

**Дмитро Станіславович Захарченко¹, Ярослав Михайлович Сила²,
Сергій Анатолійович Степенко³**

¹молодший науковий співробітник
Центр протимінної діяльності Міністерства оборони України (Чернігів, Україна)
науковий співробітник
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: dimazakhar@gmail.com

²аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: jaroslav.sila4@gmail.com

³кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ БУДІВЕЛЬ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ НА ОСНОВІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТА НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У статті висвітлено дослідження методології забезпечення електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим та майже нульовим енергоспоживанням. У межах цієї роботи розглянуто основні принципи та технології використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), а також переваги та виклики, пов'язані із впровадженням таких систем. Крім того, проаналізовано приклади успішних проєктів, що демонструють ефективність та потенціал NZEB.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; методологія забезпечення електроживлення; нульове енергоспоживання; потенціал NZEB; енергетична галузь; накопичувачі електроенергії; технології відновлюваної енергетики; електрична мережа.

Рис.: 3. Табл.: 1 Бібл.: 47.

Актуальність теми дослідження. Сучасний світ стикається з безліччю проблем та викликів, одним з яких є глобальне потепління і виснаження природних ресурсів Землі. Тому пошук альтернативних джерел енергії для покращення цієї ситуації є актуальною темою.

Громадські будівлі та споруди відповідають за 40 % від загального споживання енергії та 30...35 % викидів парникових газів. За останні два десятиліття зросла стурбованість щодо невідновлюваних джерел енергії, таких як вугілля, нафта та природний газ. Вони сприяють значним викидам парникових газів, що безпосередньо впливає на кліматичні зміни. Ці фактори спонукали європейських політиків, регулювальні органи та інститути встановити дати досягнення нульового енергоспоживання та пропагувати ідею пасивних будівель, будівель з нульовим викидом вуглецю і будівель з нульовим енергоспоживанням (Net Zero Energy Buildings, NZEB). Так, з 2020 року всі нові будівлі та споруди у ЄС мають відповідати вимогам «будинків з майже нульовим енергоспоживанням» nZEB (nearly Zero Energy Building). Ці вимоги будуть посилені до «будівель з нульовим викидом», починаючи з 2028 року для нових будівель, що належать державним органам, і з 2030 року – для всіх нових будівель [1].

Постановка проблеми. На сьогодні, без перебільшення, велику значущість для людства має розвиток відновлювальної енергетики, оскільки горючі корисні копалини, які являють собою основу виробництва енергії на початку ХХІ ст., мають здатність вичерпуватись, що й станеться вже в недалекому майбутньому. Непогана альтернатива для людства – це сталий розвиток, концепція, завдяки якій у суспільстві навчилися б розумно використовувати та споживати ресурси, що можуть невдовзі зникнути.

Будівля з майже нульовим енергоспоживанням визначається як будівля з дуже високими енергетичними характеристиками, і ця енергія повинна покриватися з відновлюваних джерел, що виробляються на місці або поблизу. Принципи визначення nZEB повинні враховувати всі фінансові, правові, технічні й екологічні аспекти та відповідати сучасним і майбутнім викликам та перевагам.

Вплив зміни клімату та цін на енергоносії спонукає зацікавлені сторони до оптимізації використання енергії в будівлях із метою зменшення її споживання. Завдяки впровадженню енергоефективних стратегій реконструкції також буде зменшено залежність від відновлюваної енергії, що виробляється з непаливних джерел енергії на місці та за його межами.

При досягненні мінімального навантаження на будівлю, ефективно обладнання та системи будуть містити енергоефективне освітлення, системи управління електричним освітленням, високопродуктивну систему ОВКВ (опалення, вентиляції та кондиціонування). Решту потреб в енергії можна буде задовольнити за допомогою технологій відновлюваної енергії, таких як фотоелектричні елементи (PV), сонячні електростанції (СЕС) та сонячні водонагрівачі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Європейський Союз посідає лідерську позицію щодо розроблення і впровадження технологій відновлюваної енергетики [2]. У 2009 році набула чинності Директива про відновлювані джерела енергії (2009/28/ЕС) [3], аби забезпечити сталий розвиток та раціональне ресурсовикористання. Впровадження основних її принципів дозволило досягти поступового зростання у використанні відновлювальних джерел енергії [4]. Задля подолання енергетичної бідності та забезпечення статусу ЄС як «кліматично нейтрального» об'єднання виникла потреба перегляду, що й було зроблено у 2018 році з обраним напрямом на скорочення викидів [5].

Надзвичайно важливим для України, на думку С.О. Кудрі, є застосування ВДЕ для побутових потреб. Передусім це пов'язано з дефіцитом енергії, негативними тенденціями сьогодення в галузі енергетичної системи та незадовільним станом навколишнього середовища. Задля покращення стану довкілля і зменшення ризиків для здоров'я населення варто ефективно використовувати енергію відновлюваних джерел, що також сприятиме сталому енергозабезпеченню [6].

Як зазначають С. О. Кудря, О. О. Рєпкін та Л. В. Яценко, можливість накопичувати велику кількість електроенергії протягом значних термінів її зберігання може сприяти сьгодні створенню водневої енергетичної інфраструктури, складниками якої є обладнання на основі ВДЕ (відновлювальних джерел енергії). Між іншим, уже розроблено концепцію Дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року в Інституті відновлюваної енергетики НАН [7].

У роботі О. Глушка, Н. Лисенко та С. Степенка та ін. «Огляд кращих інноваторів в енергетиці, що впливають на розвиток відновлюваної енергетики» зроблено аналіз новаторів та висвітлено їхній внесок щодо переходу до відновлюваної енергетики. Крім того, наголошено на важливості розвитку ВДЕ, що матиме вагомий крок щодо просування відповідного напрямку в майбутньому. Найголовніші тенденції, як зазначають учені, це: водень і водневі технології, декарбонізація, енергія вітру та сонця, цифрові рішення [8].

Науковці О. Городній, С. Бойко, І. Касаткіна обґрунтували закономірність запровадження до структури автономної системи електропостачання на основі вітроенергетичного комплексу ланки з метою зарядження акумуляторних батарей. До того ж вони запропонували структуру вітроенергетичного комплексу для зарядження акумуляторних батарей, якщо не буде можливості під'єднуватись до централізованого електропостачання [9].

Актуальність сучасних систем автоматизованого контролю і керування мікрокліматом приміщень висвітлено у статті В. Лобова та Л. Єфіменко. Крім того, вчені звернули увагу на неправильні алгоритми роботи або порушення режимів технічного обладнання, що призводить до відхилення від стандартних метеорологічних умов у приміщенні [10].

На переконання Джеккі Де Буркі, спеціально відібрані екологічні будівельні матеріали зроблені в такий спосіб, аби бути енергоефективними і сприяти зменшенню споживання енергії в будівельних спорудах. Зазвичай вони мають хороші ізоляційні властивості, щоб підтримувати сприятливу температуру в будівлі, при цьому зменшуючи необхідність в охолодженні й опаленні. Це, своєю чергою, має позитивний бік – зменшення потреби у викопному паливі та зниження вартості за електроенергію [11].

Голова Асоціації енергоаудиторів України В. Литвин порушує нагальне питання щодо підвищення енергетичної ефективності в українських будівлях, яке є чи не одним з головних, зважаючи на дефіцит енергоносіїв у зв'язку зі знищенням сьогодні енергетичних об'єктів росією під час нищівних ударів. Він зауважує на важливості будівництва різноманітних будівель з пілотним спрямуванням, які мають необхідні заходи й елементи, призначені для будівель nZEB. Подібні будівлі можна брати до уваги як навчально-демонстраційні, що дозволить краще зорієнтуватися в підборі комбінації заходів, враховуючи при цьому важливий показник – вартість/ефективність.

Сьогодні особливо вагомо – це схвалити національні стандарти і вимоги до будівель з близьким до нульового енергоспоживання, а також ретельно підготувати норми, якими будуть послуговуватись надалі в будівельній індустрії. При цьому важливі вимоги не тільки до інженерних систем та конструкцій, а й до самої експлуатації будівель. До того ж варто впроваджувати системи верифікації відповідності будівлі до nZEB, аналізуючи фактичне річне споживання енергії. Це, найімовірніше, матиме сенс, аби стимулювати забудовників, власників і сервісні компанії для досягнення мети – енергонезалежності будівель [12].

Метою статті є дослідження методології забезпечення електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим та майже нульовим енергоспоживанням. У рамках цієї розвідки будуть розглянуті основні принципи та технології використання ВДЕ, а також переваги та виклики, пов'язані із впровадженням таких систем. Окрім того, буде проаналізовано приклади успішних проєктів, що демонструють ефективність та потенціал nZEB.

Виклад основного матеріалу. Передусім з'ясуємо, що являє собою відновлювана енергетика. Це енергетична сфера, яка спеціалізується на одержанні і використанні енергії завдяки відновлюваним джерелам енергії. До них належать періодичні чи сталі потоки енергії, які поширюються в природі та обмежені тільки стабільністю Землі: природна теплова енергія, вітер, променева енергія Сонця, гідроенергія тощо.

Так, 21 % світового енергоспоживання у 2013 році було забезпечено саме з відновлюваних джерел енергії [13]. У перспективі, до 2040 року вже є плани до 40 % світової електроенергії виробляти із відновлюваних джерел, а в Україні – до 2035 року збільшити використання ВДЕ з 4 до 25 % [14].

До основних технологій відновлюваної енергетики належать:

- вітроенергетика;
- гідроенергетика;
- сонячна енергетика;

(на сьогодні наявні три типи сонячних теплоелектростанцій:

- *баитовий* – з центральним приймачем-парогенератором, на поверхні якого зосереджується сонячне випромінювання від плоских дзеркалгеліостатів;
- *параболічний (лотковий)* – розміщуються у фокусі параболоциліндричних концентраторів вакуумні приймачі-труби з теплоносієм;
- *тарілковий* – розташовується у фокусі параболічного тарілкового дзеркала приймач сонячної енергії з робочою рідиною);
- сонячна теплоенергетика (сонячна енергія широко застосовується для теплопостачання, зокрема з гарячим водопостачанням та опаленням, а також для холодопостачання, висушування і кондиціонування повітря);

– геотермальна енергетика (геотермальна енергетика – це промислове одержання енергії, зокрема електроенергії, з термальних підземних вод та гарячих джерел; основне джерело – постійний потік теплоти з розжарених надр, направлений до поверхні Землі) [15];

– біопаливо, біоенергетика (біомаса – органічні речовини, що утворюються в рослинах внаслідок фотосинтезу та можуть бути застосовані для одержання енергії; поширені такі технології використання біомаси в біоенергетиці, як: пряме спалювання (фізичний метод), газифікація, виробництво спиртів і масел для отримання моторного палива, піроліз (хімічні методи), анаеробна ферментація з утворенням метану (мікробіологічний метод) [16].

На сьогодні будівлі з майже нульовим енергоспоживанням мають особливо важливе значення, оскільки під час воєнного стану часті вимкнення електроенергії вимагають рішучих дій та розв'язання нагальних питань. Тож розглянемо практичне визначення nZEB, яке має такі характеристики:

– Бути чітким у своїх цілях і термінах, щоб уникнути непорозуміння і невдач у впровадженні.

– Бути технічно та фінансово здійсненним.

– Щоб бути достатньо гнучкими та адаптованими до місцевих кліматичних умов, будівельні традиції.

– Спіратися на існуючі стандарти та практики енергоефективності.

– Дозволити та навіть сприяти відкритій конкуренції між різними технологіями.

– Бути амбітним з точки зору впливу на навколишнє середовище та розроблятися як відкрита концепція, здатна йти в ногу з розвитком технологій.

– Розроблятися на основі широкої згоди основних зацікавлених сторін (політиків, проєктувальників, промисловості, інвесторів, користувачів тощо).

– Надихати та стимулювати бажання швидшого впровадження [17].

Будівля з майже нульовим енергоспоживанням має на меті досягнення балансу між виробництвом енергії та її споживанням шляхом зменшення втрат та підвищення ефективності існуючих систем. Виробляти таку ж кількість енергії з меншою кількістю природних ресурсів та отримувати ту саму послугу з меншою кількістю енергії. Цей процес включатиме:

а) перетворення будівлі на енергоефективну шляхом зменшення споживання енергії за рахунок використання огорожувальних конструкцій, в саме фасаду, стін, вікон та плит перекриття даху, стелі та підлоги. Це може вимагати інвестицій у вікна та двері, а також утеплення стін та даху;

б) усунення використання викопного палива, яке використовується існуючими неефективними системами та обладнанням (ОВКВ та освітлення тощо);

в) забезпечення відновлюваної енергії на місці та коли це можливо [17].

Майже нульова або дуже мала кількість енергії, що потрібна, може бути вироблена на місці (в рамках схеми нетто-обліку) або в найближчій зоні (в рамках схеми віртуального нетто-обліку). Отже, nZEB підключені до електричних мереж, використовуючи їх як резервну систему для забезпечення балансу потужності. Аналітично, надлишкова електрика, що вводиться в мережу (під час низьких інтервалів споживання енергії будівлі), може бути використана під час низького виробництва енергії [18].

Дійсно, вивчаючи коефіцієнт самоспоживання житлових будівель південної Європи (будівлі з установками PV в рамках схеми нетто-обліку), можна зробити висновок, що середній коефіцієнт самоспоживання таких будівель коливається між 30 і 35%. Отже, майже нульове або дуже низьке споживання енергії слід вивчати з огляду на енергетичні транзакції з електричними мережами [19].

Розглянемо технічні особливості систем енергозабезпечення будівель з нульовим енергоспоживанням та особливості застосування відновлювальних джерел при їх застосуванні для енергозабезпечення будівель з нульовим енергоспоживанням.

Архітектурно-технічні передумови створення nZEB:

а) Оптимізація архітектурної форми [20; 21]:

1. орієнтація будівлі відповідно до сонячної активності;
2. мінімізація тепловтрат за допомогою компактної форми;
3. використання природного освітлення;
4. сонцезахисні елементи (навісні фасади, жалюзі, бриз-бреки).

б) Високоєфективна теплова оболонка:

1. товста теплоізоляція стін, даху, підлоги ($U \leq 0.15-0.20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$);
2. три- та чотиришарові енергозберігаючі склопакети;
3. мінімізація містків холоду;
4. застосування паро- й повітронепроникних шарів;
5. використання тепловідбивних покриттів.

Технічні системи енергозабезпечення в ZEB [22]:

I. Системи виробництва енергії:

1. Сонячні електростанції (СЕС) є найпоширенішим джерелом енергії у nZEB. Переваги: модульність, доступність, просте обслуговування. Види сонячних панелей: монокристалічні, полікристалічні, тонкоплівкові. За методом встановлення найбільш популярними є інтеграція у дах і фасад (BIPV).

2. Сонячні колектори часто застосовують для гарячого водопостачання та систем опалення через накопичувачі тепла. Вони є ефективними у весняно-осінній сезон.

3. Теплові насоси (повітря – повітря, повітря – вода, геотермальні) забезпечують високий COP (3–5), часто є основним джерелом опалення/охолодження. Геотермальні системи є більш стабільними, але дорожчими в монтажі у порівнянні з тепловими насосами.

4. Вітрогенератори малої потужності застосовуються рідше через залежність від місцевих умов, є доцільними в сільській та замиській місцевості.

5. Системи зберігання енергії показують високу ефективність та доцільність у складі nZEB, найчастіше застосовують акумуляторні батареї (LiFePO₄, нікель-марганець-кобальтові NMC), геліоакумулятори тепла та інтелектуальні теплові буфери.

II. Системи управління енергією:

1. Системи керування накопичувачами електроенергії (BMS) проводять моніторинг у режимі реального часу, прогнозує прогнозування виробництва енергії PV, проводить автоматичне балансування навантажень, адаптивне управління вентиляцією, освітленням, опаленням тощо.

2. Модуль «розумний будинок» включає в себе датчики присутності, сенсорний контроль мікроклімату, віддалене управління та оптимізація за графіками для максимальної ефективності використання наявних енергоресурсів.

III. Системи HVAC (опалення, вентиляція, кондиціонування):

1. Механічна вентиляція з рекуперацією тепла (коефіцієнт рекуперації 85–95%) зменшує тепловтрати на вентиляцію до 4–5 разів.

2. Низькотемпературні системи опалення включають у себе теплі підлоги, стелі, стінові панелі, забезпечують оптимальну роботу в комбінації з тепловими насосами.

3. Пасивні системи охолодження включають у себе системи нічного провітрювання, використання теплоємності внутрішніх конструкцій (бетон, камінь), зеленого даху.

Енергоефективність та зменшення споживання:

а) Світлодіодні системи освітлення в комплекті з датчиками руху та освітленості, можливістю безступінчатого регулювання яскравості освітлення.

б) Енергоефективна побутова техніка (A+++)

в) Використання відпрацьованої енергії, а саме рекуперація тепла стічної води, повторне використання тепла кондиціонерів та холодильників тощо.

Інтелектуальне планування енергобалансів: для досягнення нульового балансу річні графіки мають бути максимально вирівняні, тобто повинно відбуватись сезонне планування енергопотоків [23]:

а) літній профіцит електроенергії зберігається в акумуляторах або передається в мережу;

б) взимку дефіцит компенсується оптимальною роботою теплового насоса та тепловими буферами;

Переваги систем енергозабезпечення nZEB [24]:

- а) мінімальні експлуатаційні витрати;
- б) зменшення залежності від централізованих мереж;
- в) суттєве скорочення викидів CO₂;
- г) стабільний внутрішній мікроклімат;
- д) підвищення вартості нерухомості.

Виклики та обмеження nZEB:

- а) високий обсяг початкових інвестицій;
- б) залежність від кліматичних умов (особливо для PV);
- в) потреба у великій площі для розміщення сонячних панелей;
- г) складність проектування та інтеграції систем;
- д) необхідність спеціалізованого технічного обслуговування.

Окремої уваги заслуговують системи накопичення енергії у складі систем енергозабезпечення будівель із нульовим енергоспоживанням.

1. Роль та значення акумуляторних систем у nZEB [25]:

У будівлях з нульовим енергоспоживанням акумулятори виконують критично важливі функції:

- Балансування енергопотоків між виробництвом та споживанням.
- Компенсація нерівномірності генерації.
- Стабілізація мікромережі.
- Забезпечення автономності.
- Вирівнювання сезонних дисбалансів.

2. Основні типи акумуляторів, що використовуються для даних завдань:

2.1. Літій-залізо-фосфатні LiFePO₄ (LFP). Переваги: довговічність, безпека, ефективність. Недоліки: нижча щільність енергії [26,27].

2.2. Нікель-марганець-кобальтові (NMC). Переваги: компактність, високий струм. Недоліки: менший ресурс, більша пожежонебезпека.

2.3. Літій-титан-оксидні (LTO). Переваги: надвисокий ресурс, робота у широкому температурному діапазоні. Недоліки: висока ціна.

2.4. Свинцево-кислотні акумулятори (AGM/GEL). Переваги: низька ціна. Недоліки: малий ресурс, низький ККД.

2.5. Проточні батареї (VRFB). Переваги: великий ресурс, безпека. Недоліки: габарити, висока вартість.

3. Технічні параметри [28]:

- Ємність: 10...30 кВт·год для приватних будинків.
- Потужність: 3-15 кВт у побутових системах.
- ККД: LFP – 94...97 %, NMC — 92...95 %.
- DoD: LFP до 95 %.
- Термін служби: LFP – 10...20 років.

4. Архітектура систем. Компоненти: акумуляторний блок, EMS, BMS, інвертор, контролери, система охолодження [29].

5. Режим роботи:

- Денний: накопичення енергії.
- Нічний: живлення від батарей.
- Стабілізація мережі.
- Резервне живлення.

6. Алгоритми керування:

- Прогнозування генерації.
- Оптимізація заряду/розряду.

- Побудова оптимального енергобалансу.

7. Вимоги до безпеки [30]:

- Контроль температури.

- Вентиляція.

- Пожежні системи.

8. Економіка [31]:

- Вартість: LFP – 300...600 \$/кВт·год.

- Окупність: 6...12 років.

9. Перспективи:

- Гібридні системи тепло + електрика.

- Водневе зберігання.

- Твердотільні батареї.

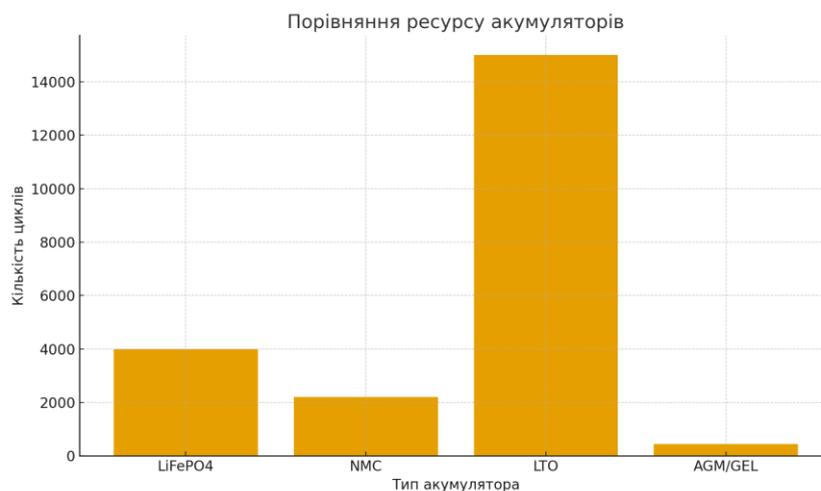


Рис. 1. Графік порівняння ресурсу акумуляторів [32; 33]

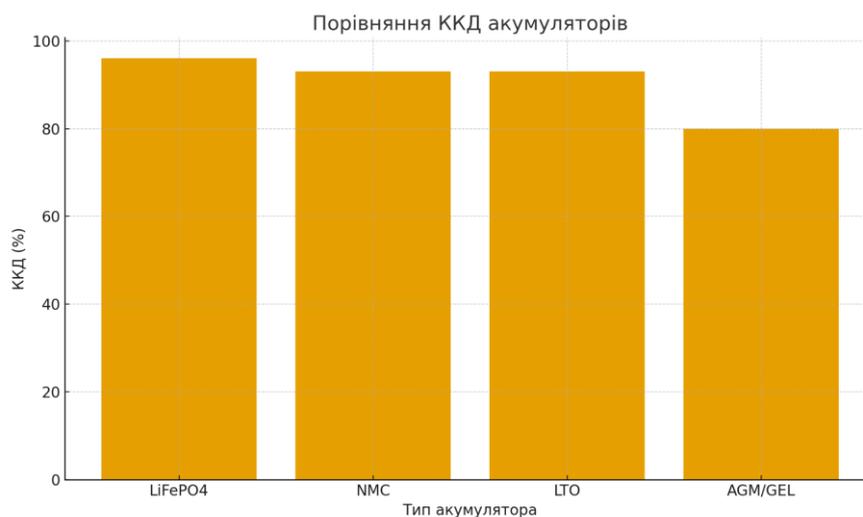


Рис. 2. Графік порівняння ККД акумуляторів [32, 33]

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця акумуляторів [34]

Тип	Цикли (ресурс)	ККД (%)	DoD (%)	Вартість (\$/кВт·год)
LiFePO4	3000–7000	94–97	90–95	300–600
NMC	1500–3000	92–95	85–90	350–700
LTO	10000–20000	90–95	90–95	900–1500
AGM/GEL	300–600	75–85	50–70	150–250

Акумулятори є ключем до ефективності та автономності Zero Energy Buildings.

З огляду на розробку енергоефективних конструкцій, посилання [23,35] надають огляд критеріїв проєктування будівель, які можуть зменшити теплове та охолоджувальне навантаження житлових будинків. Ці критерії базуються на орієнтації будівель, формі, системі оболонки, пасивних механізмах опалення та охолодження, затінення та скління. Ці роботи досліджують оптимальні стійкі і енергоефективні варіанти проєктування будівель. Заходи з енергетичної ефективності та встановлення технологій ВДЕ для будівель, призначених для перетворення на nZEB, досліджуються в [36], з використанням квазідинамічних інструментів та моделей симуляції. У [37] представлені принципи інтегрованого проєктування та технології розумних будівель (разом з методологіями енергетичної ефективності та інноваційними техніками), підкреслюючи, що інтеграція розумних технологій вимагає цілісного підходу, який враховує всі аспекти сталого розвитку з ранніх етапів проєктування будівлі, щоб повністю скористатися перевагами процесу та можливостями, які пропонують розумні мережі.

Що стосується LCCA (оцінка витрат на життєвий цикл), то у специфічній літературі є багато випадків досліджень. Серед них, у [38] представлена базова методологія LCCA, що акцентує увагу на аналізі теперішньої вартості компонентів системи, з метою розрахунку загальних витрат на володіння протягом її життєвого циклу, включаючи витрати на придбання, установку, експлуатацію та обслуговування. LCCA пропонується для системи енергії на основі СЕС та акумулятора в житловому будинку в Індії, використовуючи аналітичні вирази для розрахунку періоду окупності.

У роботі [39] представлено порівняння LCC п'яти альтернативних систем опалення, а саме GDHS, котлів на природному газі, котлів на пелетах, GCHP та технологій вугільних котлів, у чотирьох кліматичних зонах Туреччини.

До прикладу, дослідження, описане в [17], зосереджується на впровадженні концепції колективного самоспоживання nZEB шляхом використання СЕС та геотермальних енергетичних систем у багатоквартирному житловому будинку. Представлена концепція nZEB базується на високій продуктивності енергії систем СЕС у країнах Середземномор'я. Крім того, була обрана центральна геотермальна енергетична система для забезпечення як опалення, так і охолодження потреб багатоквартирного житлового будинку, завдяки технологічній зрілості цих систем, а також їхній високій ефективності. У цьому випадку дослідження враховується розрахунок споживання енергії решти приладів, тобто електричне споживання будівлі до встановлення ГТН (геотермального теплового насоса). Що стосується інших електричних приладів, то зазначається, що вони становлять приблизно 20...25 % річного споживання енергії. З цієї причини ці компоненти споживання енергії не повинні бути проігноровані в подальшому аналізі. Загальна площа кожного житла вважається 150 м². Враховуючи, що висота стелі приблизно 3,2 м, загальний об'єм опалювального та охолоджувального простору будівлі дорівнює 2880 м³. Крім того, будівля орієнтована на південний схід і розташована в міській зоні.

Як альтернативне рішення, замість геотермальної енергетичної системи можуть бути встановлені сонячні теплові панелі. Хоча сонячні теплові панелі можуть зменшити необхідний розмір ГТН, для спрощення цей сценарій не розглядається. Отже, в цій статті обрано випадок дослідження поверхневої геотермальної енергетичної системи. Вона складається з ГТ (геотермального теплообмінника) у вертикальному розташуванні, щоб займати якомога менше простору для установки. Підземна тепла енергія постачається до будівлі за допомогою вискоелективних ГС (гідрравлічних систем).

Крім того, використовуються Енергетичні служби (електричні та теплові) для покращення ефективності nZEB. Схематична діаграма запропонованої гнучкої системи nZEB представлена на рис. 3 [17].

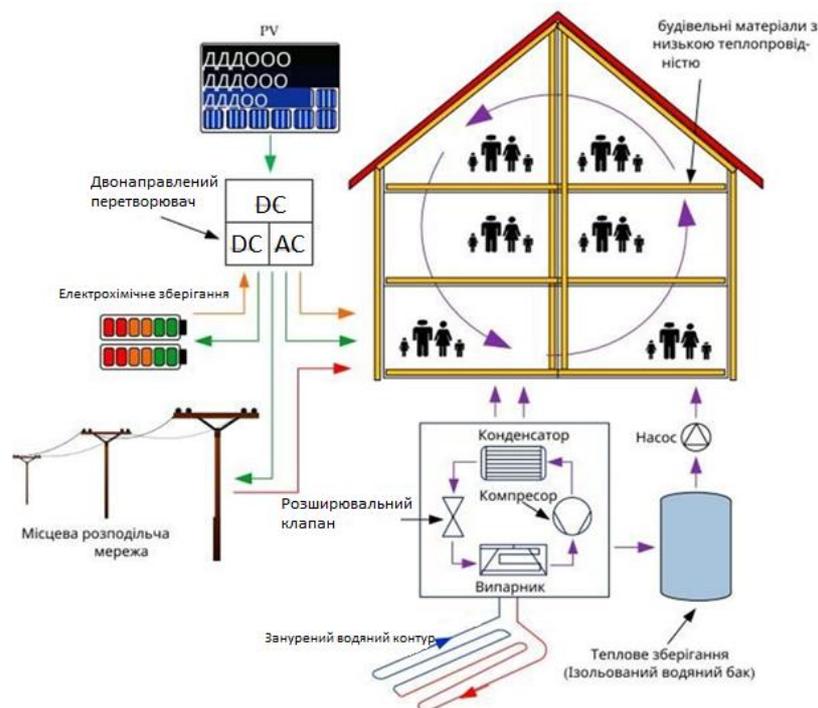


Рис. 3. Схематична діаграма запропонованої концепції nZEB [17]

У статті [17] запропоновано ефективне поєднання технологій ВДЕ, встановлених на типовому багатоквартирному житловому будинку в міському середовищі, зосереджуючи увагу на Середземномор'ї. Ця гібридна енергетична система складається із СЕС та геотермального блоку, щоб задовольнити вимоги до електричних, теплових та охолоджувальних навантажень. Крім того, була повністю проаналізована методологія розрахунку енергетичних служб для теплових/охолоджувальних та електричних навантажень, так що вся система була спроектована з урахуванням концепції nZEB. Технологія, що використовує геотермальну енергію, є дуже ефективною та екологічно чистою. Однак необхідно мати відповідний накопичувач тепла, щоб задовольнити відхилення теплового навантаження. У цій статті накопичувач теплової енергії був спроектований так, щоб покривати максимальні потреби навантаження в будь-яку пору року. Це є значною проблемою, оскільки основний геотермальний блок може балансувати лише середнє річне теплове/охолоджувальне навантаження. Об'єм накопичувача тепла повинен бути ретельно спроектований, щоб його можна було встановити під землею.

Що стосується ЕЕСУ (електрична енергетична одиниця зберігання), була представлена оптимальна методологія для їх розрахунку, враховуючи відповідні енергетичні транзакції з електричною мережею. Важливість встановлення ЕЕСУ полягає в тому, що чим більша потужність ЕЕСУ, тим менше енергетичних транзакцій з електричною мережею спостерігається. У цьому контексті запропонована методологія розмірності сприяє уникненню негативного впливу на роботу електричної мережі (такого як зворотний потік енергії, підвищення напруги, помилкове спрацьовування захисних заходів тощо) внаслідок збільшення проникнення житлових систем СЕС у той же фідер.

Отже, для забезпечення роботи електричної мережі та уникнення обмеження роботи для одиниць ВДЕ передбачається масове встановлення ЕЕСУ як в електричній мережі, так і в будівлях. Тому аналіз енергетичних транзакцій між будівлями з майже нульовим споживанням енергії та електричною мережею, а також оптимальний розмір ЕЕСУ, представлені в цій роботі, є надзвичайно важливими для розподільчих системних операторів та політиків, надаючи цінні оцінки щодо необхідності програм субсидій для трансформації nZEB, а також впливу на мережу через коливний профіль виробництва СЕС.

Що ж являє собою складова творення сталого розвитку світової спільноти? Це передусім енергоефективність, яка об'єднує практично всі сфери економіки. Якщо розглядати енергетичну ефективність у будівництві, то йдеться про всі етапи створення будівлі – від обговорення майбутнього проєкту, власне будівництва й аж до експлуатації будівлі. Загалом енергоефективність – це про злагоджений механізм, який вимагає постійної реакції на ризики та моніторингу [40].

Сьогодні питання щодо потреби зменшення залежності від викопного палива є дуже актуальним та вимагає негайного розв'язання. Країни-члени ЄС [41] у 2020 році здійснили аналіз енергоспоживання, з'ясувавши, що домогосподарства, як сектори економіки, є найбільш залежними від енергії.

У роботі [42] проаналізовано дії Європейського Союзу стосовно розроблення різноманітних моделей проєктування активних та з майже нульовим споживанням енергії будівель. Крім того, наведено оцінку передових енергоефективних технологій та матеріалів (приміром, інтегровані фотоелектричні системи і розумне скло) з розрахунком існуючої будівлі, яка побудована за принципом nZEB, що застосовує ВДЕ в обсязі, що значно перевищує енергетичну потребу. Інтегрований проєкт огорожувальних конструкцій та систем, який запропонований авторами, створює надлишок енергії, який можливо при цьому віддати в мережу.

До узгодження мінімальних вимог до огорожувальних конструкцій в Італії приватний житловий будинок, побудований у 2013 році на півночі країни, проєктувався як висоенергоефективний. Джерелом енергії житлового будинку [35; 42], згідно з проєктом будівництва, є автономна теплоелектроцентраль. До її складу входить тепловий насос «повітря – вода» з електричним живленням (корисна теплова потужність 13,1 кВт), що відповідає як за підготовку гарячої води, так і кондиціювання повітря взимку з підключенням «теплої» підлоги. Найвні відновлювальні джерела енергії – фотоелектричні панелі (79,5 м²) та геліосистема (6,6 м²), що «покривають» 94 % споживання енергії.

Докладний підхід щодо оцінювання стану енергоефективності nZEB житлового фонду показав автор [43], в якому головна увага приділена новому будівництву в країнах Східної Європи: Румунії, Хорватії, Естонії, Чехії, Болгарії, Польщі, Словаччині, Литві та Латвії. Використовуючи національні публікації та законодавчі акти кожної з представлених країн, автор [43] створив чек-лист (спільно з 14 національними експертами) оцінки відповідності побудови нових будівель таким параметрам:

- коефіцієнти перетворення первинної енергії;
- вимоги теплового комфорту;
- політика у сфері ВДЕ (державне заохочення, тарифні умови);
- динаміка використання теплових насосів домогосподарствами;
- вимоги до огорожувальних конструкцій;
- темпи будівництва житлових будівель;
- порогове значення енергоефективності будівлі.

Застосування енергії, створеної відновлювальними джерелами енергії, є значущим фактором впливу зіставлення нової та/або реконструкції існуючої будівлі як такої, споживання енергії якою близьке до нуля. Для прикладу, у [44] зроблено оцінювання параметрів огорожувальних конструкцій і систем відновлювальної енергетики з моделюванням алгоритму багатокритеріальної оптимізації NSGA – II для різних кліматичних умов Туреччини. Це дало можливість імітувати навантаження на охолодження будівлі та опалення.

Методологія, запропонована в роботі [44], могла б застосовуватись як загальний підхід проєктування будівель з майже нульовим споживанням енергії – від попереднього етапу будівництва до будівництва для досягнення nZEB і оцінювання впливу мінімальних кліматичних змін на використання ВДЕ. При цьому варто враховувати кількісну частку покриття енергії за рахунок відновлювальних джерел та відсутність стандартизованого підходу.

Дослідження [45] також є оцінкою впливу кліматичних змін на характеристики будівель з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB) та стійкості з погляду енергобалансу. Автори доводять, роблячи аналіз будівлі, розташованій на півдні Італії з середземноморським кліматом, що в таких кліматичних умовах зменшення потреби в опаленні може компенсувати збільшення потреби в охолодженні. Так, за найгіршого кліматичного сценарію, величина чистої первинної енергії може змінитися з 25,4 до 19,5 кВт·год/м²/рік із рівнем власного споживання 85 %. Однак у разі досягнення навесні робочої температури вище 30 °C будівля може перегріватись. Це створить потребу більш частого використання охолодження та дисбаланс «виробництво – використання» енергії у перехідний період.

Безумовно, запропоновані рішення потребують значних грошових інвестицій, тому для домогосподарств практична модернізація будівель рівня nZEB є досить коштовною. Відповідно до [46], країни Європи використовують програми заохочення домовласників у будівництві будівель із майже нульовим споживанням енергії. Наявний проєкт Housing 4.0 Energy досліджує розвиток доступних будинків з нульовим енергоспоживанням у трьох країнах: Бельгії, Нідерландах та Ірландії. Для прикладу, політика Нідерландів щодо питання розвитку nZEB спрямована на людей із середнім і нижче середнього рівнями доходів. Некомерційні соціальні агентства з оренди у фламандській схемі надають будинки групам з низькими доходами. В Ірландії місцева влада надає соціальне житло заявникам, які перебувають у списках очікування. У такий спосіб результати запропонованих урядом схем створюють екологічну, соціальну та економічну стійкість для домогосподарств із середнім та/або нижче середнього доходом, надаючи енергоефективні, комфортні та доступні будинки. Автори [46] запропонували бізнес-моделі схем, які допоможуть масштабувати доступні будинки з нульовим або близьким до нуля енергоспоживанням в інших країнах.

Приклади успішних проєктів у світі

Центр Буллітта в Сіетлі, штат Вашингтон, – комерційна офісна будівля, яка генерує стільки ж енергії, скільки споживає. Це проєкт будівлі з нульовим енергоспоживанням, який містить велику сонячну батарею, систему збору дощової води та елементи енергоефективного дизайну, такі як потрійні склопакети та суперізоляційні стіни.

Центр підтримки досліджень у Голдені, штат Колорадо, – це будівля з нульовим енергоспоживанням, яка слугує штаб-квартирою Національної лабораторії відновлюваної енергії. Він має такі енергоефективні конструктивні особливості, як добре ізольовані огороження будівлі, ефективні системи освітлення та велику сонячну батарею, яка забезпечує більш ніж достатньо енергії для задоволення енергетичних потреб будівлі.

Центр інтерактивних досліджень сталого розвитку (CIRS) – це будівля з нульовим енергоспоживанням в Університеті Британської Колумбії у Ванкувері, Канада. Він має низку енергоефективних конструктивних особливостей, зокрема, геотермальне опалення та охолодження, зелений дах і систему збору дощової води. У будівлі також є інноваційна система природної вентиляції, яка допомагає регулювати температуру в будівлі та покращувати якість повітря в приміщенні [47].

Висновки. Сьогодні для нашої країни серед головних завдань є створення науково-технічної бази відновлюваної енергетики, яка б поступово замінила традиційні методи отримання енергії на практично невичерпні екологічно чисті відновлювані джерела енергії. Тому варто шукати перспективні шляхи розвитку техніки та технологій на основі використання енергії відновлюваних джерел, що дасть Україні гарантію енергетичної безпеки.

На жаль, низький рівень довіри до державної політики щодо стимулювання розвитку відновлюваної енергетики України є основним стримувальним фактором. Передусім відсутні плани щодо довгострокового розвитку після 2030 року енергетичного вітчизняного сектору. Останні зміни також мають негативний вплив – скасування податкових пільг для ВДЕ, збільшення вартості приєднання до електромереж та зменшення розміру «зелених» тарифів.

Які ж шляхи розв'язання порушеного нами питання? На нашу думку, необхідно проводити ефективну комунікаційну роботу з місцевими органами самоуправління з наданням економічних, соціальних і екологічних переваг проектам відновлюваної енергетики. Крім того, варто розробляти інформаційно-освітні програми з метою пояснення переваг і можливостей освоєння енергії ВДЕ, надання інформації щодо оцінки технічного потенціалу різних видів ВДЕ у регіонах України.

У сьогоdnішніх реаліях пошук та розробка методології забезпечення електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим енергоспоживанням є актуальною та надважливою темою. Описана методологія дає розуміння щодо складності та проблематики проектування будівель з нульовим енергоспоживанням. Однак незважаючи на це, переймаючи європейський досвід проектування, зведення та експлуатації будівель, ми повинні розвивати і впроваджувати будівництво споруд з низьким рівнем енергоспоживання в українській енергетичній сфері.

У роботі розглянуто види відновлюваних джерел енергії, основні принципи й технології використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), методологію забезпечення електроживлення для будівель з нульовим енергоспоживанням, а також переваги та виклики, пов'язані із впровадженням таких систем. Окрім того, проаналізовано приклади успішних проєктів, що демонструють ефективність та потенціал nZEB.

Принципи визначення nZEB повинні враховувати всі фінансові, правові, технічні, екологічні аспекти та відповідати сучасним і майбутнім викликам та перевагам. Відповідне та практичне визначення nZEB повинно бути чітким у своїх цілях і термінах, технічно та фінансово здійсненним, достатньо гнучким та адаптованим до місцевих кліматичних умов, спиратися на чинні стандарти і практики енергоефективності.

Таким чином, нами заплановано надалі розглядати питання щодо розробки моделей проектування активних та з майже нульовим споживанням енергії будівель, шукати нові підходи в методології забезпечення енергоживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим енергоспоживанням. Крім того, будемо враховувати впровадження європейських nZEB та успішних проєктів у цій сфері, які мають позитивне загальне покращення визначень будівель з майже нульовим споживанням енергії, розглядати різноманітні технології та рівні енергоефективності, що можуть бути досягнені і в умовах України, у тому числі завдяки схожості клімату окремих регіонів України з країнами Європи.

Поточне дослідження проводиться в межах проєкту науково-дослідної роботи молодих вчених №ДР 0123U100975 за підтримки МОН України.

Список використаних джерел

1. European Commission. (n.d.). *Nearly-zero energy and zero-emission buildings*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en.
2. Publications Office of the European Union. (2021). *EU's global leadership in renewables: Final synthesis report*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/publication/8a9b9147-3aeb-11ed-9c68-01aa75ed71a1/language-en>.
3. European Parliament & Council of the European Union. (2009). *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources*. *Official Journal of the European Union*, L 140, 16–62. <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>.
4. European Commission. (n.d.). *Renewable energy directive*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
5. European Parliament & Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*. *Official Journal of the European Union*, L 328, 82–209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>.

6. Кудря, С. О. (ред.). (2020). *Відновлювані джерела енергії: монографія*. Інститут відновлюваної енергетики НАН України.
7. Кудря, С. О., Репкін, О. О., Яценко, Л. В., Ткаленко, М. Д., & Шинкаренко, Л. Я. (2019). *Концепція дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року*. *Відновлювана енергетика*, (4), 22–28.
8. Глушко, О., Лисенко, Н., Новик, К., Стала, Р., Варадзин, З., & Степенко, С. (2024). *Огляд краєвих інноваторів в енергетиці, що впливають на розвиток відновлюваної енергетики*. *Технічні науки та технології*, (1), 274–284. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-274-284](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-274-284).
9. Бойко, С., Городній, О., Касаткіна, І., Долударева, Я., & Вершняк, Л. (2021). *Вітроенергетичний комплекс для зарядження акумуляторних батарей*. *Технічні науки та технології*, (4), 156–162. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-156-162](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-156-162).
10. Лобов, В., Єфіменко, Л., Бойко, С., & Городній, О. (2022). *Методика проектування системи керування мікроклімату в приміщенні*. *Технічні науки та технології*, (1), 172–183. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-172-183](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-172-183).
11. Constructive Voices. (n.d.). Будівлі з нульовим енергоспоживанням. <https://constructive-voices.com/uk/інноваційні-«зелені»-будівельні-матеріали%2C-що-відкривають-шлях-до-сталого-будівництва>.
12. Литвин, В. (2024, 24 вересня). Будівлі з нульовим енергоспоживанням: чи допоможе це подолати енергетичну кризу. *Економічна правда*. <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/09/24/719699>.
13. REN21. (2014). Renewables 2014 global status report. https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full_report_low_res.pdf.
14. Разумков Центр. (n.d.). Орієнтири розвитку альтернативної енергетики України до 2030 р. <https://web.archive.org/web/20210123123722/https://razumkov.org.ua/statti/orientyryrozvytku-alternatyvnoi-energetyky-ukrainy-do-2030r>.
15. Energetika.in.ua. (n.d.). Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-8>.
16. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». (n.d.). Відновлювана енергетика та системи розосередженої генерації. <https://ep.kpi.ua/index.php/uk/node/24>.
17. Traboulsi, S. R., & Lamouchi, A. (2023, 6 вересня). Manual for building energy refurbishment into nearly zero energy buildings (nZEB). GreenBuilding Consortium. <https://www.enicbmed.eu/sites/default/files/202401/O5.4%20MPC%20Manual.pdf>.
18. Kotarela, F., Kyritsis, A., & Papanikolaou, N. (2020). On the implementation of the nearly zero energy building concept for jointly acting renewables self-consumers in Mediterranean climate conditions. *Energies*, 13, 1032. https://www.researchgate.net/publication/339501991_On_the_Implementation_of_the_Nearly_Zero_Energy_Building_Concept_for_Jointly_Acting_Renewables_SelfConsumers_in_Mediterranean_Climate_Conditions.
19. Kyritsis, A., Mathas, E., Antonucci, D., Grottko, M., & Tselepis, S. (2016). *Energy improvement of office buildings in Southern Europe*. *Energy and Buildings*, 123, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.032>.
20. Європейський парламент і Рада Європейського Союзу. (2018). Директива (ЄС) 2018/844 про енергетичну ефективність будівель (вносить зміни до Директив 2010/31/ЄС та 2012/27/ЄС). <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2018/844>.
21. Європейська комісія. (2018). *Energy performance of buildings – Directive (EU) 2018/844 (EPBD)*. EU Publications.
22. Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). *Zero energy buildings: A critical look at the definition*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
23. Feng, Y. (2004). *Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones*. *Energy and Buildings*, 36, 1309–1312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.08.003>.
24. Kalogridou, S. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
25. Bürde, R., & Jäger, B. (2019). *Energy management systems for zero-energy buildings*. *Renewable Energy*, 138, 1344–1356.

26. Liu, K., Wei, Z., Han, X., Ouyang, M., Amine, K., & Chen, Z. (2019). *Overview of lithium-ion battery technology*. *Energy Storage Materials*, 20, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.11.017>.
27. Hauer, A. (Ed.). (2021). *Thermal energy storage: Systems and applications* (3rd ed.). Wiley.
28. Parsons, J., et al. (2020). *Battery energy storage systems for renewable integration*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3840–3851.
29. International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC 61427-2:2015. Secondary cells and batteries for renewable energy storage – General requirements and methods of test*. IEC.
30. Lunz, B., & Sauer, D. U. (2015). Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles and charging strategies for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 279, 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.053>.
31. International Renewable Energy Agency. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. IRENA.
32. Tesla Energy. (2022). *Tesla Powerwall product specification sheet*. Tesla Inc.
33. BYD Company. (2023). *BYD Battery-Box: Technical data sheet for LFP home storage systems*.
34. Uddin, K., et al. (2021). *Techno-economic analysis of different energy storage technologies*. *Journal of Energy Storage*, 40, 102740. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102740>.
35. Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). *Energy efficient design of buildings: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>.
36. Kampelis, N., Gobakis, K., Vagias, V., Kolokotsa, D., Standardi, L., Isidori, D., Cristalli, C., Montagnino, F. M., Paredes, F., Muratore, P., et al. (2017). *Evaluation of the performance gap in industrial, residential and tertiary near-zero energy buildings*. *Energy and Buildings*, 148, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.057>.
37. Karlessi, T., Kampelis, N., Kolokotsa, D., Santamouris, M., Standardi, L., Isidori, D., & Cristalli, C. (2017). *The concept of smart and nZEB buildings and the integrated design approach*. *Procedia Engineering*, 180, 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.294>.
38. Li, H., Qu, L., & Qiao, W. (2017). *Lifecycle cost analysis for wind power converters*. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)* (pp. 630–634). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EIT.2017.8053439>.
39. Ates, S. A. (2015). *Life cycle cost analysis: An evaluation of renewable heating systems in Turkey*. *Energy Exploration & Exploitation*, 33, 621–638. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.4.621>.
40. Дешко, В. І., & Наумчук, О. С. (2023). *Аспекти використання nZEB-концепції для будівель у Центральній та Східній Європі. Технології та інжиніринг, (1), 1–12*. <https://jrn1.knutd.edu.ua/index.php/techeng/article/view/1181/1130>.
41. Європейська комісія. (n.d.). *Energy statistics – an overview*. Statistics Explained (Eurostat). https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Energy_statistics__an_overview#Final_energy_consumption.
42. Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., & Marengo, L. (2020). From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge – The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Developments in the Built Environment*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>.
43. Attia, S. (2022). *Data on residential nearly zero energy buildings (nZEB) design in Eastern Europe*. *Data in Brief*, 43, 108419. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108419>.
44. Acar, U., & Kaska, O. (2022). *Energy and economical optimal of nZEB design under different climate conditions of Türkiye*. *Journal of Building Engineering*, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105103>.
45. Ascione, F., De Masi, R. F., Gigante, A., & Vanoli, G. P. (2022). *Resilience to climate change of nearly zero energy buildings designed according to the EPBD recast: Monitoring, calibrated energy models and perspective simulations of a Mediterranean nZEB living lab*. *Energy and Buildings*, 262, 112004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112004>.
46. Ebrahimigharehbaghi, S., der Heijden, H., & Elsinga, M. (2022). *Sustainable business model of affordable zero energy houses: Upscaling potentials*. *Journal of Cleaner Production*, 344, 130956. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130956>.
47. Novatr. (n.d.). *Net-zero buildings: Guiding the way ahead for sustainable architecture*. <https://www.novatr.com/blog/what-are-net-zero-buildings#3>.

References

1. European Commission. (n.d.). *Nearly-zero energy and zero-emission buildings*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en.
2. Publications Office of the European Union. (2021). EU's global leadership in renewables: Final synthesis report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/publication/8a9b9147-3aeb-11ed-9c68-01aa75ed71a1/language-en>.
3. European Parliament & Council of the European Union. (2009). *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources*. *Official Journal of the European Union*, L 140, 16–62. <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>.
4. European Commission. (n.d.). Renewable energy directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
5. European Parliament & Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). *Official Journal of the European Union*, L 328, 82–209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>.
6. Kudria, S. O. (Ed.). (2020). Vidnovliuvani dzhherela enerhii [Renewable energy sources]. *Institut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy*.
7. Kudrya, S. O., Repkin, O. O., Yatsenko, L. V., Tkalenko, M. D., Shynkarenko, L. I. (2019). Kontsepsiia Dorozhnoi karty rozvytku vodnevoi enerhetyky Ukrainy na period do 2035 roku [The concept of the Roadmap for the development of hydrogen energy in Ukraine for the period up to 2035]. *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable energy*, (4(59)), 22-28.
8. Hlushko, O., Lysenko, N., Novyk, K., Stala, R., Varadzyn, Z., & Stepenko, S. (2024). Ohliad krashchikh innovatoriv v enerhetytsi, shcho vplyvaiut na rozvytok vidnovliuvanoi enerhetyky. [An overview of the best innovators in the energy sector who are influencing the development of renewable energy]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, (1), 274–284. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-274-284](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-274-284).
9. Boiko S., Gorodny O., Kasatkina I., Doludarieva Y., & Vershniak L. (2021), Vitroenerhetychni kompleks dlia zariadzhennia akumulatorykh batarei [Wind power complex for loading of storage batteries]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, (4(22)), 156–162. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-156-162](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-156-162).
10. Lobov V., Efimenko L., Boiko S., Gorodny O. (2022). Metodyka proiektuvannia systemy keruvannia mikroklimatu v prymishchenni. [Methodology for the indoor microclimate control system design]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii - Technical sciences and technologies*, (1(27)), 172-183. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-172-183](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-172-183).
11. Budivli z nulovym enerhospozhyvanniam [Buildings with zero energy consumption]. <https://constructive-voices.com/uk/інноваційні-«зелені»-будівельні-матеріали%2C-що-відкривають-шлях-до-сталого-будівництва/>.
12. Lytvyn, V. (2024). Budivli z nulovym enerhospozhyvanniam: chy dopomozhe tse podolaty enerhetychnu kryzu [Buildings with zero energy consumption: will it help to overcome the energy crisis]. *Ekonomichna Pravda – Economic truth*. <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/09/24/719699>.
13. RENEWABLES 2014 Global status report. https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf.
14. Razumkov Center. (n.d.). Oriientyry rozvytku alternatyvnoi enerhetyky Ukrainy do 2030 r. [Guidelines for the development of alternative energy in Ukraine until 2030]. <https://web.archive.org/web/20210123123722/https://razumkov.org.ua/statti/oriientyryrozvytku-alternatyvnoi-energetyky-ukrainy-do-2030r>.
15. Energetika.in.ua. (n.d.). Enerhetyka: istoriia, suchasnist i maibutnie [Energy: history, present and future]. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-8>.
16. Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho» [National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute']. (n.d.). *Vidnovliuvana enerhetyka ta systemy rozoseredzhenoi heneratsii – Renewable energy and distributed generation systems*. <https://ep.kpi.ua/index.php/uk/node/24>.

17. Traboulsi, S. R., & Lamouchi, A. (2023, 6 вересня). Manual for building energy refurbishment into nearly zero energy buildings (nZEB). GreenBuilding Consortium. <https://www.enicbmed.eu/sites/default/files/202401/O5.4%20MPC%20Manual.pdf>.
18. Kotarela, F., Kyritsis, A., & Papanikolaou, N. (2020). On the implementation of the nearly zero energy building concept for jointly acting renewables self-consumers in Mediterranean climate conditions. *Energies*, 13, 1032. https://www.researchgate.net/publication/339501991_On_the_Implementation_of_the_Nearly_Zero_Energy_Building_Concept_for_Jointly_Acting_Renewables_SelfConsumers_in_Mediterranean_Climate_Conditions.
19. Kyritsis, A., Mathas, E., Antonucci, D., Grottko, M., & Tselepis, S. (2016). *Energy improvement of office buildings in Southern Europe*. *Energy and Buildings*, 123, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.032>.
20. 2018/844. Directive on the energy performance of buildings. Replaces Directive 2010/31/EU and Directive 2012/27/EU; effective from 2018-05-30. Official edition. 2018. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2018/844>
21. European Commission. Energy performance of buildings — Directive (EU) 2018/844 (EPBD). Brussels: EU Publications. (2018).
22. Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). *Zero energy buildings: A critical look at the definition*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
23. Feng, Y. (2004). *Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones*. *Energy and Buildings*, 36, 1309–1312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.08.003>.
24. Kalogridou, S. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
25. Bürde, R., & Jäger, B. (2019). *Energy management systems for zero-energy buildings*. *Renewable Energy*, 138, 1344–1356.
26. Liu, K., Wei, Z., Han, X., Ouyang, M., Amine, K., & Chen, Z. (2019). *Overview of lithium-ion battery technology*. *Energy Storage Materials*, 20, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.11.017>.
27. Hauer, A. (Ed.). (2021). *Thermal energy storage: Systems and applications* (3rd ed.). Wiley.
28. Parsons, J., et al. (2020). *Battery energy storage systems for renewable integration*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3840–3851.
29. International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC 61427-2:2015. Secondary cells and batteries for renewable energy storage – General requirements and methods of test*. IEC.
30. Lunz, B., & Sauer, D. U. (2015). Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles and charging strategies for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 279, 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.053>.
31. International Renewable Energy Agency. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. IRENA.
32. Tesla Energy. (2022). *Tesla Powerwall product specification sheet*. Tesla Inc.
33. BYD Company. (2023). *BYD Battery-Box: Technical data sheet for LFP home storage systems*.
34. Uddin, K., et al. (2021). *Techno-economic analysis of different energy storage technologies*. *Journal of Energy Storage*, 40, 102740. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102740>.
35. Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). *Energy efficient design of buildings: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>.
36. Kampelis, N., Gobakis, K., Vagias, V., Kolokotsa, D., Standardi, L., Isidori, D., Cristalli, C., Montagnino, F. M., Paredes, F., Muratore, P., et al. (2017). *Evaluation of the performance gap in industrial, residential and tertiary near-zero energy buildings*. *Energy and Buildings*, 148, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.057>.
37. Karlessi, T., Kampelis, N., Kolokotsa, D., Santamouris, M., Standardi, L., Isidori, D., & Cristalli, C. (2017). *The concept of smart and nZEB buildings and the integrated design approach*. *Procedia Engineering*, 180, 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.294>.
38. Li, H., Qu, L., & Qiao, W. (2017). *Lifecycle cost analysis for wind power converters*. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)* (pp. 630–634). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EIT.2017.8053439>.
39. Ates, S. A. (2015). *Life cycle cost analysis: An evaluation of renewable heating systems in Turkey*. *Energy Exploration & Exploitation*, 33, 621–638. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.4.621>.

40. Deshko, V. I., & Naumchuk, O. S. (2023). Aspekty vykorystannia nZEB-kontseptsii dlia budivel u Tsentralnii ta Skhidnii Yevropi. [Aspects of applying the nZEB concept to buildings in Central and Eastern Europe.] *Tehnologhii ta inzhynirinh – Technologies and engineering*, (1), 1–12. <https://jrnل.knutd.edu.ua/index.php/techeng/article/view/1181/1130>.

41. The European Commission. (n.d.). Energy statistics – an overview. Statistics Explained (Eurostat). https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Energy_statistics__an_overview#Final_energy_consumption.

42. Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., & Marengo, L. (2020). From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge – The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Developments in the Built Environment*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>.

43. Attia, S. (2022). *Data on residential nearly zero energy buildings (nZEB) design in Eastern Europe. Data in Brief*, 43, 108419. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108419>

44. Acar, U., & Kaska, O. (2022). *Energy and economical optimal of nZEB design under different climate conditions of Türkiye. Journal of Building Engineering*, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105103>.

45. Ascione, F., De Masi, R. F., Gigante, A., & Vanoli, G. P. (2022). *Resilience to climate change of nearly zero energy buildings designed according to the EPBD recast: Monitoring, calibrated energy models and perspective simulations of a Mediterranean nZEB living lab. Energy and Buildings*, 262, 112004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112004>.

46. Ebrahimigharehbaghi, S., der Heijden, H., & Elsinga, M. (2022). *Sustainable business model of affordable zero energy houses: Upscaling potentials. Journal of Cleaner Production*, 344, 130956. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130956>.

47. Novatr. (n.d.). Net-zero buildings: Guiding the way ahead for sustainable architecture. <https://www.novatr.com/blog/what-are-net-zero-buildings#3>.

Дата першого надходження статті до видання: 21.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.12.2025

UDC 621.311:620.9

Dmytro Zakharchenko¹, Jaroslav Syl², Serhii Stepenko³

¹Junior Researcher

Mine Action Center of the Ministry of Defense of Ukraine (Chernihiv, Ukraine)

Researcher

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: dimazakhar@gmail.com

²PhD student at the Department of Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies,

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: jaroslav.sila4@gmail.com

³PhD, Associate Professor, Leading Researcher

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua

POWER SUPPLY FOR ZERO-ENERGY BUILDINGS BASED ON AUTONOMOUS SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES AND ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS

The article covers the study of the methodology of providing electricity based on renewable energy sources for buildings with zero and almost zero energy consumption. It shows the importance of developing a methodology for modelling energy supply based on renewable energy sources. Within the framework of this work, the main principles and technologies of using renewable energy sources (RES), as well as the advantages and challenges associated with the implementation of these systems, are considered. The purpose of the article is to explore the methodology of providing power supply based on renewable energy sources for buildings with zero and almost zero energy consumption. In addition, examples of successful projects demonstrating the effectiveness and potential of NZEB were analyzed.

Keywords: renewable energy sources; methodology for providing electricity; zero energy consumption; NZEB potential; energy sector; electricity storage devices; renewable energy technologies; electrical network.

Fig.: 3. Table: 1. References: 47.