною спадщиною та можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ); 3) оформування висновків щодо перспектив і обмежень впровадження концепції NZEB у реконструкції історичної забудови.

### 3. Матеріал і результати досліджень

Нормативно-правові аспекти впровадження стандартів NZEB у будівельній сфері

У світі діють різні нормативні документи, які встановлюють вимоги до NZEB, серед яких Директива ЄС 2024/1275/ЄС (EPBD), серія стандартів ISO 52000, EN 16883:2017, а також екологічні сертифікаційні системи BREEAM, LEED та Passivhaus.

Директива 2024/1275/ЄС «Про енергетичні характеристики будівель» є ключовим документом Європейського Союзу у сфері енергоефективності будівель. Вона визначає NZEB як будівлі, які мають дуже високу енергоефективність, а їхні залишкові енергетичні потреби переважно забезпечуються за рахунок відновлюваних джерел енергії. Директива також зобов'язує держави-члени ЄС розробити національні плани щодо підвищення енергоефективності будівель та встановлює вимоги до енергоефективності нових будівель. Вона вимагає, щоб усі нові житлові та нежитлові будівлі були будівлями з нульовим рівнем викидів з 1 січня 2028 року для будівель, що належать державним органам, та з 1 січня 2030 року для всіх інших нових будівель, з можливістю спеціальних винятків.

Франція з 2022 року впровадила теплову регламентацію RE2020, яка зобов'язує будівлі відповідати вимогам низького вуглецевого сліду та високої енергоефективності. Німецький Закон про енергетику будівель (GEG) визначає стандарти енергоефективності, пов'язані з NZEB, вимагаючи, щоб щонайменше 65% тепла, що постачається системою опалення, походило з відновлюваних джерел енергії. В Італії технічні вимоги до NZEB визначає Міністерський декрет від 26 червня 2015 року. Згідно з документом, будівлі повинні мати низьке первинне енергоспоживання та використовувати від 50% до 65% відновлюваних джерел енергії для покриття потреб у тепловій енергії.

Декрет також передбачає жорсткі вимоги до теплоізоляції огорожувальних конструкцій відповідно до кліматичної зони будівлі. В Іспанії Real Decreto 732/2019, що оновлює CTE 2019, встановлює для нових житлових будівель обмеження первинного енергоспоживання на рівні до 50 кВт·год/м<sup>2</sup>·рік, а також вимагає, щоб не менше 60 % (для обсягів < 5000 л/день) чи 70 % (> 5000 л/день) енергії для гарячого водопостачання надходило з ВДЕ, і щоб потужність сонячних панелей становила не менше 1% від площі підлоги (не перевищуючи 5% від площі даху) [7]. У Великій Британії з 2025 року набуває чинності Future Homes Standard, який встановлює нові вимоги до енергоефективності новобудов. Згідно з цим стандартом, нові житлові будинки повинні забезпечувати зниження викидів CO<sub>2</sub> на 75-80% порівняно з попередніми нормативами, що досягається шляхом впровадження низьковуглецевих систем опалення, таких як теплові насоси, та високих стандартів теплоізоляції [8].

Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE) поставило мету створення житлових NZEB до 2030 року та розробило енергетичні рекомендації для історичних будівель – ASHRAE Guideline 34-2019: Energy Guideline for Historic Buildings [8].

В Україні 29 грудня 2023 року затверджена Стратегія термомодернізації будівель [10], що передбачає з 2025 року щорічну термомодернізацію 1% існуючих будівель та будівництво 100+ будівель за вимогами NZEB. З 2030 року – щорічну термомодернізацію 3% існуючих будівель та повний перехід на будівництво за стандартом NZEB. А з 2050 – декарбонізацію 100% будівель в Україні (всі будівлі NZEB). Наразі розробляється Державна цільова програма термомодернізації будівель в Україні [11].

В Україні впровадження NZEB перебуває на стадії розвитку, і нормативно-правова база для цього активно формується. З 01.04.2025 року набув чинності наказ «Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» [12], який визначає обов'язкові вимоги щодо: класу енергоефективності; показника споживання первинної енергії з невідновлюваних джерел енергії; частки енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії; теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій; повітропроникності; інженерних систем.

Частка енергії, вироблена з відновлюваних джерел енергії в NZEB, та яка споживається на потреби опалення та охолодження будівлі, має становити не менше ніж 53 % залежно від призначення будівлі та температурної зони. Вимоги є обов'язковими для будівель для сертифікації їх за стандартом NZEB.

Також в Україні встановлені мінімальні вимоги до енергоефективності будівель відповідно до закону України «Про енергетичну ефективність будівель», який ухвалений у 2017. Він визначає поняття енергетичного сертифіката будівлі, що є ключовим документом для оцінки її енергетичних характеристик. Крім того, закон регулює процедури енергетичної сертифікації та аудитів та передбачає обов'язкову сертифікацію для нових будівель та будівель після реконструкції, що дозволяє здійснювати контроль і моніторинг енергоефективності будівель. NZEB, будівлі повинні мати клас енергоефективності не нижче «А». При реконструкції, будівлі з близьким до нульового рівнем споживання енергії мають відповідати класу енергетичної ефективності не нижче "В".

Важливими критеріями є високий рівень теплоізоляції. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» встановлює вимоги до теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій, показники опору теплопередачі для стін, дахів, вікон та дверей, а також методологію розрахунку енергоефективності будівель. Згідно наказу [12], значення приведенного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій мають бути не менше значень, наведених у ДБН В.2.6-31:2021, без можливості застосування понижувальних коефіцієнтів.

Аналіз чинних нормативних вимог в Україні свідчить про те, що за окремими параметрами вони вже перевищують стандарти NZEB, встановлені в країнах ЄС. Водночас у національних регламентах відсутні обов'язкові вимоги щодо використання відновлюваних джерел енергії, що є ключовою складовою європейської політики декарбонізації будівельного сектору.

Основними викликами реконструкції та модернізації історичних будівель є необхідність збереження оригінальних архітектурних елементів, використання сумісних з історичними конструкціями матеріалів і технологій, дотримання пам'яткоохоронного законодавства та складність інтеграції сучасних інженерних систем без шкоди для будівлі.

В Україні проведення реставраційних робіт

регулюється Законом «Про охорону культурної спадщини». ДБН В.3.2-1-2004 встановлює вимоги до реставрації, ремонту та реконструкції пам'яток архітектури.

EPBD пропонує баланс між необхідністю підвищення енергоефективності та збереженням історичної автентичності будівель, дозволяючи адаптацію вимог NZEB до кожного конкретного випадку. Також в оновленій директиві прописані заходи як поступове запровадження мінімальних стандартів енергоефективності для нежитлових будівель для підтримки реконструкції будівель з найнижчою енергоефективністю та розробка розширених довгострокових стратегій реконструкції, які будуть перейменовані в національні плани реконструкції будівель.

Для історичних будівель рекомендується використання спеціальних технологій, таких як внутрішня теплоізоляція, заміна вікон із збереженням історичного вигляду, інтеграція відновлюваних джерел енергії без шкоди для зовнішнього вигляду та оптимізація систем вентиляції та освітлення з використанням сучасних технологій. EPBD передбачає використання непомітних технологій, таких як внутрішньо встановлені сонячні панелі або геотермальні насоси.

Перспективи адаптації історичних будівель до стандартів NZEB: виклики, можливості та інноваційні підходи

Європейський будівельний фонд становить близько 40% від загального споживання енергії в Європі [13] і в даний час близько 35% будівель в ЄС старше 50 років [14]. Щоб зменшити споживання енергії і, таким чином, пом'якшити зміну клімату, необхідно значно підвищити енергоефективність існуючого будівельного фонду. У цьому плані будівлі історико-культурної спадщини є особливими. Згідно з інформацією, опублікованою Кабінетом Міністрів України у квітні 2023 року, в Україні налічується 15 773 пам'ятки архітектури та містобудування, з яких 2 427 мають національне значення, а 13 346 – місцеве. З огляду на те, що історичні будівлі часто використовуються недостатньо, збільшення їх використання може призвести до зниження потреби в нових будівлях із відповідною економією енергії та викидів, пов'язаних із процесом будівництва. Це підтверджується зростаючою кількістю літератури, присвяченої питанням енергоефективності та теплового комфорту в історичних будівлях [15] та дослідницьких програм та проектів. Серед них три основні дослідницькі

програми, що фінансувались ЄС: Енергоефективність для сталого розвитку історичних районів ЄС (EFFESUS), Клімат для культури та Ефективна енергія для культурної спадщини ЄС (ZENCULT). ЄС також фінансував такі проекти, як Co2olBricks – Зміна клімату, культурна спадщина та енергоефективні пам'ятки, в яких спеціально розглядалися шляхи підвищення енергоефективності історичних цегляних будівель у регіоні Балтійського моря. Крім того, розробляються міжнародні стандарти. Наприклад, Європейський комітет зі стандартизації опублікував рекомендації щодо покращення енергоефективності історичних будівель (EN 16883, 2017). Варто відзначити й активізацію відповідних досліджень в Україні. Зокрема, наразі реалізується проект фундаментального, прикладного та експериментального характеру для молодих вчених – «Розробка комплексу рекомендацій з реновації історичних будівель для досягнення показників nZEB на основі енергетичного моделювання».

Незважаючи на певний прогрес, все ще існує значна невизначеність та неоднозначність щодо принципів чи методологій для оцінки доцільності підвищення енергоефективності.

Дослідження перешкод для модернізації історичних будівель до рівня NZEB [16] показали, що є 3 перешкоди, що зустрічаються найчастіше:

1. Високі витрати на модернізацію: витрати на модернізацію історичних будівель часто сприймаються як непропорційно високі порівняно з очікуваним прибутком. Ці витрати зумовлені потребою у спеціальних матеріалах та методах для збереження автентичності.

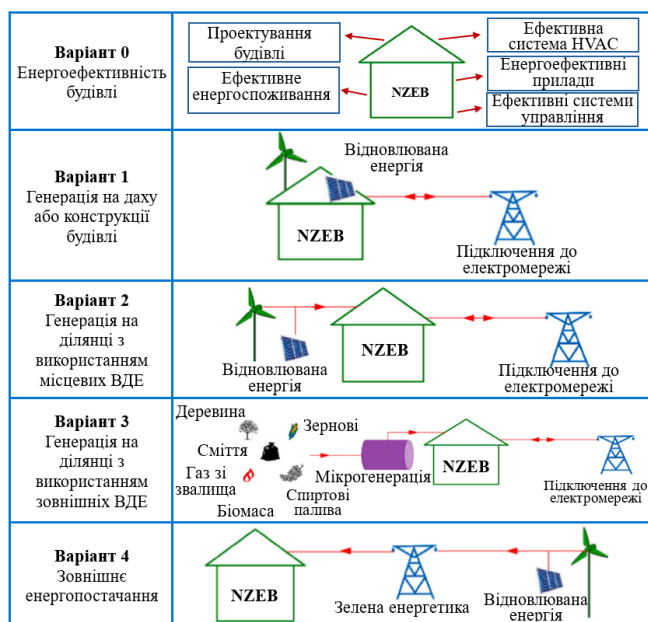
2. Погана координація між зацікавленими сторонами: недостатня співпраця між власниками будівель, політиками, архітекторами та підрядниками. Відсутність узгодженого планування підриває ефективність впровадження заходів.

3. Невідповідність між енергоефективністю та збереженням спадщини: протиріччя між підвищенням енергоефективності та збереженням історичної цілісності є фундаментальним конфліктом, який вимагає комплексних, інноваційних рішень.

В [16] також обґрунтували необхідність довгострокового планування, залучення зацікавлених сторін та політики, орієнтованої на конкретний контекст, а також використанні технологічних заходів (інформаційне моделювання будівель (BIM), аерогелева теплова ізоляція), фінансових стимулів та обміну знаннями для подолання технічних і

фінансових розривів.

Торчелліні та ін. [17] розробили ієрархію варіантів NZEB у порядку бажаного застосування, рис. 1. Заходи з енергоефективності будівель (Варіант 0) є пріоритетними [17], оскільки економія триває протягом усього терміну експлуатації будівлі та не має втрат при перетворенні або передачі, пов'язаних з відновлюваними джерелами енергії. Варіант 0 поєднується з одним або декількома варіантами 1-4. Варіанти відновлюваної генерації в порядку переваги:



**Рисунок 1** – Ієрархія варіантів енергозбереження та відновлюваного виробництва для досягнення NZEB [18]: Варіант 0 поєднується з одним або декількома варіантами 1–4; (Варіант 1) – Створення площі будівлі (що мінімізує використання землі); (Варіант 2) – Виробництво на місці з відновлюваних джерел енергії на місці; (Варіант 3) – Внутрішня генерація і з зовнішніх відновлюваних джерел енергії; (Варіант 4) – Дистанційне постачання

Ця ієрархія заохочує встановлення ВДЕ на/поблизу будівлі, щоб уникнути втрат при передачі. Дана ієрархія корисна для стратегії проектування з широкої точки зору, але вимагає уточнення для прийняття проектних рішень нижчого рівня.

Заходи з підвищення енергоефективності будівель поділяються на пасивні та активні. Пасивні спрямовані на зменшення енергоспоживання через конструктивні та планувальні рішення – утеплення, ефективні склопакети, орієнтація будівлі тощо. Активні заходи включають використання сучас-

них інженерних систем (вентиляція з рекуперацією, опалення на основі ВДЕ) та установок для генерації енергії – сонячних панелей, теплових насосів, вітрогенераторів. Енергоефективна реконструкція передбачає поєднання обох підходів. Загалом дослідження та методи досягнення NZEB розподіляються на три великі категорії: підключення до енергетичної інфраструктури, відновлювані джерела енергії та заходи з енергоефективності (рис. 2).



**Рисунок 2** – Методи досягнення NZEB

#### Підключення до енергетичної інфраструктури

Електромережа є найпоширенішим з'єднанням енергетичної інфраструктури та є зручним для імпорту та експорту електроенергії. Задовольнити попит на електроенергію повністю за рахунок відновлюваної генерації складно через розбіжності в термінах постачання відновлюваних ресурсів і попиту на будівництво. Електромережа заповнює прогалини в постачанні під час нестачі відновлюваних ресурсів і може отримувати електроенергію, коли виробництво перевищує попит у будівлі.

Мережі газопроводів є ще однією важливою енергетичною інфраструктурою, але, як правило, можуть використовуватися лише для імпорту енергії та повинні поєднуватися з іншою енергетичною інфраструктурою для експорту відновлюваної енергії. Синтетичний природний газ можна експортувати в мережу з відновлюваних джерел, але цей процес складний [19] і вимагає значних капіталовкладень і технічного досвіду для виробництва та встановлення продукції, яка відповідає стандартам якості мережі.

Системи централізованого опалення також можуть підтримувати двонаправлені потоки енергії [20], де надлишкове тепло (наприклад, від сонячних колекторів) може бути повернено в мережу централізованого теплопостачання, щоб задоволь-

нити запити інших будівель або збільшити ефективність всієї системи.

Енергію від біомаси/біопалива можна отримати на місці або з розподільчої мережі, коли біомаса перетворюється на придатну для використання енергію за межами території на якій розміщена будівля, і ця енергія згодом доставляється для кінцевого використання через електричну мережу або системи централізованого опалення та охолодження [21].

Зберігання енергії може збільшити власне споживання відновлюваної енергії шляхом зберігання під час надлишку та використання під час дефіциту відновлюваної енергії.

#### Відновлювані джерела енергії

Використання ВДЕ в будівництві є важливим аспектом досягнення NZEB та зниження впливу будівель на навколишнє середовище. Використання сонячної та вітрової енергії, теплові насоси та спалювання біомаси є найбільш поширеними технологіями, які активно використовуються в світі для забезпечення будівель відновлюваною енергією.

Сонячна енергія може вироблятися багатьма способами включаючи фотоелектричну, сонячну теплову енергію та комбіновані. Залежно від місця установки фотоелектричні системи поділяються на зовнішні та локальні. Внутрішня фотоелектрична установка зазвичай використовується, коли на ділянці достатньо місця для встановлення та має безперешкодний доступ сонячного світла; в іншому випадку слід розглянути зовнішню фотоелектричну установку.

Building-applied PV (BAPV) – це підмножина локальних фотоелектричних модулів, де модулі встановлюються на зовнішній стороні готових дахів або стін. Building-integrated PV (BIPV) – це ще одна підгрупа внутрішньої фотоелектричної системи, яка передбачає використання фотоелектричних модулів як зовнішніх будівельних елементів замість звичайних будівельних матеріалів, замінюючи зовнішні поверхні дахів, фасадів, балконів і стін.

Сонячна енергія також використовується для нагріву води та повітря. Сонячні водонагрівачі використовуються для гарячого водопостачання, водяного опалення або з абсорбційними або адсорбційними системами охолодження. В [22] змодельовано застосування сонячних колекторів у будівлях у Косово та повідомили про частку сонячної енергії від 51% до 70% та окупність 9,6 років

для житлових будинків. Надлишок тепла, що виробляється влітку, може зберігатися в сезонній системі накопичення теплової енергії та використовуватись взимку.

Сонячні панелі є одним з найбільш популярних та ефективних способів використання відновлюваної енергії для забезпечення будівель електричною енергією. Системи сонячних панелей часто встановлюються на дахах або фасадах будівель, що дозволяє максимально використовувати природне сонячне опромінення протягом дня. Серед переваг сонячних панелей є їх універсальність, зокрема можливість використовувати енергію на потреби як гарячого водопостачання так і кондиціонування, освітлення та інших потреб. Для будівель із значним споживанням гарячої води ефективнішим буде використання сонячних колекторів, оскільки вони можуть дати більше енергії з одного квадратного метру. В [23] встановлено, що один незасклений сонячний колектор в умовах Єгипту заощаджував від 1282 до 1665 кВт·год на квартиру за рік, тоді як вакуумний колектор – від 2395 до 2995 кВт·год на рік.

Геотермальні насоси є ще одним потужним джерелом енергії, що використовує тепло землі для обігріву або охолодження будівель. Згідно [24] тепловий насос було визначено як найпоширеніше джерело енергії для потреб опалення та охолодження що можна відносити до ВДЕ. У даній роботі для кожного типу будівлі було сформовано дані про частку енергоспоживання та простий термін окупності у порівнянні з різними джерелами енергії (централізоване теплопостачання, електрика, газ) для кожного значення питомих витрат. За результатами розрахунків, частка невідновлюваної енергії для житлових і громадських будівель на території України становить 42-46%, що свідчить про значний потенціал використання теплових насосів як ВДЕ.

Іншим типом ВДЕ є використання вітрогенераторів. Порівняно з фотоелектричними та сонячними тепловими колекторами, вітрові турбіни менш популярні через вищу початкову вартість і обмежені місця з високим і постійним рівнем вітру. Але це може стати конкурентоспроможним варіантом у регіонах, багатих вітром, якщо їх собівартість зменшиться. Вітрові турбіни залежать від змінної швидкості вітру, тоді як фотоелектричні системи залежать від сонячної енергії. Щоб подолати залежність лише від одного відновлюваного джерела та запобігти надмірному розміру

відновлюваних компонентів деякі науковці пропонують використання гібридних фотоелектричних/вітряних систем [25].

Ще одним ВДЕ є енергія біомаси. Енергія біомаси зазвичай використовується для керування системами когенерації, включаючи ТЕЦ і комбіновані системи охолодження, опалення та електроенергії. Системи мікро-ТЕЦ зазвичай мають електричну потужність у діапазоні від 0 до 2 кВт і тому підходять для NZEB у житлових масштабах [26]. Комерційно доступні мікро-ТЕЦ включають двигун Стірлінга, органічний цикл Ренкіна (ORC), двигун внутрішнього згоряння або паливний елемент. Когенераційні системи із зовнішнім спалюванням можуть приймати більшу різноманітність видів палива, оскільки процес згоряння ізольований від робочого тіла енергетичного циклу теплообмінником; ця гнучкість є привабливою, оскільки системи можуть легше використовувати різноманітні форми відновлюваного палива з біомаси. Системи ТЕЦ на основі біомаси привабливі для використання в періоди низької інсоляції або в густонаселених містах, де будівлі розташовані близько одна до одної та затінують одна одну.

В [27] проаналізовано сім систем ТЕЦ на біомасі, включаючи окрему мікро-ТЕЦ із двигуном Стірлінга на деревних пелетах, п'ять спільних мікро- та невеликих ТЕЦ на деревній щепі і водневий паливний елемент внутрішнього масштабу. Результати показали, що ТЕЦ на біомасі в домашньому масштабі не є оптимальною для NZEB, тоді як локальна ТЕЦ на біомасі є кращою завдяки вищій загальній ефективності та співвідношенню електроенергії та тепла.

Ще одним потужним механізмом досягнення будівлями рівня NZEB є енергоефективні заходи.

#### *Енергоефективні заходи*

Заходи з енергоефективності для NZEB загалом згруповані у дві категорії: зменшення навантаження на системи будівлі та забезпечення більш ефективного навантаження. Приклади зменшення навантаження включають удосконалені конструкції будівель (оболонка, планування, орієнтація тощо), захист від сонця та ефективну поведінку мешканців (відкривання вікон за сприятливих зовнішніх умов, вимикання систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, коли вони не використовуються, профіль подачі ГВП відповідно до виробничої потужності теплового насосу для підігріву води тощо). Навантаження

можна забезпечити меншим споживанням енергії шляхом вибору ефективних систем ОВК, обладнання та засобів керування, а також ефективних приладів (освітлення, холодильник, пральні машини, сушарки тощо).

Основними методами зниження теплового навантаження на систему опалення є покращення теплоізоляції, підвищенню теплоємності, підвищення герметичності, оптимізації орієнтації/форми, оптимізації співвідношення вікон до стін, використанню енергоефективного віконного скління, сонячного затінення, пасивних сонячних технологій тощо [28].

В багатьох країнах ЄС та Україні діє досить високий норматив щодо опору теплопередачі для

огорожень (таблиця 1), тому основна увага має бути приділена якісному виконанню робіт (особливо в частині примикань конструкцій між собою), а також мінімізації так званих «містків холоду» та забезпечення герметичності оболонки. В загальній вартості робіт з реконструкції ці елементи не підвищуватимуть суттєво вартість і здебільшого вимагатимуть навчання виконавців «кращим практикам». Перед проведенням термомодернізації історичних будівель рекомендується здійснювати детальну теплотехнічну діагностику, включаючи оцінку технічного стану, виявлення містків холоду, рівня вологості та інших параметрів, що впливають на енергоефективність та збереження будівлі [29].

**Таблиця 1** – Порівняння вимог до оболонки будівель у стандартах NZEB європейських країн та в чинних нормативах для всіх будівель в Україні (коефіцієнт теплопередавання, Вт/(м<sup>2</sup>К)

Вид огорожувальної конструкції	Австрія	Німеччина	Польща	Данія	Україна	Швеція
Зовнішні стіни, стіни, суміщені з неопалюваними об'ємами	0,35	0,28	0,20	0,30/0,40	0,25	Um (середній коефіцієнт теплопередачі) 1-сімейні будинки > 50м <sup>2</sup> – 0,30; 1-сімейні будинки < 50м <sup>2</sup> – 0,33; багатоквартирні будинки – 0,40; не житлові будинки ≤ 50м <sup>2</sup> – 0,33
Стіни, суміщені з кімнатами, що не промерзають (гараж)	0,60	–	–	–	-	
Підлога по ґрунту або над неопалюваним підвалом	0,40	0,35	0,25	0,20	0,20	
Перекриття між будівельними блоками (квартирами)	1,30	–	–	0,50	-	
Стіни між сусідніми будівлями	0,50	–	–	–	-	
Вікна і зовнішні скляні двері в житлових будівлях	1,40	1,30	0,90	енергобаланс: < -17 кВт-год/м <sup>2</sup> /рік	1,11	
Вікна мансардні, світлові ліхтарі, мансардні куполи	–	–	1,10	1,40	1,25	
Зовнішні двері	1,70	1,80	–	1,40	1,43	
Суміщені перекриття, покрівля	0,20	0,20	0,15	0,20	0,14	
Підлога над гаражем, парковкою	0,30	0,28	0,15	–	-	
Внутрішні стіни	–	–	1,00	–	-	

Важливим також є правильний розрахунок площі віконних конструкцій, задля мінімізації річного споживання енергії. Вікна мають великі тепловтрати в порівнянні з зовнішніми стінами, але їх також можна використовувати як пасивне джерело сонячних теплонадходжень для опалення взимку. Затінення вікон може мінімізувати сонячні теплонадходження влітку і більші сонячні теплонадходження взимку, особливо для вікон, що орієнтовані на південь [30]. Важливо уникати перегріву будинку при використанні конструкцій, які включають системи пасивного обігріву від сонця.

Для історичних будівель термомодернізація потребує особливо підходу, адже через архітектурні та культурні обмеження застосування стандартних рішень, як зовнішнє утеплення, часто є неприйнятним. Перед проведенням термомодерні-

зації історичних будівель рекомендується здійснювати детальну теплотехнічну діагностику, включаючи оцінку технічного стану, виявлення містків холоду, рівня вологості та інших параметрів, що впливають на енергоефективність та збереження будівлі [30]. З метою забезпечення такого комплексного підходу Рада з екологічного будівництва Італії розробила спеціальну систему оцінки для сертифікації історичних будівель – GBC (Historic Building Protocol), яка враховує три ключові цілі: енергозбереження, збереження архітектурної спадщини та покращення внутрішнього середовища для користувачів та узгоджена з принципами LEED. Ця система активно використовується науковцями і довела свою ефективність у практиці модернізації історичних об'єктів [31, 32].

Також вагомим критерієм енергоефективності

будівлі є забезпечення відповідного рівня її повітропроникності. Відповідно до наказу [27], для будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії, значення повітропроникності огорожувальних конструкцій при різниці тисків 50 Па, не повинно перевищувати  $1,0 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$  при новому будівництві та  $2,0 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$  при реконструкції. Повітропроникність огорожувальних конструкцій визначається згідно з ДСТУ EN ISO 9972:2022 «Теплотехнічні характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод випробувального тиску».

В [33] проаналізовано вартість життєвого циклу та вплив на навколишнє середовище (з точки зору використання енергії життєвого циклу та потенціалу глобального потепління) NZEB у помірно океанічному кліматі Ірландії. Вони дійшли висновку, що найкраще зосередитися на мінімізації навантажень на опалення приміщень за допомогою добре ізольованих і герметичних конструкцій, а не на встановлення меншої ізоляції та великої системи відновлюваної енергії.

Наступною умовою для досягнення ефективного енерговикористання, після якісного виконання оболонки будівлі, є використання та експлуатація інженерних систем. Для кліматичних умов України, в першу чергу це системи опалення та вентиляції.

Найбільш інвестиційно привабливим заходом у будівлях сьогодні є впровадження погодного та погодинного регулювання теплоспоживання. Це може бути індивідуальний тепловий пункт для будівель із централізованим теплопостачанням або система керування котельним обладнанням для автономних джерел. Ефективне керування таким обладнанням здатне зменшити споживання теплової енергії на 10-30% залежно від типу будівлі та її стану [34]. Ще одним кроком до рівня NZEB є застосування низькотемпературних систем опалення, які сумісні з тепловими насосами. Це можуть бути «теплі підлоги», «теплі стіни» або збільшені за площею конвектори та радіатори. Останні часто мають перевагу завдяки меншій інерційності та зручному регулюванню.

В [35] зазначається, що геотермальні теплові насоси з різними глибинами свердловин із повітряними тепловими насосами для NZEB у Гейтерсбурзі, США, зменшило річне споживання енергії на потреби систем ОВК на 26% при двох свердловинах і на 29% при трьох, а річне споживання енергії будівлею – на 13% і 15%, відповідно.

Геотермальна система також вимагала меншої кількості фотоелектричних установок для досягнення нульового споживання корисної енергії порівняно з повітряною системою, однак загальні витрати (на фотоелектричну систему та обладнання для опалення й охолодження) були нижчими при використанні системи з повітряним тепловим насосом. Додаткове моделювання для NZEB у різних кліматичних умовах США показало, що геотермальні системи заощаджують енергію в холодному кліматі, мають незначну ефективність у помірному кліматі, а іноді навіть споживають більше енергії, ніж повітряні системи, у спекотному кліматі [36].

NZEB зазвичай мають низьку інфільтрацію повітря, тому потребують механічної вентиляції для забезпечення свіжого повітря та видалення забруднень. У добре утеплених будівлях вентиляція становить значну частку енергоспоживання, тож його суттєве зменшення можливе лише із застосуванням рекуперації тепла. В [37] дослідили 68 історичних будівель у Швеції, Фінляндії та Естонії й виявили, що перехід на механічну вентиляцію з рекуперацією тепла значно покращують мікроклімат і енергоефективність таких споруд.

Інший тип систем, що дозволяють гнучко керувати потребами в свіжому повітрі і в більшості випадків можуть бути вбудовані в існуючі будівлі – помірно децентралізовані системи вентиляції на одне-або декілька приміщень з пластинчастими рекуператорами.

Ще одним ефективним типом систем вентиляції є системи з утилізацією теплової енергії на базі теплових насосів. Теплообмінники «земля-повітря» можуть попередньо кондиціонувати зовнішнє повітря або повторно кондиціонувати повітря в приміщенні [38] як для опалення, так і для охолодження. Для обох систем ефект попереднього нагрівання від землі зменшує навантаження на опалення взимку, ефект попереднього охолодження зменшує навантаження на охолодження влітку.

Основним напрямком для систем кондиціонування в NZEB будівлях є системи затінення, що мінімізують потреби в кондиціонуванні. Такі системи можуть бути як стаціонарними (архітектурні елементи на фасадах зі значною інсоляцією) так і рухомі (ролети, маркізи). Найчастіше застосовуються зовнішні рухомі системи, оскільки вони забезпечують гнучкість у реагуванні на зміну погодних умов, дозволяючи ефективно керувати

рівнем сонячних надходжень [39].

Також ефективним є використання системи з утилізацією скидної теплоти для інших потреб будівлі, в першу чергу – систем гарячого водопостачання, а також систем охолодження приміщень за рахунок нічного провітрювання, в періоди, коли зовнішня температура нижча за температуру приміщень.

Варіанти пасивної (природної) вентиляції, керовані вітром або перепадом температур, також розглядалися для NZEB [40]. В [41] порівняно природну та механічну вентиляцію для будинків у Східному Середземномор'ї. Вони виявили, що природна вентиляція зменшила потребу в енергії до 20%, але спричинила більш нерівномірний розподіл температури в будинку.

Ще однією складовою енергоспоживання будівлі є система ГВП. Незважаючи на те, що в окремих країнах ЄС цей показник не враховується при визначенні енергетичного класу будівлі, у більшості держав-членів ЄС споживання енергії на потреби ГВП є обов'язковим елементом розрахунку енергоефективності. Споживання енергії на потреби ГВП є досить суттєвим показником і в переважній більшості не залежить від сезону. Наприклад, для житлових будівель частка споживання енергії на ГВП у країнах ЄС становить 14,8% [42] та 19% у США [43]. Тобто використання більшості відновлювальних джерел енергії може бути найбільш ефективним. Звичайні водонагрівачі містять електричні нагрівальні елементи, газові пальники або сонячні колектори. Електричні та газові водонагрівачі виробляють гарячу воду відносно низької температури, використовуючи високоякісну енергію, що забезпечує низьку ефективність використання первинної енергії. Сонячні водонагрівачі ефективні, але вимагають великих площ для встановлення, а потужність обігріву залежить від погодних умов.

З огляду на те, що забезпечення низьких показників ефективності енергоспоживання може бути забезпечено лише злагодженою роботою інженерних систем – в NZEB ключовим елементом мають стати автоматизовані системи керування енергоресурсами та системи контролю за ефективністю енергоспоживання.

Важливим аспектом функціонування цих систем є контроль параметрів мікроклімату в приміщеннях. Традиційно регулювання мікроклімату здійснюється за допомогою механічних регуляторів прямої дії. Проте сучасні електронні системи

керування забезпечують значно ширші можливості з підтримки оптимальних умов у приміщеннях. Вони дозволяють точно контролювати температуру, вологість та якість повітря, а також інтегруються в автоматизовані системи управління будівлею, зокрема у концепцію «розумного будинку».

Окрім контролю та регулювання, сучасні системи управління енергоресурсами повинні забезпечувати їх раціональний перерозподіл відповідно до реальних потреб будівлі для мінімізації первинного споживання (в тому числі з використанням активних та пасивних систем накопичення енергії в будівлі).

Також важливо враховувати поведінку мешканців, які можуть вибирати енергоефективні параметри в приміщенні (тобто нижчі взимку, вищі влітку, а також змінні температурні режими впродовж дня) і графіки навантаження. Використання енергозберігаючого освітлення та основних побутових приладів (пральних машин, сушильних машин, холодильників тощо) має подвійну вигоду: безпосередньо зменшує використання електроенергії та зменшує навантаження на систему охолодження [44]. В [45] виявили розбіжність в енергетичних показниках будівель NZEB спричинену поведінкою мешканців. На прикладі односімейного будинку збудованого в 2017 року в Орхусі, автори дослідили, як різні профілі моделювання заселення впливають на прогнозоване та фактичне споживання енергії. Поведінка мешканців є основним джерелом невизначеності в моделюванні енергоспоживання будівель, що є критично важливим при сертифікації NZEB і впливатиме в тому числі й на історичні будівлі.

*Приклади реалізації NZEB у історичних об'єктах*

Незважаючи на ряд перешкод, багато проектів реконструкції, пов'язаних із історичними будівлями, вже було здійснено в багатьох країнах ЄС [46], і тому має сенс популяризувати деякі приклади передового досвіду. Проект IEA SHC Task 59 (Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy) і Interreg Alpine Space ATLAS спільно розробили інструмент для обміну прикладами передового досвіду – HiBERAtlas (Historical Building Energy Retrofit Atlas) [47]. У дослідженні [48] наведено два данські проекти, представлені в HiBERAtlas. Перший проект, Ryesgade 30, – це багатоквартирний будинок у Копенгагені з цегляним фасадом. Другим проектом є Osram Building, офісна буди-

вля Копенгагена 1959 року, яка є пам'ятником архітектури, із захищеним фасадом, яка сьогодні діє як культурний центр. Обидва проекти реконструкції досягли значної економії енергії та, як наслідок, скорочення викидів CO<sub>2</sub>, внутрішній клімат в обох будівлях також значно покращився. Крім того, було проведено детальний аналіз можливих віконних рішень і систем вентиляції в Ryesgade 30, а також для Osram Building щодо технологій денного освітлення.

Дослідження [49] демонструє, що за допомогою стратегії модернізації та адаптації PV можна було досягти NZEB для історичної будівлі на півдні Швеції. Однак площа фотоелектричних панелей була не в самій будівлі, а в парку навколо замку. Розміщуючи панелі на луках або автостоянках, як показано в дослідженні, можна виробляти значну кількість електроенергії.

Ще одним прикладом є використання внутрішньої ізоляції в історичній будівлі з конструкцією з дерев'яних балок і стінами з цегляної кладки в рамках енергетичної реконструкції [50]. В дослідженні було оцінено ризик утворення цвілі в дерев'яних балках і на межі між ізоляцією та цегляною стіною, і виявилось, що зазор у 200 мм в ізоляції може бути безпечним рішенням для деяких орієнтацій. Автори не рекомендують застосовувати внутрішню ізоляцію на тонких стінах на північ, а зазор в ізоляції 200 мм призводить до збільшення споживання опалення на 3 кВт·год/м<sup>2</sup>/рік. За результатами модернізації було отримано економію на рівні 39-61%, де суттєво вплинула поведінка мешканців [51].

В Генуї (Італія) для невеликої вілли, що є пам'яткою архітектури, розроблено стратегію модернізації [52], яка передбачала посилення огорожувальних конструкцій з мінімальним візуальним впливом. Деревно-волокнисті ізоляційні панелі (товщиною 80 мм) були обрані для всіх стін, крім східної стіни ванної кімнати та сходів, де перевагу було надано високоефективним аерогелевим панелям (товщиною 30 мм та 40 мм відповідно). Цей остаточний вибір керувався точковими розрахунками, які враховували специфічні геометричні, матеріальні (існуюча стратиграфія) та гіротермічні (наявність вологи) умови стін. Результати показують, що значення коефіцієнта теплопередачі змінилися від 0,79-0,98 Вт/м<sup>2</sup>К до 0,29-0,33 Вт/м<sup>2</sup>К для стін орієнтованих на північ, південь та захід та ізольованих деревним волокном. Коефіцієнт теплопередачі східної стіни ванної кімнати

та сходів до утеплення становив 0,99 Вт/м<sup>2</sup>К, а після ізоляції аерогелем – 0,33 Вт/м<sup>2</sup>К. Дизайн нових сталевих вікон з потрійним склінням гармонійно поєднав сучасні характеристики з історичною естетикою, при цьому значення коефіцієнтів теплопередачі становлять 0,69 Вт/м<sup>2</sup>К для фіксованого скління та до 0,8 Вт/м<sup>2</sup>К для вікон, що відкриваються.

У Беневенто (Італія) для досягнуто рівня NZEB для історичної будівлі Палаццо де Сімоні проаналізували можливі заходи і прийшли до висновку, що використання інтегрованих фотоелектричних покрівель, повітряних теплових насосів та біосумісної теплової ізоляції (пінополістиролу з графітовим покриттям) було ключовим фактором для досягнення балансу між експлуатаційними характеристиками та збереженням культурної спадщини. Модель будівлі було верифіковано на основі даних з енергоспоживання. Початковий клас енергоефективності – D, показник споживання невідновлюваної первинної енергії становив 174,9 кВт·год/м<sup>2</sup>·рік. Після модернізації огорожувальних конструкцій досягнуто класу B із показником 105 кВт·год/м<sup>2</sup>·рік, що означає зменшення споживання невідновлюваної енергії на 40%. У фінальній версії проекту після впровадження всіх енергоефективних заходів будівля досягла енергетичного класу A3, показник споживання невідновлюваної первинної енергії становив 36,6 кВт·год/м<sup>2</sup>·рік, а частка відновлюваних джерел енергії досягла 55% [53].

В Україні прикладом успішної модернізації історичної будівлі є реконструкція та реставрація мистецького центру Jam Factory у Львові. У процесі реалізації проекту було збережено архітектурну цінність будівлі та її окремих історичних елементів. Водночас в об'єкті впроваджено сучасні енергоефективні технології, використано теплові насоси, встановлено сонячні панелі, впроваджено автоматизоване управління інженерними системами, зовнішнім і внутрішнім освітленням [54].

#### 4. Висновки

Дослідження систематизує сучасні підходи до впровадження концепції NZEB будівель як у новому будівництві, так і в історичних об'єктах. На основі аналізу міжнародного досвіду та наукових публікацій було виявлено, що попри численні технічні, економічні та архітектурні обмеження, досягнення рівня NZEB для історичних

будівель є можливим за умови застосування індивідуалізованих, міждисциплінарних рішень.

Ключовим викликом є необхідність поєднання енергоефективності з вимогами до збереження культурної спадщини, що зумовлює обмежене використання традиційних методів утеплення та реконструкції. У цьому контексті особливе значення мають технології енергетичного моделювання, використання фотоелектричних систем (BIPV), теплових насосів, а також сучасних систем керування мікрокліматом.

Практичне значення дослідження полягає в узагальненні кращих реалізованих практик, представлених, зокрема, в межах проєктів IEA SHC Task 59, HiBERAtlas та GBC Historic Building Protocol, які демонструють успішні стратегії адаптації NZEB-рішень до історичного архітектурного середовища.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці нормативної та методичної бази, адаптованої до локального контексту, зокрема в Україні, де тема модернізації будівель спадщини з урахуванням стандартів NZEB є надзвичайно актуальною. Згідно з діючими нормативами, граничне значення питомого первинного енергоспоживання (EP) для житлових будівель становить – 59-117 кВт·год/м<sup>2</sup> в залежності від поверховості та кліматичної зони, для громадських будівель дане значення залежить також від коефіцієнта компактності і становитиме від 17 до 45 кВт·год/м<sup>3</sup>, для будівель закладів освіти – 26-60 кВт·год/м<sup>3</sup>. Такі вимоги визначають енергетичний орієнтир для реконструкції історичних будівель у контексті досягнення рівня NZEB.

Також перспективним напрямом є інтеграція цифрових технологій у проєктування та моніторинг енергоспоживання, що дозволить досягати вищої гнучкості, адаптивності та енергоефективності при збереженні історичної цінності об'єктів.

### Особистий внесок авторів CRediT

**Білоус І.Ю.:** концептуалізація, методологія, постановка задачі. **Гетманчук Г. О.:** методичне забезпечення, аналіз та узагальнення даних, обробка даних. **Крамаренко С.О.:** аналіз та узагальнення даних, обробка результатів, інформаційний пошук. **Гавриш А.В.:** обробка результатів, інформаційний пошук

### Література

1. **Sartori I., Napolitano A., Voss K.** Net zero energy buildings: A consistent definition framework // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 48. – P. 220-232. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.032
2. **Webb A. L.** Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 77. – P. 748–759. doi:10.1016/j.rser.2017.01.145
3. **Bilgin H., Hyraj D.** Sustainable interventions in historic buildings: case of Polytechnic University of Tirana // *Energy and Buildings*. – 2025. – Vol. 343, – P. 115921. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115921>.
4. **Aruta G., Ascione F., Iovane T., Mastellone M.** Double-skin façades for the refurbishment of historic buildings: Energy-economic feasibility for different types of glazing and ventilation rates // *Journal of Building Engineering*. – 2025. – Vol. 103. – P. 112125. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112125>.
5. **Todorović M. S., Ećim-Đurić O., Nikolić S., Ristić S., Polić-Radovanović S.,** Historic building's holistic and sustainable deep energy refurbishment via BPS, energy efficiency and renewable energy – A case study // *Energy and Buildings*. – 2015. – Vol. 95. – P. 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.011>.
6. **Matic D., Calzada J.R., Eric M., Babin M.** Economically feasible energy refurbishment of prefabricated building in Belgrade, Serbia // *Energy and Buildings*. – 2015. – Vol. 98. – P. 74-81.
7. **Cifre A. G.** New Spanish Building Code CTE HE 2019: Main Changes. Zero Consulting Blog. 2020. URL: <https://blog.zeroconsulting.com/en/new-cte-he-2019> (дата звернення 15.05.2025).
8. **Warren L., Dawodu A., Adewumi A.S., Quan C.** Can the UK Deliver Zero Carbon Ready Homes by 2050? // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16. – P. 5820. <https://doi.org/10.3390/su16135820>
9. ASHRAE publishes new guideline on energy efficiency for historic buildings // *ASHRAE News Release*. – Atlanta, 2019. URL: <https://www.ashrae.org/about/news/2019/ashrae-publishes-new-guideline-on-energy-efficiency-for-historic-buildings> (дата звернення: 15.05.2025)
10. Деякі питання стратегічного розвитку енергетичної ефективності будівель: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2023 р. № 1228 р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua>

gov.ua/laws/show/1228-2023-%D1%80#Text (дата звернення: 15.05.2025)

11. Енергоефективність в будівництві: відбувся круглий стіл «Вимоги до будівель NZEB в Україні»: повідомлення на сайті Міністерства розвитку громад та територій України. 9 серпня 2024 р. URL: <https://mindev.gov.ua/news/35838-energoefektivnist-v-budivnictvi-vidbuvsia-kruglii-stil-vimogi-do-budivel-nzeb-v-ukrayini> (дата звернення: 15.05.2025)

12. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії: Наказ Мінрегіону від 06.02.2025 № 168. – Редакція від 01.04.2025 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0284-25> (дата звернення: 15.05.2025)

13. Energy, transport and environment statistics — 2020 edition: Statistical book // Eurostat. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. – 192 p.

14. Overview – Energy Efficiency in Historic Buildings: A State of the Art. – BUILD UP portal, European Commission, published approx. 4 October 2019. – URL: <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-energy-efficiency-historic-buildings-state-art> (дата звернення: 15.05.2025)

15. **Lidelöw S., Örn T., Luciani A., Rizzo A.** Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review // *Sustainable Cities and Society*. – 2019. – Vol. 45. – P. 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.029>.

16. **Sodangi M., Salman A.** Analyzing the Critical Impediments to Retrofitting Historic Buildings to Achieve Net Zero Emissions // *The Open Construction & Building Technology Journal*. – 2024. – Vol. 18. DOI:10.2174/0118748368357448241118063403

17. **Torcellini P., Pless S., Deru M. & Crawley D.** Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition; Preprint. – Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2006. – 15 p.

18. **De Rubeis, T., Nardi, I., Ambrosini, D., & Paoletti, D.** Is a self-sufficient building energy efficient? Lesson learned from a case study in Mediterranean climate // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 218. – P. 131-145. doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.166

19. **Barbuzza E, Buceti G, Pozio A, Santarelli M, Tosti S.** Gasification of wood biomass with renewable hydrogen for the production of synthetic natural gas // *Fuel*. – 2019. – Vol. 242. – P. 520-531. <https://doi.org/10.1016/FUEL.2019.01.079>.

20. **Kim M.-H., Kim D.-W., Lee D.-W., & Heo J.** Experimental Analysis of Bi-Directional Heat Trading Operation Integrated with Heat Prosumers in Thermal Networks // *Energies*. – 2021. – Vol. 14(18). – P. 5881. <https://doi.org/10.3390/en14185881>

21. **Boesten S., Ivens W., Dekker S. C., and Eijndems H.** 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply // *Advances in Geosciences*. – 2019. – Vol. 49. – P. 129-136. <https://doi.org/10.5194/adgeo-49-129-2019>.

22. **Qerimi D, Dimitrieska C, Vasilevska S, and Alimehaj A.** Modeling of the Solar Thermal Energy Use in Urban Areas // *Civil Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 6. – P. 1349-1367. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091553>.

23. **Ibrahim H. S. S., Khan A. Z., Serag Y., & Attia S.** Towards Nearly-Zero Energy in Heritage Residential Buildings Retrofitting in Hot, Dry Climates // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13(24). – P. 13934. <https://doi.org/10.3390/su132413934>

24. **Обідник А.** NZEB в Україні: методологія визначення показників : презентаційні матеріали // Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. – Київ, 2024. – 20 с.

25. **Yue T., Li C., Hu Y., Wang H.** Dispatch optimization study of hybrid pumped storage-wind-photovoltaic system considering seasonal factors // *Renewable Energy*. – 2025. – Vol. 238. – P. 121969. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121969>.

26. **Pellegrino S., Lanzini A., & Leone P.** Techno-economic and policy requirements for the market-entry of the fuel cell micro-CHP system in the residential sector // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 143. – P. 370-382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.007>

27. **Mohamed A., Hasan A., & Sirén K.** Fulfillment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 114. – P. 385-399. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.065>

28. **Fanney A. H., Payne V., Ullah T., Ng,L., Boyd M., Omar F., ... Pettit B.** Net-zero and beyond! Design and performance of NIST's net-zero energy residential test facility // *Energy and Buildings*. – 2015. – Vol. 101. – P. 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.002>

29. **Pettit B., Gates C., Fanney A. H. & Healy W. M.** Design Challenges of the NIST Net Zero Energy Residential Test Facility: NIST Technical Note 1847.

- Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 2015. – 52 p.
30. **Orlik-Kozdoń B., Radziszewska-Zielina E., Fedorcak-Cisak M., Steidl T., Bialkiewicz A., Żychowska M., & Muzychak A.** Historic Building Thermal Diagnostics Algorithm Presented for the Example of a Townhouse in Lviv // *Energies*. – 2020. – Vol. 13(20). – P. 5374. <https://doi.org/10.3390/en13205374>
31. **Baggio M., Tinterri C., Dalla Mora T., Righi A., Peron F., Romagnoni P.** Sustainability of a Historical Building Renovation Design through the Application of LEED® Rating System // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 113. – P. 382-389. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.017>.
32. **Mazzola E., Dalla Mora T., Peron F., Romagnoni P.** An Integrated Energy and Environmental Audit Process for Historic Buildings // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – P. 3940. <https://doi.org/10.3390/en12203940>.
33. **Moran P., Goggins J., & Hajdukiewicz M.** Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate // *Energy and Buildings*. – 2017. – Vol. 139. – P. 590-607. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.029>
34. **Wu W., Skye H. M., & Domanski P. A.** Selecting HVAC systems to achieve comfortable and cost-effective residential net-zero energy buildings // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 212. – P. 577-591. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.046>
35. **Wu W., & Skye H. M.** Net-zero nation: HVAC and PV systems for residential net-zero energy buildings across the United States // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – Vol. 177. – P. 605-628. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.084>
36. **Martinez-Molina A., & Alamaniotis M.** Enhancing Historic Building Performance with the Use of Fuzzy Inference System to Control the Electric Cooling System // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12(14). – P. 5848. <https://doi.org/10.3390/su12145848>
37. **Eskola L., Alev Ü., Arumägi E., Jokisalo J., Donarelli A., Sirén K., & Kalamees T.** Airtightness, Air Exchange and Energy Performance in Historic Residential Buildings with Different Structures. *International Journal of Ventilation*. – 2015. – Vol. 14(1). – P. 11-26. <https://doi.org/10.1080/14733315.2015.11684066>
38. **Ascione F., D'Agostino D., Marino C., & Minichiello F.** Earth-to-air heat exchanger for NZEB in Mediterranean climate // *Renewable Energy*. – 2016. – Vol. 99. – P. 553-563. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.025>
39. **Bazzocchi F., Ciacci C., & Naso V. D.** Optimization of Solar Shading for a NZEB Kindergarten in Florence // *Proceedings*. – 2019. – Vol. 16(1). – P. 48. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019016048>
40. **Sun X., Gou Z., & Lau S. S.-Y.** Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 183. – P. 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.137>
41. **Grigoropoulos E., Anastaselos D., Nižetić S., & Papadopoulos A. M.** Effective ventilation strategies for net zero-energy buildings in Mediterranean climates // *International Journal of Ventilation*. – 2016. – P. 1-17. <https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1203607>
42. Household Energy Consumption in the EU (pie chart, 2020 data). Ілюстрація із статті Energy consumption in households на порталі Statistics Explained, Eurostat. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Household-EnergyConsumption\\_06\\_2020.jpg](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Household-EnergyConsumption_06_2020.jpg) (дата звернення: 15.05.2025)
43. **Pérez-Fargallo A., Bienvenido-Huertas D., Contreras-Espinoza S., Marín-Restrepo L.** Domestic hot water consumption prediction models suited for dwellings in central-southern parts of Chile // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – Vol. 49. – P. 104024. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104024>.
44. **Thygesen R., & Karlsson B.** An analysis on how proposed requirements for near zero energy buildings manages PV electricity in combination with two different types of heat pumps and its policy implications – A Swedish example // *Energy Policy*. – 2017. – Vol. 101. – P. 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.025>
45. **Carpino C., Loukou E., Heiselberg P., & Arcuri N.** Energy performance gap of a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Denmark: the influence of occupancy modelling // *Building Research & Information*. – 2020. – P. 1-23. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1707639>
46. **Herrera-Avellanosa D., Rose J., Thomsen K. E., Haas F., Leijonhufvud G., Brostrom T., & Troi A.** Evaluating the Implementation of Energy Retrofits in Historic Buildings: A Demonstration of the Energy Conservation Potential and Lessons Learned for Upscaling // *Heritage*. – 2024. – Vol. 7(2). – P. 997-1013. <https://doi.org/10.3390/heritage7020048>.

47. Historic Building Energy Retrofit Atlas (HiBER-atlas): база прикладів кращих практик енергоефективної санації історичних будівель / Eurac Research. URL: <https://hiberatlas.eurac.edu/en/welcome-1.html> (дата звернення: 15.05.2025)
48. **Rose J., & Thomsen K. E.** Comprehensive Energy Renovation of Two Danish Heritage Buildings within IEA SHC Task 59 // *Heritage*. – 2021. – Vol. 4 (4). – P. 2746-2762. <https://doi.org/10.3390/heritage4040155>
49. **Gremmelspacher J. M., Campamà Pizarro R., van Jaarsveld M., Davidsson H., & Johansson D.** Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden // *Solar Energy*. – 2021. – Vol. 223. – P. 248-260. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.067>
50. **Harrestrup M., Svendsen S.** Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture // *Building and Environment*. – 2015. – Vol. 85. – P. 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.005>.
51. **Harrestrup M., Svendsen S.** Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades // *Building and Environment*. – 2016. – Vol. 99. – P. 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.019>
52. **Franco G., Mauri S.** Reconciling Heritage Buildings' Preservation with Energy Transition Goals: Insights from an Italian Case Study // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16. – P. 712. <https://doi.org/10.3390/su16020712>.
53. **Romano G., Mancini F.** Transformation of a historical building into a Nearly Zero Energy Building (nZEB) // *Journal of Physics*. – 2022. – Vol. 2385. – P. 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012008>.
54. Ремонт культурних та освітніх закладів: послуга будівельної компанії 7CI Group (м. Київ) – інформаційна сторінка на офіційному сайті 7CI Group. URL: <https://7cigroup.com/posluhy-budivelnoyi-kompaniyi/remont-kulturnykh-ta-osvitnikh-zakladiv/> (дата звернення: 15.05.2025)

Отримана в редакції 15.05.2025, прийнята до друку 23.06.2025

## Nearly zero-energy buildings in contemporary and historic structures: challenges and solutions

**Inna Bilous<sup>1,a</sup>✉, Hanna Hetmanchuk<sup>2</sup>, Semen Kramarenko<sup>3</sup>, Andrii Gavrysh<sup>4</sup>**

<sup>1-4</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine

<sup>a</sup>Institute of General Energy of the NAS of Ukraine, 172 Antonovycha str., Kyiv, 03150, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>[bilouys\\_inna@ukr.net](mailto:bilouys_inna@ukr.net)

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-1655-8642>;

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-1534-9793>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0000-1728-1169>

*Nearly Zero-Energy Buildings (NZEB) represent a priority direction in sustainable development within both European and Ukrainian construction practices. A particular challenge lies in adapting NZEB principles to historic buildings, where it is essential to strike a balance between energy efficiency and the preservation of architectural heritage. The aim of this article is to summarize scientific approaches and practical experiences related to the implementation of NZEB in both contemporary and historic buildings, as well as to analyze the regulatory and technological challenges associated with integrating NZEB standards into the context of heritage architecture. The research methods involve a systematic analysis of over 70 scientific sources, categorized into the following thematic areas: regulatory frameworks for NZEB in EU countries and Ukraine, technical strategies for the adaptation of historic buildings, the use of renewable energy sources, infrastructure integration, and energy efficiency measures. Particular attention is devoted to real-life examples of historic building retrofits, which demonstrate the practical feasibility of achieving NZEB targets without compromising architectural value. According to current Ukrainian regulations, the maximum values of non-renewable primary energy consumption ( $EP_p$ ) for nearly zero-energy buildings (NZEB) in the case of reconstruction are as follows: for residential buildings, from 59 to 117 kWh/m<sup>2</sup>, depending on the number of storeys and the climatic zone; for public buildings, the value also depends on the compactness factor and ranges from 17*

to 45 kWh/m<sup>3</sup>; for educational buildings, it ranges from 26 to 60 kWh/m<sup>3</sup>. The review results reveal a wide range of opportunities for implementing NZEB standards in historic buildings – from the integration of photovoltaic systems and heat pumps to the use of advanced indoor climate control technologies and the optimization of domestic hot water systems. At the same time, the study emphasizes the importance of preliminary thermal diagnostics and the need for an individual approach to each project. The findings can serve as an analytical foundation for the further development of regulatory instruments adapted to historic buildings and as a practical guide for architects and professionals involved in energy-efficient renovation.

**Keywords:** NZEB; Historic building retrofit; Energy modelling; Heritage reconstruction; Renewable energy sources; Energy-saving scenarios

## References

1. Sartori, I., Napolitano, A., and Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220-232.
2. Webb, A. L. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 748-759.
3. Bilgin, H., Hyraj, H. (2025). Sustainable interventions in historic buildings: case of Polytechnic University of Tirana. *Energy and Buildings*, 343, 115921.
4. Aruta, G., Ascione, F., Iovane, T., Mastellone, M. (2025). Double-skin façades for the refurbishment of historic buildings: Energy-economic feasibility for different types of glazing and ventilation rates. *Journal of Building Engineering*, 103, 112125.
5. Todorović, M. S., Ećim-Đurić, O., Nikolić, S., Ristić, S., Polić-Radovanović, S. (2015). Historic building's holistic and sustainable deep energy refurbishment via BPS, energy efficiency and renewable energy – A case study. *Energy and Buildings*, 95, 130-137.
6. Matic, D., Calzada, J.R., Eric, M., Babin, M. (2015) Economically feasible energy refurbishment of prefabricated building in Belgrade. *Energy and Buildings*, 98, 74-81.
7. Cifre, A. G. (2020) New Spanish Building Code CTE HE 2019: Main Changes. Zero Consulting Blog. 2020. Retrieved 15 May 2025 from <https://blog.zero-consulting.com/en/new-cte-he-2019>
8. Warren, L.; Dawodu, A.; Adewumi, A.S.; Quan, C. (2024). Can the UK Deliver Zero Carbon Ready Homes by 2050? *Sustainability*, 16, 5820.
9. ASHRAE publishes new guideline on energy efficiency for historic buildings. – ASHRAE News Release, Atlanta. Retrieved 15 May 2025 from <https://www.ashrae.org/about/news/2019/ashrae-publishes-new-guideline-on-energy-efficiency-for-historic-buildings>.
10. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). Certain issues of strategic development of energy efficiency in buildings: Order No. 1228-r. Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved 15 May 2025 from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1228-2023-%D1%80#Text>
11. Energy efficiency in construction: round table “Requirements for NZEB buildings in Ukraine” was held. Retrieved 15 May 2025 from <https://mindev.gov.ua/news/35838-energoefektivnist-v-budivnictvi-vidbuvsia-kruglii-stil-vimogi-do-budivel-nzeb-v-ukrayini>.
12. Some issues of introducing requirements for nearly zero energy buildings: Order of the Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine dated 06.02.2025 № 168. Retrieved 15 May 2025 from <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0284-25>.
13. Energy, transport and environment statistics – 2020 edition : Statistical book. Eurostat. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 192.
14. Overview – Energy Efficiency in Historic Buildings: A State of the Art. BUILD UP portal, European Commission. Retrieved 15 May 2025 from <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-energy-efficiency-historic-buildings-state-art>
15. Lidelöw, S., Örn, T., Luciani, A., Rizzo, A. (2019). Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 45, 231-242.
16. Sodangi, M., Salman, A. (2024). Analyzing the Critical Impediments to Retrofitting Historic Buildings to Achieve Net Zero Emissions. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 18
17. Torcellini, P., Pless, S., Deru, M. & Crawley, D. (2006) Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition; Preprint. *Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory*, 15.
18. De Rubeis, T., Nardi, I., Ambrosini, D., & Paoletti, D. (2018). Is a self-sufficient building energy efficient? Lesson learned from a case study in Mediterranean climate. *Applied Energy*, 218, 131-145.
19. Barbuza, E., Buceti, G., Pozio, A., Santarelli, M., and Tosti, S. (2019). Gasification of wood biomass with renewable hydrogen for the production of synthetic

- natural gas, *Fuel*, vol. 242, pp. 520–531. doi: 10.1016/J.FUEL.2019.01.079.
20. **Kim, M.-H., Kim, D.-W., Lee, D.-W., & Heo, J.** (2021). Experimental Analysis of Bi-Directional Heat Trading Operation Integrated with Heat Prosumers in Thermal Networks. *Energies*, 14(18), 5881.
21. **Boesten, S., Ivens, W., Dekker, S. C., and Eijndems, H.** (2019). 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply. *Advances in Geosciences*, 49, 129-136.
22. **Qerimi, D., Dimitrieska, C., Vasilevska, S., and Alimehaj, A.** (2020). Modeling of the Solar Thermal Energy Use in Urban Areas. *Civil Engineering Journal*. 6. 1349-1367. DOI: 10.28991/cej-2020-03091553.
23. **Ibrahim, H. S. S., Khan, A. Z., Serag, Y., & Attia, S.** (2021). Towards Nearly-Zero Energy in Heritage Residential Buildings Retrofitting in Hot, Dry Climates. *Sustainability*, 13(24), 13934.
24. **Obidnyk, A.** (2024). NZEB in Ukraine: Methodology for determining indicators. *Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine*, 20.
25. **Yue, T., Li, C., Hu, Y., Wang, H.** (2025). Dispatch optimization study of hybrid pumped storage-wind-photovoltaic system considering seasonal factors. *Renewable Energy*, 238, 121969.
26. **Pellegrino, S., Lanzini, A., & Leone, P.** (2015). Techno-economic and policy requirements for the market-entry of the fuel cell micro-CHP system in the residential sector. *Applied Energy*, 143, 370-382.
27. **Mohamed, A., Hasan, A., & Sirén, K.** (2014). Fulfillment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives. *Applied Energy*, 114, 385-399.
28. **Fanney, A. H., Payne, V., Ullah, T., Ng, L., Boyd, M., Omar, F., ... Pettit, B.** (2015). Net-zero and beyond! Design and performance of NIST's net-zero energy residential test facility. *Energy and Buildings*, 101, 95-109.
29. **Pettit, B., Gates, C., Fanney, A. H. & Healy, W. M.** (2015) Design Challenges of the NIST Net Zero Energy Residential Test Facility: NIST Technical Note 1847. *Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce*, 52.
30. **Orlik-Koźdoń, B., Radziszewska-Zielina, E., Fedorcak-Cisak, M., Steidl, T., Bialkiewicz, A., Żychowska, M., & Muzychak, A.** (2020). Historic Building Thermal Diagnostics Algorithm Presented for the Example of a Townhouse in Lviv. *Energies*, 13(20), 5374.
31. **Baggio, M., Tinterri, C., Dalla Mora, T., Righi, A., Peron, F., Romagnoni, P.** (2017). Sustainability of a Historical Building Renovation Design through the Application of LEED® Rating System. *Energy Procedia*, 113, 382-389.
32. **Mazzola, E., Dalla Mora, T., Peron, F., Romagnoni, P.** (2019). An Integrated Energy and Environmental Audit Process for Historic Buildings. *Energies*, 12, 3940.
33. **Moran, P., Goggins, J., & Hajdukiewicz, M.** (2017). Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate. *Energy and Buildings*, 139, 590-607.
34. **Wu, W., Skye, H. M., & Domanski, P. A.** (2018). Selecting HVAC systems to achieve comfortable and cost-effective residential net-zero energy buildings. *Applied Energy*, 212, 577-591.
35. **Wu, W., & Skye, H. M.** (2018). Net-zero nation: HVAC and PV systems for residential net-zero energy buildings across the United States. *Energy Conversion and Management*, 177, 605-628.
36. **Martinez-Molina, A., & Alamaniotis, M.** (2020). Enhancing Historic Building Performance with the Use of Fuzzy Inference System to Control the Electric Cooling System. *Sustainability*, 12(14), 5848.
37. **Eskola, L., Alev, Ü., Arumägi, E., Jokisalo, J., Donarelli, A., Sirén, K., & Kalamees, T.** (2015). Airtightness, Air Exchange and Energy Performance in Historic Residential Buildings with Different Structures. *International Journal of Ventilation*, 14(1), 11-26.
38. **Ascione, F., D'Agostino, D., Marino, C., & Minichiello, F.** (2016). Earth-to-air heat exchanger for NZEB in Mediterranean climate. *Renewable Energy*, 99, 553-563.
39. **Bazzocchi, F., Ciacci, C., & Naso, V. D.** (2019). Optimization of Solar Shading for a NZEB Kindergarten in Florence. *Proceedings*, 16(1), 48.
40. **Sun, X., Gou, Z., & Lau, S. S.-Y.** (2018). Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. *Journal of Cleaner Production*, 183, 35–45.
41. **Grigoropoulos, E., Anastaselos, D., Nižetić, S., & Papadopoulos, A. M.** (2016). Effective ventilation strategies for net zero-energy buildings in Mediterranean climates. *International Journal of Ventilation*, 1-17.
42. Household Energy Consumption in the EU (pie chart, 2020 data). Retrieved 15 May 2025 from [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:HouseholdEnergyConsumption\\_06\\_2020.jpg](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:HouseholdEnergyConsumption_06_2020.jpg)

43. Pérez-Fargallo, A., Bienvenido-Huertas, D., Contreras-Espinoza, S., Marín-Restrepo, L. (2022). Domestic hot water consumption prediction models suited for dwellings in central-southern parts of Chile. *Journal of Building Engineering*, 49, 104024.
44. Thygesen, R., & Karlsson, B. (2017). An analysis on how proposed requirements for near zero energy buildings manages PV electricity in combination with two different types of heat pumps and its policy implications – A Swedish example. *Energy Policy*, 101, 10-19.
45. Carpino, C., Loukou, E., Heiselberg, P., & Arcuri, N. (2020). Energy performance gap of a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Denmark: the influence of occupancy modelling. *Building Research & Information*, 1-23.
46. Herrera-Avellanosa, D., Rose, J., Thomsen, K. E., Haas, F., Leijonhufvud, G., Brostrom, T., & Troi, A. (2024). Evaluating the Implementation of Energy Retrofits in Historic Buildings: A Demonstration of the Energy Conservation Potential and Lessons Learned for Upscaling. *Heritage*, 7(2), 997-1013.
47. Historic Building Energy Retrofit Atlas (HiBERAtlas). Retrieved 15 May 2025 from <https://hiberatlas.eurac.edu/en/welcome-1.html>.
48. Rose, J., & Thomsen, K. E. (2021). Comprehensive Energy Renovation of Two Danish Heritage Buildings within IEA SHC Task 59. *Heritage*, 4 (4), 2746-2762.
49. Gremmelspacher, J. M., Campamà Pizarro, R., van Jaarsveld, M., Davidsson, H., & Johansson, D. (2021). Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden. *Solar Energy*, 223, 248-260.
50. Harrestrup, M., Svendsen, S. (2015). Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture. *Building and Environment*, 85, 123-133.
51. Harrestrup, M., Svendsen, S. (2016). Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades. *Building and Environment*, 99, 59-72.
52. Franco, G., Mauri, S. (2024). Reconciling Heritage Buildings' Preservation with Energy Transition Goals: Insights from an Italian Case Study. *Sustainability*. 16, 712.
53. Romano, G., Mancini, F. (2022). Transformation of a historical building into a Nearly Zero Energy Building (nZEB). *Journal of Physics: Conference Series*, 2385, 012008.
54. Renovation of cultural and educational institutions: a service from the construction company 7CI Group. Retrieved 15 May 2025 from <https://7cigroup.com/posluhy-budivelnoyi-kompaniyi/remont-kulturnykh-ta-osvitnikh-zakladiv/>

---

Received 15 May 2025  
 Approved 23 June 2025  
 Available in Internet 04 July 2025