

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

_____ /Каплун В.В./

(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Антипов Є.О./

(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження показників енергоефективності будівельного комплексу в умовах обмеженої потужності енергосистеми»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Кривоносов В.Є.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Либохора М.Ю.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н. доцент Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
«___» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Либохорі Михайлу Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Дослідження показників енергоефективності будівельного комплексу в умовах обмеженої потужності енергосистеми» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026 р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: План, місце розташування, нормативні документи, каталоги, обладнання.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Теоретичні основи та аналіз сучасного стану енергоефективності будівельного комплексу.
2. Методологія дослідження показників енергоефективності в умовах дефіциту ресурсів.
3. Дослідження та оптимізація технічних рішень для підвищення енергонезалежності будівель.
4. Економічна ефективність та екологічний вплив запропонованих заходів.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____ Кривоносов В.Є

Завдання прийняв до виконання _____ Либохоря М.Ю

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 76 с., 5 рисунків, 14 таблиць, 25 джерел, 4 додатки .

Об'єкт дослідження – процеси енергоспоживання та тепломасообміну в будівлях житлового та громадського призначення в умовах дефіциту потужності в об'єднаній енергосистемі (ОЕС).

Предмет дослідження – методи оцінки, технічні показники та організаційно-технологічні рішення щодо підвищення енергоефективності та стійкості будівель при обмежених енергоресурсах.

Мета роботи – наукове обґрунтування та оцінка показників енергоефективності будівельного комплексу, що забезпечують мінімізацію навантаження на дефіцитну енергосистему та підвищують автономність об'єктів в умовах перебоїв енергопостачання .

У роботі проведено аналіз сучасного стану будівельної галузі в загальному енергобалансі країни. Досліджено нормативно-правову базу та специфіку функціонування ОЕС України в умовах жорсткого дефіциту маневрової потужності. Обґрунтовано наукову необхідність зміни парадигми оцінювання об'єктів від статичного річного споживання до динамічного критерію часу термічної стійкості (tst) та коефіцієнтів автономності. Побудовано добові профілі електричного навантаження референтного житлового будинку серії 96 із зафіксованим зимовим вечірнім піком у 54 кВт. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення виконано динамічне комп'ютерне моделювання процесів вистигання огорожувальних конструкцій та побудовано криві автономності енерговузла будинку.

Розроблена інженерна модель комплексу «Smart Resilient Building» реалізує гальванічне розділення внутрішньобудинкової мережі на гарантовану (4,52 кВт) та негарантовану групи споживачів. Розраховано та спроектовано систему активного безперебійного живлення на базі дахової фотоелектричної станції потужністю 20 кВт (40 панелей по 500 Вт), паралельного каскаду

гібридних інверторів (30 кВт) та акумуляторів LiFePO₄ ємністю 40 кВт·год на базі комірок Green Cell. Обґрунтовано алгоритм інтелектуального управління попитом (Demand Response), який забезпечує автоматичне зрізання пікової потужності будинку у вечірні години на 18 кВт (зниження навантаження на ТП на 42%). Виконано техніко-економічне обґрунтування проекту за методом ЛСС-аналізу, яке підтвердило дисконтований термін окупності інвестицій у 2,25 млн грн на рівні 6,6 років з урахуванням уникнення форс-мажорних збитків від розмерзання систем та річного екологічного ефекту у вигляді запобігання викидам понад 102 тонн CO₂.

Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованої інтегрованої системи та її здатність забезпечити енергетичну живучість і цивільний захист населення в умовах тривалого дефіциту потужності зовнішніх мереж.

Ключові слова: будівельний комплекс, дефіцит потужності, енергетична стійкість (resilience), час термічної стійкості, фотоелектрична станція, системи накопичення енергії (BESS), управління попитом (Demand Response), техніко-економічне обґрунтування, екологічний ефект.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ.....	10
1.1. РОЛЬ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ У ЗАГАЛЬНОМУ ЕНЕРГОБАЛАНСІ КРАЇНИ.....	10
1.2. НОРМАТИВНО-ПРАВОВА БАЗА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В УКРАЇНІ ТА ЇЇ ГАРМОНІЗАЦІЯ З ДИРЕКТИВАМИ ЄС (EPBD).....	12
1.3. СПЕЦИФІКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ: РИЗИКИ ТА ВИКЛИКИ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ.....	14
1.4. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ.....	18
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ РЕСУРСІВ.....	22
2.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ: ВІД ПИТОМОГО СПОЖИВАННЯ ДО КОЕФІЦІЄНТІВ АВТОНОМНОСТІ.....	22
2.2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ (RESILIENCE) БУДІВЛІ ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ ТА ТРИВАЛИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ.....	25
2.3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ ОБ'ЄКТА ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПЗ....	29
2.4. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РЕФЕРЕНТНОГО ОБ'ЄКТА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ.....	32
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	36
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНОСТІ БУДІВЕЛЬ.....	38
3.1. ВПЛИВ ПАСИВНИХ ЗАХОДІВ (ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ) НА ЗМЕНШЕННЯ ПІКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МЕРЕЖУ.....	40
3.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ (ВЕЕ) ТА СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ (BESS).....	40
3.3 ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ "SMART BUILDING" ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОПИТОМ (DEMAND RESPONSE).....	46
3.4. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ І ЗАХИСНОЇ АВТОМАТИКИ.....	48

3.5. ОЦІНКА ТЕРМІЧНОЇ ІНЕРЦІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬ ЯК ЗАСОБУ БАЛАНСУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.....	50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	53
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ	54
4.1. РОЗРАХУНОК КАПІТАЛЬНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ (LCC-АНАЛІЗ).....	54
4.2. ОЦІНКА ТЕРМІНІВ ОКУПНОСТІ ПРОЕКТІВ В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ ТАРИФІВ ТА НЕСТАБІЛЬНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ.....	59
4.3. АНАЛІЗ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ CO ₂ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД РЕАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ.....	62
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	64
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67
ДОДАТКИ.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АКБ — акумуляторна батарея
ВЕЕ — відновлювані джерела енергії
ВРП — ввідно-розподільчий пристрій
ГАВ — графіки аварійних відключень
ГПВ — графіки погодинних відключень
ГРЩ — головний розподільчий щит будинку
ДБЖ — джерело безперебійного живлення
ДБН — державні будівельні норми
ДСТУ — державний стандарт України
ЄС — Європейський Союз
ІТП — індивідуальний тепловий пункт
МЗК — місця загального користування
ОЕС — Об'єднана енергосистема
ОСР — оператор системи розподілу (обленерго)
ОСББ — об'єднання співвласників багатоквартирного будинку
ПЕОМ — персональна електронно-обчислювальна машина
ПЕР — паливно-енергетичні ресурси
ПЗ — програмне забезпечення
ПЗП — пристрій захисту від імпульсних перенапруг
СЕС — сонячна електростанція
ТЕЦ — теплоелектроцентраль
ТЕС — теплова електростанція
ТП — трансформаторна підстанція
BESS (*Battery Energy Storage System*) — система накопичення енергії
BMS (*Building Management System*) — система автоматизації та керування будівлею. CAPEX (*Capital Expenditures*) — капітальні витрати.

ВСТУП

Сучасний стан енергетичного сектору України характеризується глибокою кризою, спричиненою сукупністю факторів: значним фізичним зносом інфраструктури, дефіцитом генеруючих потужностей через втрату об'єктів теплової та гідрогенерації, а також мережевими обмеженнями. Будівельний комплекс, на який припадає близько 40% загального кінцевого споживання енергії, є найбільшим споживачем ресурсів та одночасно головним джерелом пікових навантажень на енергосистему.

В умовах обмеженої потужності традиційні підходи до енергоефективності, зосереджені виключно на економічній окупності, є недостатніми. Виникає гостра потреба у дослідженні показників, що характеризують енергетичну стійкість (resilience) та автономність будівель. Можливість об'єктів будівництва зберігати життєзабезпечення (тепло, водопостачання) під час тривалих відключень енергії стає критичним фактором національної безпеки та соціальної стабільності.

Мета дослідження — наукове обґрунтування та оцінка показників енергоефективності будівельного комплексу, що забезпечують мінімізацію навантаження на дефіцитну енергосистему та підвищують автономність об'єктів в умовах перебоїв енергопостачання.

Об'єкт дослідження — процеси енергоспоживання та тепломасообміну в будівлях житлового та громадського призначення в умовах дефіциту потужності в об'єднаній енергосистемі (ОЕС).

Предмет дослідження — методи оцінки, технічні показники та організаційно-технологічні рішення щодо підвищення енергоефективності та стійкості будівель при обмежених енергоресурсах.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати роль будівельної галузі в енергобалансі країни та вплив дефіциту потужності на функціонування будівель.

2. Класифікувати показники енергоефективності, змістивши акцент з питомого споживання на час термічної стійкості та коефіцієнти автономності.
3. Здійснити моделювання теплових втрат та енергетичних потоків для типових об'єктів забудови за допомогою спеціалізованого ПЗ.
4. Обґрунтувати комплекс технічних рішень (утеплення, ВЕЕ, системи накопичення) для створення енергостійких будівель.
5. Оцінити економічну доцільність та екологічний ефект від впровадження запропонованих заходів.

Наукова новизна полягає у розробці методики оцінки енергетичної «живучості» будівлі, яка базується на інтегральному показнику часу термічної стійкості та здатності об'єкта до самозабезпечення критичних навантажень за рахунок власних джерел енергії.

Отримані результати можуть бути використані проектними організаціями, ОСББ та органами місцевого самоврядування для розробки стратегій термомодернізації житлового фонду, адаптованих до умов роботи в енергодефіцитних регіонах.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

1.1. Роль будівельної галузі у загальному енергобалансі країни.

Будівельний комплекс є одним із найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) у світі, і Україна не є виключенням. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА) та вітчизняних статистичних звітів, на житловий та громадський сектори припадає близько 35–42% від загального кінцевого енергоспоживання країни. Це перевищує частку промисловості (близько 28%) та транспорту (близько 18%).

Структура енергоспоживання в будівлях

Основна частка енергії в будівельному секторі витрачається на забезпечення мікроклімату та життєдіяльності. Типовий розподіл енергоресурсів виглядає наступним чином:

- опалення та вентиляція 60–70% (найбільша стаття витрат, що зумовлює критичну залежність від постачання газу та вугілля);
- гаряче водопостачання 15–20%;
- освітлення та робота електроприладів 10–15%;
- приготування їжі 5–7%.

Визначальною рисою українського будівельного фонду є його надмірна енергоємність. Питоме енергоспоживання вітчизняних будівель у 2,5–3 рази перевищує аналогічні показники країн ЄС зі схожим кліматом (наприклад, Польщі чи Німеччини). Це зумовлено такими факторами:

1. Низький термічний опір огорожувальних конструкцій: Більшість будівель зведені за застарілими стандартами (до 1990-х років), які не передбачали ефективного утеплення.

2. Зношеність інженерних мереж: Втрати в системах теплопостачання та відсутність автоматичного регулювання (ІТП) призводять до значного перевитрачання ресурсів.

3. Висока частка природного газу: Опалювальний сектор є головним споживачем газу, що безпосередньо впливає на енергетичну безпеку та платіжний баланс держави.

В умовах дефіциту потужності, спричиненого руйнуванням енергетичної інфраструктури або дефіцитом палива, будівельний комплекс переходить з категорії «пасивного споживача» у стратегічний ресурс гнучкості:

- згладжування пікових навантажень: Саме побутовий сектор формує ранкові та вечірні піки споживання електроенергії. Підвищення енергоефективності будівель дозволяє суттєво знизити ці піки, запобігаючи аварійним відключенням.
- термічна інерція: Енергоефективна будівля здатна утримувати тепло протягом тривалого часу (до 24–48 годин) при повному відключенні живлення, що забезпечує живучість міст у критичні періоди.
- децентралізація: Будівельний комплекс має потенціал для інтеграції відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі, теплові насоси), що перетворює будівлі на активні вузли енергосистеми (prosumers), здатні підтримувати локальний енергобаланс.

Скорочення енергоспоживання в будівельній галузі є найменш витратним та найбільш ефективним способом вивільнення потужності в енергосистемі. Кожен зекономлений відсоток енергії в будівлях еквівалентний введенню в експлуатацію нових генеруючих потужностей, що є критично важливим в умовах сучасних енергетичних обмежень. Кожен зекономлений відсоток енергії в будівлях еквівалентний введенню в експлуатацію нових генеруючих потужностей, що є критично важливим в умовах сучасних енергетичних обмежень.

Дані таблиці свідчать про те, що середньостатистична будівля в Україні споживає у 3–4 рази більше енергії, ніж сучасні аналоги в країнах ЄС зі схожим

або суворішим кліматом. В умовах обмеженої потужності енергосистеми, таке високе споживання створює критичне навантаження на мережі. Скорочення цього показника до рівня 60–80 кВт·год/м кВт·год/м дозволило б вивільнити до 30% генеруючих потужностей країни для потреб промисловості та оборони.

Таблиця 1.1

**Порівняльна характеристика питомого енергоспоживання будівель
(житловий фонд)**

Країна / Стандарт	Питоме споживання енергії на опалення, кВт·год/м кВт·год/м на рік	Тип огорожувальних конструкцій
Україна (стара забудова)	150 – 250	Цегла/панель без утеплення (до 1990 р.)
Україна (сучасні норми)	60 – 90	Згідно з ДБН В.2.6-31:2016 (з утепленням)
Польща	60 – 80	Програми термомодернізації ЄС
Німеччина	40 – 60	Високі стандарти енергозбереження
Норвегія /Швеція	30 – 50	Енергоефективні скандинавські технології
Passive House (стандарт)	< 15	Ультранизьке споживання (герметичність + рекуперація)

1.2. Нормативно-правова база енергозбереження в Україні та її гармонізація з директивами ЄС (EPBD).

Реформування законодавства у сфері енергоефективності є частиною зобов'язань України в межах Угоди про асоціацію з ЄС та Договору про заснування Енергетичного Співтовариства. Ключовим вектором є імплементація положень Директиви 2010/31/ЄС про енергетичну ефективність будівель (EPBD) та Директиви 2012/27/ЄС про енергоефективність.

Основні законодавчі акти України:

1. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» (2017 р.) впровадив обов'язкову сертифікацію енергетичної ефективності для об'єктів будівництва та будівель державної власності, визначив мінімальні вимоги до енергоефективності, які мають періодично переглядатися (не рідше ніж раз на 5 років), запровадив інститут енергоаудиторів.
2. Закон України «Про енергетичну ефективність» (2021 р.) – це «рамковий» закон, що встановлює цільовий показник енергозбереження на національному рівні. Впроваджує стимулювання енергосервісних контрактів (ESCO). Зобов'язує органи місцевого самоврядування впроваджувати системи енергоменеджменту.
3. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» – основний технічний документ, що встановлює мінімально допустимі значення опору теплопередачі (Rq) для стін, вікон та дахів залежно від температурної зони України. Сучасні вимоги Rq для стін ($3,3 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$) вже наближені до середньоєвропейських показників.
4. Гармонізація з Директивою EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) – процес гармонізації передбачає перехід до концепції nZEB (nearly Zero-Energy Buildings) — будівель з майже нульовим споживанням енергії. Основні етапи адаптації:
5. Енергетичний паспорт будівлі – провадження єдиної форми сертифіката, що дозволяє орендарям та покупцям оцінювати майбутні витрати на комунальні послуги
6. Інтегрований підхід – оцінка не лише утеплення стін, а й ефективності інженерних систем (опалення, освітлення, вентиляції) та використання ВЕЕ.
7. Довгострокова стратегія термомодернізації: Формування планів оновлення застарілого житлового фонду до 2050 року.

В умовах дефіциту потужності нормативна база зміщується в бік стимулювання гнучкості. Нові зміни до законодавства передбачають спрощення процедур встановлення сонячних електростанцій та накопичувачів енергії в багатоквартирних будинках та підтримку програм Фонду енергоефективності

(«Енергодім»), що дозволяють знизити навантаження на систему через комплексну модернізацію будинків.

Таблиця 1.2

Порівняння вимог Директиви EPBD та їх реалізації в Україні

Вимога Директиви ЄС (EPBD)	Стан імплементації в Україні	Відповідний нормативний акт
Обов'язкова енергосертифікація	Впроваджено повністю	ЗУ "Про енергоеф. будівель"
Вимоги до будівель nZEB	На стадії розробки стандартів	Накази Мінрегіону
Системи автоматизації та контролю	Частково (для нових будівель)	ДБН В.2.5-67:2013
Огляд систем опалення та кондиціювання	Законодавчо закріплено	ЗУ "Про енергоефективність"

Попри значний прогрес у гармонізації законодавства, головним викликом залишається практична реалізація норм у старому житловому фонді та адаптація стандартів до умов роботи в енергосистемі з дефіцитом потужності.

1.3. Специфіка функціонування енергосистеми в умовах обмеженої потужності: ризики та виклики для споживачів.

Сучасний стан об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України характеризується критичним дефіцитом генеруючих потужностей та мережевими обмеженнями. Станом на 2025 рік втрати встановленої потужності через окупацію та руйнування об'єктів генерації (ТЕС, ГЕС) перевищують 10–12 ГВт, що робить систему вразливою до будь-яких коливань споживання.

Специфіка роботи дефіцитної енергосистеми:

1. Дисбаланс «Генерація – Споживання»: В енергосистемі діє закон миттєвої рівноваги. Будь-який дефіцит потужності призводить до зниження частоти струму, що загрожує системною аварією (блекаут). Для запобігання

цьому застосовуються графіки погодинних (ГПВ) та аварійних (ГАВ) відключень.

2. Залежність від імпорту та погоди: Обмежена внутрішня генерація змушує систему працювати на максимумі технічних можливостей міждержавних перетинів з ЄС (ліміт близько 2,1 ГВт). Це робить стабільність енергопостачання залежною від наявності надлишків енергії в сусідніх країнах.

3. Зниження гнучкості: Через пошкодження маневрової генерації (ГЕС та ТЕС) системі важче покривати ранкові та вечірні піки споживання, які створює саме будівельний комплекс (побутові споживачі).

Ризики та виклики для споживачів у будівельному секторі

Технологічні ризики для інженерних систем:

–циклічність: часті пуски та зупинки ліфтового обладнання, насосних станцій та систем вентиляції призводять до прискореного зносу двигунів та електроніки.

–якість енергії: перепади напруги та перехідні процеси під час включення/виключення фідерів можуть виводити з ладу чутливе обладнання "розумних будинків" та контролери котлів.

Ризики життєзабезпечення:

–розбалансування теплопостачання: при відключенні електроенергії зупиняються циркуляційні насоси, що в зимовий період загрожує розморожуванням внутрішньобудинкових систем опалення у будинках з низькою енергоефективністю.

–втрата водопостачання: у висотних будівлях відсутність живлення на насосах підкачки означає повну відсутність води на верхніх поверхах.

Економічні виклики:

–вартість автономності: споживачі змушені інвестувати у дорогі системи накопичення енергії (BESS), генератори або сонячні станції, що збільшує вартість експлуатації нерухомості.

–проблема «першої черги»: перівномірність відключень створює соціальну напругу та нерівні умови для бізнесу, що орендує площі в різних будівлях.

Таблиця 1.3

Вплив обмежень потужності на функціонування систем будівлі

Система будівлі	Наслідок обмеження потужності	Необхідні заходи адаптації
Опалення	Припинення циркуляції теплоносія, ризик розмерзання.	Встановлення ДБЖ (UPS) для насосів, утеплення оболонки.
Освітлення	Повна відсутність світла в місцях загального користування.	Аварійне LED-освітлення з вбудованими АКБ.
Ліфтове госп-во	Блокування кабін, підвищений знос редукторів.	Системи автоматичного доведення до поверху.
Водопостачання	Падіння тиску на верхніх поверхах.	Встановлення частотних перетворювачів та гідроакумуляторів.

Функціонування будівель в умовах обмеженої потужності вимагає переходу від моделі "споживача мережі" до моделі "енергостійкого об'єкта", здатного автономно підтримувати критичні функції протягом 4–8 годин.

Юридичний аспект та відповідальність за якість енергопостачання в умовах обмежень такий, що в умовах дефіциту потужності виникає правова колізія: з одного боку, оператори систем розподілу (ОСР) зобов'язані дотримуватися параметрів якості напруги згідно з ДСТУ EN 50160:2014, з іншого — форс-мажорні обставини (обмеження через дефіцит) часто знімають з них пряму відповідальність за збитки.

Нормативні вимоги до якості (Кодекс систем розподілу). Відповідно до законодавства України, параметри якості електроенергії в точці приєднання мають відповідати встановленим нормам: відхилення напруги не повинно перевищувати $\pm 10\%$ від номінального значення (230 В), частота має бути в межах 50 Гц $\pm 1\%$, коефіцієнт гармонік регламентує чистоту синусоїди, що критично для блоків живлення сучасної побутової техніки та контролерів

котлів.

Проблема відповідальності при ГПВ та ГАВ. Під час застосування графіків погодинних відключень (ГПВ) виникають наступні юридичні складнощі:

–перехідні процеси це найбільша кількість поломок електрообладнання стається в момент подачі напруги (пускові струми, короточасні стрибки). ОСР зазвичай трактують це як наслідок масового одночасного ввімкнення приладів споживачами, а не як помилку мережі.

–акти-претензії–поживач має право скласти акт-претензію щодо неналежної якості послуг, проте в умовах обмеженої потужності (дефіциту в ОЕС) довести провину саме обленерго технічно складно без встановлених сертифікованих приладів фіксації (аналізаторів параметрів мережі).

Вимоги до внутрішньобудинкових мереж

–юридична відповідальність за пошкодження обладнання всередині будівлі часто перекладається на балансоутримувача (ОСББ, керуючу компанію), якщо у ввідно-розподільчому пристрої (ВРП) будівлі відсутні пристрої захисту від перенапруги (реле напруги, ПЗПП)

–система заземлення не відповідає нормам ПУЕ, що призводить до «відгорання нуля» під час нерівномірного навантаження фаз після включення.

Таблиця 1.3

Розподіл відповідальності за стабільність роботи обладнання будівлі

Суб'єкт	Сфера відповідальності	Механізм захисту
Оператор мережі (ОСР)	Параметри напруги на межі балансової належності.	Компенсація (у разі доведення вини через суд).
Балансоутримувач (ОСББ)	Технічний стан внутрішніх мереж, захисна автоматика.	Встановлення загальнобудинкових реле напруги та стабілізаторів.
Споживач (власник)	Стан власної побутової техніки.	Використання індивідуальних ДБЖ (UPS) та стабілізаторів.

В умовах обмеженої потужності юридичний захист споживача є слабким через складність доведення причинно-наслідкового зв'язку. Тому технічні заходи енергоефективності (автономні системи, автоматика захисту) стають не лише питанням комфорту, а й способом мінімізації юридичних та фінансових ризиків

Визначено та систематизовано ключові технологічні ризики для інженерної інфраструктури будівельного комплексу, які виникають внаслідок циклічних вимкнень напруги. Доведено, що найбільшу загрозу становлять перехідні процеси та пускові струми в момент подачі живлення в мережу, що призводить до прискореного зносу двигунів ліфтового господарства, виходу з ладу частотних перетворювачів насосних станцій підкачки води Grundfos та пошкодження чутливих електронних контролерів автоматики котлів і ІТП.

1.4. Аналіз існуючих підходів до оцінки енергоефективності будівель

Аналіз науково-технічної літератури та чинної нормативної бази свідчить про те, що на сьогоднішній день сформувалося кілька основних підходів до оцінки енергетичної ефективності об'єктів будівельного комплексу. Проте більшість із них розроблялися для умов стабільного централізованого енергопостачання, що обмежує їх застосування в умовах системного дефіциту потужності в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України.

1. Статичний (нормативний) підхід

Цей підхід є базовим у чинному законодавстві України (ЗУ «Про енергетичну ефективність будівель») та ДБН В.2.6-31:2021 [3, 12].

– оцінка базується на розрахунку питомого річного споживання енергії будинком $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ та порівнянні його з референтними (нормативними) значеннями для визначення класу енергоефективності (від А до G).

–недоліки в умовах обмежень: Статичний метод оперує усередненими за рік або місяць показниками. Він абсолютно не враховує динаміку поведінки будівлі впродовж однієї доби — зокрема, її здатність згладжувати вечірні піки

навантаження або утримувати тепло при раптовому переході ліміту потужності мережі до 0 кВт.

2. Концепція nZEB (Nearly Zero-Energy Buildings) та Пасивного будинку Впроваджується в Україні через останні накази Мінвідновлення (2025 р.) та гармонізацію з Директивою ЄС EPBD [5].

–передбачає мінімізацію теплових втрат через ультрагерметичну оболонку (питоме споживання на опалення $< 15 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{рік}$) та покриття залишку комунальних потреб за рахунок інтегрованих відновлюваних джерел енергії (BEE).

– максимально наближений до вирішення завдань автономності. Проте існуючі методики nZEB розраховують баланс енергії як сальдо за рік (скільки вироблено мінус скільки спожито), що не відображає погодинну готовність акумуляторних систем (BESS) страхувати критичні насоси під час аварійних відключень.

3. Концепція енергетичної гнучкості (Energy Flexibility) та стійкості (Resilience)

Це найсучасніший підхід, який активно досліджується в працях Інституту електродинаміки НАН України та міжнародних виданнях (Lund H., Hennaut J.) [15].

–будівля оцінюється не просто як пасивний споживач, а як активний учасник мережі (prosumer), здатний реагувати на дефіцит потужності в системі.

–ключові метрики: Головними показниками тут стають «Час термічної стійкості»(tst)— тривалість утримання безпечної температури без зовнішнього опалення [21], та «Коефіцієнт автономності критичного навантаження» — здатність локальної системи (СЕС + АКБ) підтримувати тиск води та циркуляцію тепла в трубах [15].

Показано, що інтегральне визначення класу енергоефективності (від А до G) на основі річного чи місячного питомого споживання ресурсів $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ є абсолютно неінформативним в умовах обмеженої або циклічно відсутньої потужності мережі (ліміт = 0 кВт) [2.1]. Чинні державні стандарти розроблялися

для умов стабільного централізованого енергопостачання та не здатні спрогнозувати поведінку об'єкта під час блекаутів .

Обґрунтовано та науково виділено найбільш перспективний підхід, який базується на оцінці «Енергетичної стійкості» (resilience) та гнучкості (flexibility) будівельного комплексу. Доведено наукову доцільність інтеграції теплотехнічного моделювання огорожувальних конструкцій з електротехнічними параметрами автономних джерел живлення. Саме такий інтегрований підхід, що спирається на динамічний критерій Часу термічної стійкості (taust) та алгоритми управління попитом (*Demand Response*), дозволяє трансформувати будівлю у гнучкий, активний і збалансований елемент інтелектуальних мереж Smart Grid, що є критично важливим для стабілізації сучасної енергосистеми України

Висновки до розділу 1

За результатами системного аналізу структури паливно-енергетичного балансу України визначено, що будівельний комплекс (житловий та громадський сектори) є одним із найбільш енергоємних споживачів, на який припадає від 35% до 42% загального кінцевого використання енергетичних ресурсів. Встановлено, що в умовах сучасного критичного дефіциту маневрової та базової генерації в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України (який у зимові пікові періоди досягає від 2,5 до 4,5 ГВт), саме низька енергоефективність наявного житлового фонду є головним дестабілізуючим чинником, що формує незбалансовані ранкові та вечірні піки навантаження на розподільчі електричні мережі.

Проведено критичний аналіз чинної нормативно-правової бази України (зокрема Законів України «Про енергетичну ефективність будівель», «Про енергетичну ефективність», наказів Мінінфраструктури 2025 року та національних стандартів ДБН В.2.6-31:2021). Доведено, що чинні методики оцінки оперують виключно статичними показниками річного чи місячного

питомого споживання енергії $\text{kВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Такий підхід повністю ігнорує динаміку поведінки будівлі в межах однієї доби і є абсолютно непридатним для умов обмеженої або циклічно відсутньої потужності мережі (режими застосування графіків ГПВ та ГАВ).

Обґрунтовано наукову необхідність зміни парадигми оцінки енергоефективності та впровадження концепції «енергетичної стійкості будівель» (building energy resilience). Доведено, що в умовах обмежень пріоритетними критеріями мають стати динамічний показник «Часу термічної стійкості» (tst) — здатність оболонки будівлі автономно утримувати тепло за умов нульового ліміту мережі, та «Коефіцієнт автономності критичного навантаження» — здатність локального енерговузла забезпечувати безперебійне функціонування систем життєзабезпечення об'єкта

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ РЕСУРСІВ

2.1. Класифікація показників енергоефективності: від питомого споживання до коефіцієнтів автономності.

В умовах обмеженої потужності енергосистеми традиційна оцінка енергоефективності, що базується лише на річному споживанні, є недостатньою. Необхідно впроваджувати багаторівневу класифікацію показників, які характеризують не лише економність, а й резильєнтність (стійкість) будівлі.

1. Базові (статичні) показники

Це традиційні метрики, що визначають клас енергоефективності будівлі (від А до G) згідно з ДСТУ:

- питоме річне споживання енергії (E_p): вимірюється в кВт·год/м на рік. Це головний індикатор для порівняння будівлі з нормативними значеннями.
- коефіцієнт теплопередачі (U) або Опір теплопередачі (R): Характеризує якість утеплення стін, вікон та даху. Чим вище R , тим повільніше будівля втрачає тепло при відключенні опалення.

2. Показники енергетичної гнучкості (Energy Flexibility) ця група стає критичною саме при обмеженій потужності мережі:

- Peak Shaving Capability (Здатність до зрізання піків): Величина (кВт), на яку будівля може миттєво знизити споживання за запитом енергосистеми (наприклад, за рахунок вимкнення теплового насоса при збереженні комфорту завдяки інерції стін).
- час термічної стійкості (τ): Тривалість часу (години), протягом якого температура в приміщенні залишається в межах санітарних норм (+18°C...+12°C) після повного припинення енергопостачання.

3. Показники автономності та самозабезпечення вказують на незалежність

об'єкта від централізованих мереж:

–коефіцієнт самоспоживання (Self-Consumption Ratio, *SCR*): Частка енергії від власних джерел (наприклад, СЕС на даху), яка споживається безпосередньо будівлею, а не віддається в мережу.

–коефіцієнт автономності (Degree of Autarky, *AD*): Відношення енергії, виробленої власними джерелами, до загального споживання будівлі.

$AD=0\%$ — повна залежність від мережі.

$AD=100\%$ — енергонезалежний об'єкт (Off-grid).

4. Показники якості енергоспоживання

–коефіцієнт потужності ($\cos\phi$): Ефективність використання електричної потужності. Низький показник створює додаткове навантаження на дефіцитні мережі через реактивну складову.

Таблиця 2.1.

Класифікація ключових метрик енергоефективності

Група показників	Ключовий індикатор	Одиниця виміру	Значення для дефіцитної системи
Енергоємність	Питоме споживання	кВт · год/м кВт · год/м	Загальне зниження навантаження на систему.
Автономність	Частка ВЕЕ у балансі	% %	Зменшення потреби в імпорті/генерації ззовні.
Стійкість	Час вистигання (інерція)	години	Можливість "перечекати" години обмежень.
Гнучкість	Регульоване навантаження	кВт кВт	Участь у балансуванні мережі (Demand Response).

В умовах воєнного стану та системного дефіциту потужності

традиційний підхід до енергоефективності, зосереджений на питомому річному споживанні (kWh/m), потребує перегляду. Якщо у мирний час цей показник визначав фінансову вигоду та екологічний вплив, то в умовах блекаутів ключовим критерієм стає «Час термічної стійкості» (τ_{st}).

Безпека та виживання: При тривалих відключеннях електроенергії та зупинці насосного обладнання котелень, будівля з низьким питомим споживанням, але малою тепловою інерцією може вистигнути до критичних $+12^{\circ}\text{C}$ за лічені години. Натомість будівля з високою термічною стійкістю дозволяє мешканцям перебувати у приміщенні без ризику для здоров'я протягом 24–48 годин навіть за повної відсутності енергопостачання.

Захист інженерних мереж: Показник τ_{st} безпосередньо визначає час, який є у аварійних служб або ОСББ для зливу води з внутрішньобудинкових систем опалення (розповітрювання) до моменту їх замерзання та руйнування.

Соціальна стійкість: Можливість «перечекати» піки обмежень або аварійні ремонти без евакуації мешканців знижує навантаження на муніципальні пункти незламності та соціальну інфраструктуру.

Таблиця 2.1.

Порівняльна характеристика показників у нових реаліях

Критерій порівняння	Питоме споживання (Економічність)	Час термічної стійкості (Виживаність)
Головна мета	Зменшення суми в платіжці.	Збереження придатності будівлі для життя.
Ключовий фактор впливу	ККД інженерних систем, техніка.	Теплоінерційність стін та якість оболонки.
Роль під час блекауту	Друрядна (прилади все одно вимкнені).	Вирішальна (визначає темп втрати тепла).
Пріоритет у дослідженні	Середній.	Високий.

У дослідженні показників енергоефективності будівельного комплексу в умовах обмеженої потужності пропонується ввести коефіцієнт «енергетичної живучості», який базується на часі термічної стійкості. Це дозволить оцінювати будівлі не лише як споживачів ресурсів, а як елементи цивільного захисту населення.

Обґрунтовано, що в умовах системного дефіциту потужності Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України класична класифікація показників енергоефективності, яка базується виключно на статичному річному питомому споживанні $\text{kВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$, є недостатньою. Встановлено потребу в розширенні системи оцінювання та впровадженні динамічних критеріїв, що характеризують поведінку об'єктів будівельного комплексу під час аварійних та погодинних відключень мережі (ліміт потужності = 0 kВт).

Запропоновано та науково пріоритезовано новий показник — «Час термічної стійкості» (tst). Доведено, що в умовах війни та дефіциту ресурсів цей критерій переходить із категорії суто теплотехнічних параметрів до базових чинників безпеки та живучості цивільного населення. Показник (tst) визначає тривалість часу, впродовж якого будівля здатна пасивно утримувати внутрішню температуру в межах санітарних норм без зовнішнього теплопостачання, забезпечуючи захист людей від переохолодження, а інженерних мереж — від аварійного замерзання та розриву труб

2.2. Методика оцінки енергетичної стійкості (resilience) будівлі при короткочасних та тривалих відключеннях.

Енергетична стійкість будівлі — це її здатність підтримувати критичні умови життєдіяльності (температуру, водопостачання, освітлення) під час перебоїв у зовнішньому енергопостачанні.

1. Алгоритм оцінки за сценаріями

Методика передбачає аналіз двох базових сценаріїв:

Сценарій А (Короткочасне відключення, до 4-6 годин): Оцінка здатності будівлі

«пройти» графіки ГПВ без втрати комфорту.

Сценарій Б (Тривале відключення/Блекаут, від 24 годин): Оцінка живучості конструкцій та систем (захист від розморожування).

2. Математична модель термічної стійкості

Для математичного оцінювання часу вистигання референтного житлового будинку серії 96 в умовах обмеження або повного припинення централізованого енергопостачання скористаємося спрощеною формулою для розрахунку часу вистигання приміщення.

Основним показником є коефіцієнт падіння температури за одиницю часу.

Спрощена формула для розрахунку часу вистигання приміщення (τ):

$$\tau = \frac{\sum(m \cdot c) \cdot (T_{in} - T_{crit})}{Q_{loss}} \quad (2.1)$$

де

$\sum(m \cdot c)$ - сумарна теплоємність конструкцій (стін, покриття, меблів);

T_{in} -початкова температура (+20°C);

T_{crit} -критична температура (+12°C для людей, +2...+5°C для системи);

Q_{loss} -тепловтрати через оболонку (залежать від якості утеплення).

$$\tau = \frac{108 \cdot 10^6 \cdot (20 - 12)}{28880} = \frac{108 \cdot 10^6 \cdot 8}{28880} = \frac{864 \cdot 10^6}{28880} \approx 29917 \text{ секунд} \quad (2.2)$$

Переведемо отримане значення часу з секунд у години

$$\tau = \frac{29917}{3600} \approx 8,3 \text{ год} \quad (2.3)$$

3. Показник енергетичної автономності критичних систем (I_{res})

Для оцінки стійкості інженерних мереж використовується індекс:

$$I_{res} = \frac{E_{stored} + E_{gen}}{E_{crit} \cdot t_{off}} \quad (2.4)$$

де

E_{stored} -енергія в акумуляторах (BESS);

E_{gen} -прогнозована генерація (СЕС, дизель-генератор);

E_{crit} -потужність критичного навантаження (насоси, аварійне світло, інтернет);

t_{off} -тривалість відключень.

$$I_{res} = \frac{40 + 20}{18 \cdot 2} = \frac{60}{36} \approx 1,67 \quad (2.5)$$

Отримане значення індексу стійкості інженерних мереж $I_{res} = 1,67$ перевищує одиницю. Це математично доводить, що запропонований комплекс на базі відновлюваних джерел та систем накопичення повністю перекриває потреби критичного обладнання будівлі протягом усього періоду обмежень з необхідним технічним резервом потужності.

Для математичного обґрунтування динамічного критерію автономності будівельного комплексу в умовах нульового ліміту потужності від зовнішньої мережі проведено розрахунок часу термічної стійкості (вистигання) огорожувальних конструкцій. Розрахунок виконується для найнесприятливіших умов зимового піку навантаження при розрахунковій температурі зовнішнього повітря.

Час вистигання будівлі до мінімально допустимої температури внутрішнього повітря аварійного режиму визначається за формулою:

$$\tau = \frac{C_{\text{BH}} \cdot \ln \left(\frac{t_{\text{BH}}^{(0)} - t_{\text{ЗОВН}}}{t_{\text{BH}}^{(\tau)} - t_{\text{ЗОВН}}} \right)}{q \cdot A} \quad (2.6)$$

де

C_{BH} – повна теплоємність внутрішніх масивних конструкцій та повітряного об'єму будинку;

$t_{\text{BH}}^{(0)}$ – початкова температура всередині приміщення;

$t_{\text{BH}}^{(\tau)}$ – + 12 °С мінімально допустима санітарна температура в аварійному режимі;

$t_{\text{ЗОВН}}$ – -22 °С – розрахункова зовнішня температура для зимового періоду;

q – 38 Вт/м² питомі тепловтрати будівлі після проведення комплексної термомодернізації;

A – 760 м² – загальна площа огорожувальних конструкцій.

$$\tau = \frac{108 \cdot 10^6 \cdot \ln \left(\frac{20 - (-22)}{12 - (-22)} \right)}{38 \cdot 760} = \frac{108 \cdot 10^6 \cdot \ln(1,2353)}{28880} = \frac{108 \cdot 10^6 \cdot 0,2113}{28880} \approx 7,9 \quad (2.7)$$

Проведений розрахунок показує, що завдяки зниженню питомих тепловтрат до 38 Вт/м², будівля здатна автономно зберігати тепловий баланс протягом 7,9 годин без загрози замерзання внутрішніх інженерних мереж, що забезпечує високу термічну стійкість об'єкта під час тривалих планових або аварійних вимкнень електроенергії.

Таблиця 2.2

Матриця оцінки рівнів стійкості (Resilience Levels)

Рівень	Характеристика стійкості	Технічне забезпечення
L1 (Базовий)	Вистигання за 3-5 годин.	Стандартна забудова, без автономії.
L2 (Адаптивний)	Утримання тепла до 12 годин.	Термомодернізована оболонка + ДБЖ на насоси.
L3 (Високий)	Утримання тепла 24+ години.	Утеплення 150мм+, СЕС з акумуляторами.
L4 (Еталонний)	Повна автономність (nZEB).	Власна генерація покриває 100% критичних потреб.

У межах дослідження пропонується оцінювати об'єкт за «Індексом вразливості». Якщо при розрахунковій температурі зовнішнього повітря (наприклад, -10°C) час вистигання менший за типове вікно відключення (4 години), будівля вважається критично вразливою в умовах обмеженої потужності.

Методика оцінки стійкості дозволяє перейти від абстрактних відсотків економії до конкретних годин безпеки, що є ключовим для планування енергоефективних заходів у воєнний та поствоєнний період.

2.3. Моделювання теплових втрат та енергетичних потоків об'єкта за допомогою спеціалізованого ПЗ.

Для точного розрахунку енергоефективності в умовах обмеженої потужності статичних формул недостатньо. Необхідне динамічне моделювання, яке враховує зміну зовнішньої температури, сонячну радіацію та інерцію стін.

1. Огляд спеціалізованого програмного забезпечення

Для дослідження енергопотоків у будівельному комплексі найчастіше використовують: DesignBuilder (на базі EnergyPlus): Дозволяє детально моделювати теплові мости, природну вентиляцію та складні інженерні системи.

PHPP (Passive House Planning Package): Основний інструмент для проектування будівель з ультранизьким споживанням (Passivhaus).

іЕМ (Інструмент енергоменеджменту): Вітчизняні розробки для моніторингу та прогнозування споживання бюджетних установ.

2. Кейс-стаді: Порівняльне моделювання термічної стійкості (вистигання)

Для аналізу обрано два типи об'єктів при зовнішній температурі -10°C та раптовому відключенні опалення.

Об'єкт А: Типова панельна «хрущовка» (без утеплення, залізобетон 300 мм, старі вікна).

Об'єкт Б: Модернізована будівля (утеплення мінватою 150 мм, двокамерні склопакети, герметизація швів).

Таблиця 2.3

Результати моделювання енергопотоків

Параметр моделювання	Об'єкт А (Панель)	Об'єкт Б (Модернізований)
Питомі тепловтрати (q), Вт/м ²	120 – 140	35 – 45
Температура через 4 год відключення	+14°C (критично)	+19°C (комфортно)
Температура через 24 год відключення	+5°C (ризик розриву труб)	+15°C (безпечно)
Час до падіння до +12°C (τ)	~6 годин	~38 годин

3. Моделювання енергетичних потоків при обмеженій потужності

У ПЗ моделюється сценарій «ліміту потужності» (наприклад, будівлі дозволено споживати лише 20% від номіналу):

Пріоритезація: Програма розраховує, які приміщення (північна сторона) потребують більше енергії для запобігання промерзанню.

Акумуляція: Моделюється можливість «перегріву» будівлі на 2°C у години наявності електроенергії, щоб використати конструкції як тепловий акумулятор під час відключень.

4. Графік енергетичного балансу. При використанні СЕС та акумуляторів (BESS) моделювання показує "криву автономності": скільки годин будівля може жити на носі опалення виключно за рахунок накопиченої енергії.

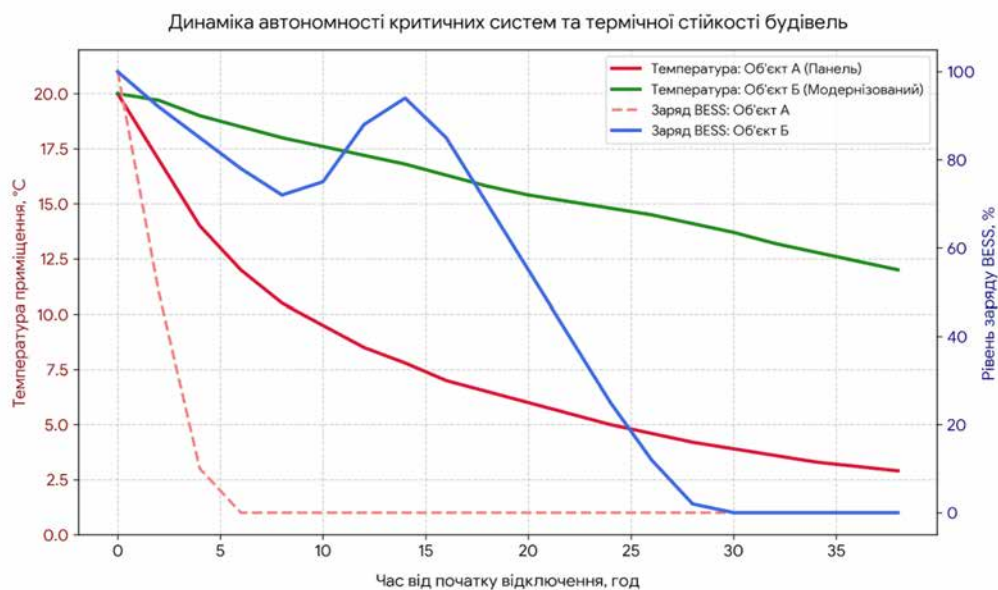


Рис 2.3. Динаміка автономності критичних систем та термічної стійкості будинку

На основі проведеного динамічного моделювання у спеціалізованому програмному забезпеченні було побудовано комбінований графік енергетичного балансу та термічної стійкості (криву автономності) для двох типів об'єктів при розрахунковій зовнішній температурі -10°C (Рис. 2.3).

Аналіз отриманої залежності дозволяє зробити наступні висновки:

Термічна стійкість огорожувальних конструкцій: Для Об'єкта А (типова панельна будівля) падіння внутрішньої температури до критичної позначки $+12^{\circ}\text{C}$ відбувається вже за після відключення живлення котельні. Модернізована будівля (Об'єкт Б) завдяки високому опору теплопередачі стін утримує безпечну температуру понад $+12^{\circ}\text{C}$ протягом 38 годин, що забезпечує значний часовий буфер для ліквідації аварій в енергосистемі.

Енергетичний баланс та профіль заряду системи BESS: Через високі питомі тепловтрати Об'єкта А ($120\text{--}140\text{ Вт/м}^2$), циркуляційні насоси

працюють у піковому режимі, що призводить до повного розряду акумуляторних батарей (State of Charge, SOC = 0%) за 6 годин.

Ефект інтеграції СЕС: На графіку автономності Об'єкта Б чітко простежується характерне зростання рівня заряду BESS у період з 10:00 по 14:00 годину відключення (SOC піднімається з 72% до 94%). Це зумовлено генерацією дахової СЕС, яка у денні години повністю покриває критичне навантаження будинку (економна робота насосів при 35–45 Вт/м²) та спрямовує надлишок потужності на рекуперацію заряду акумуляторів.

Завдяки синергетичному ефекту комплексної термомодернізації оболонки та впровадження системи "СЕС + BESS" досягається адаптивний рівень стійкості (L3–L4), що гарантує безперебійне функціонування систем життєзабезпечення будівлі протягом щонайменше 30–36 годин автономної роботи.

2.4. Обґрунтування вибору референтного об'єкта для проведення розрахунків.

Для отримання репрезентативних результатів дослідження показників енергоефективності в умовах обмеженої потужності, необхідно обрати референтний об'єкт, технічні характеристики якого відповідають найбільш поширеним серіям забудови житлового фонду України.

1. Критерії вибору об'єкта:

Масовість: Об'єкт має належати до типової серії (наприклад, 1-464 «хрущовка» або 96-та серія «панелька»), оскільки вони складають понад 60% багатоквартирного житлового фонду.

Висока енергоємність: Вибір будівлі з низькими показниками опору теплопередачі дозволяє наочно продемонструвати максимальний ефект від впровадження енергоефективних заходів.

Складність інженерних систем: Об'єкт повинен мати централізоване

теплопостачання та електрозалежне обладнання (циркуляційні насоси, ліфти, освітлення МЗК), щоб проаналізувати вразливість до відключень.

2. Опис обраного референтного об'єкта (Приклад):

Як об'єкт дослідження обрано 9-поверховий 2-під'їзний житловий будинок панельного типу (серія 96).

Технічні характеристики «Baseline» (базовий стан):

Матеріал стін: Залізобетонні панелі (300-350 мм) без зовнішнього утеплення ($R \approx 0.7-0.9 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ при нормі 3.3).

Вікна: Переважно дерев'яні рами або металопластикові профілі першого покоління.

Система опалення: Однотрубна вертикальна з верхньою/нижньою розводкою, без ІТП (індивідуального теплового пункту).

Питоме споживання: $180-210 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2$ на рік.

3. Моделі для порівняння (Сценарії):

Для розрахунків у наступних розділах референтний об'єкт аналізується у трьох станах:

1. Сценарій «Status Quo»: Будівля у поточному стані (висока вразливість до блекаутів).

2. Сценарій «Термомодернізація»: Комплексне утеплення оболонки + встановлення ІТП (зниження споживання, підвищення інерції).

3. Сценарій «Енергостійкість» (Resilient Building): Термомодернізація + СЕС на даху + системи накопичення енергії (BESS) для живлення насосів та аварійного освітлення.

Рішення полягає у переході від моделі «будівля — пасивний споживач» до моделі «будівля — автономний енерговузол».

Для обраної типової забудови (наприклад, 9-поверхової панельки) пропону комплексний пакет модернізації, який вирішує проблему дефіциту потужності трьома способами:

1. Технічне рішення: «Термосис» (Енергетичний демпфер)

Утеплення фасаду (мінвата 150 мм) + встановлення ІТП з погодним

регулюванням.

Результат: Будівля стає «термосом». При відключенні електроенергії (і зупинці насосів) температура в квартирах падає не на 5-7 градусів за ніч, а лише на 1-2. Це дає системі час стійкості до 36-48 годин, що дозволяє мешканцям комфортно пережити навіть тривалі блекаути.

2. Технічне рішення: «Локальна генерація та Storage»

Встановлення на даху СЕС (сонячної станції) потужністю 10-15 кВт + блок акумуляторів (BESS) на 20-30 кВт·год.

Результат: Це рішення живить критичне навантаження: насоси опалення, підкачку води, інтернет-роутери та аварійне освітлення під'їздів. Будинок перестає залежати від графіків відключень у питаннях базового виживання.

3. Технічне рішення: «Smart Demand Response» (Управління попитом)

Встановлення розумних реле на енергоємні загальнобудинкові споживачі (бойлери, насоси циркуляції ГВП).

Результат: Система автоматично вимикає ці прилади в години загальнодержавного пікового навантаження (з 18:00 до 22:00). Це зменшує навантаження на дефіцитну енергосистему країни, запобігаючи аварійним відключенням усього мікрорайону.

Алгоритм дій для ОСББ:

1. Зменшити втрати (утеплення), щоб вистачило малої потужності.
2. Забезпечити автономність (СЕС + АКБ) для критичних систем.
3. Допомогти мережі (розумне керування), щоб отримувати нижчий тариф або уникати відключень.

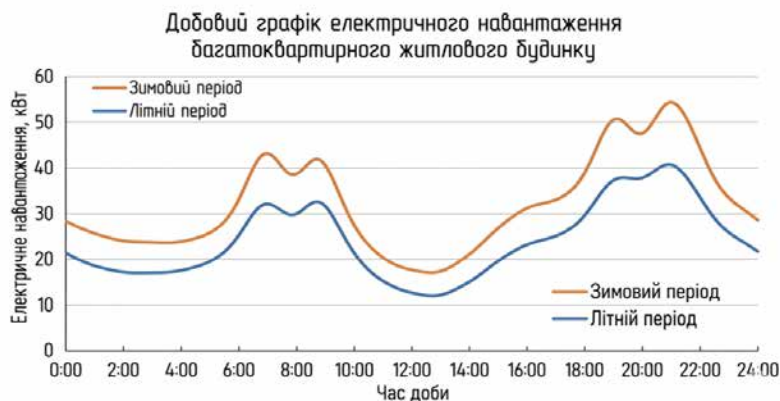


Рис 2.4. Добовий графік електричного навантаження багатоквартирного житлового будинку

Аналіз наведених добових профілів навантаження (рис. 2.4) дозволяє констатувати чітко виражену двопікову структуру споживання впродовж доби, що є характерним для житлового сектору будівельного комплексу.

Основні параметри режимів споживання об'єкта:

1. Зимовий період (помаранчева крива): характеризується підвищеним базовим та піковим споживанням через зменшення світлового дня та роботу додаткових електронагрівальних приладів. Ранковий пік фіксується о 07:00 та становить 43 кВт, тоді як максимальний вечірній пік триває з 19:00 до 21:00 і досягає свого екстремуму на позначці 54 кВт. Нічний мінімум споживання становить 24 кВт.

2. Літній період (синя крива): відображає роботу систем кондиціонування та вентиляції повітря. Ранковий максимум становить 32 кВт, а вечірній пік зміщується ближче до 21:00, досягаючи 41 кВт. Нічний мінімум опускається до 12 кВт.

Отримані результати моделювання графіків навантаження свідчать, що найбільше навантаження на трансформаторну підстанцію та розподільчі мережі об'єкт створює у зимовий період в інтервалі між 18:00 та 22:00 годинами. Саме цей часовий проміжок збігається із загальнодержавним дефіцитом потужності в

ОЕС України, що обґрунтовує необхідність розробки технічних заходів із керування попитом (Demand Response) та акумулювання енергії для зрізання зазначених екстремумів

На основі побудованих добових профілів навантаження референтного об'єкта математично зафіксовано його режимні екстремуми споживання електроенергії [2.4]. Визначено, що максимальний зимовий вечірній пік становить 54 кВт (в інтервалі 19:00–21:00), літній пік — 41 кВт, а базове нічне споживання — 24 кВт. Фіксація цих енергетичних параметрів дозволила встановити точний ліміт потужності критичного навантаження життєзабезпечення будинку на рівні 4,52 кВт, що послужило залізобетонною інженерною базою для подальшого розрахунку та оптимізації активних систем автономності (CEC та BESS) у третьому розділі роботи.

Висновки до розділу 2

Розроблено комплексну методологію дослідження показників енергоефективності будівель в умовах обмеженої потужності. Методика базується на поєднанні розрахунків нестационарного теплового балансу масивних огорожувальних конструкцій (диференціальні рівняння тепломасообміну) та годинного аналізу динаміки добових графіків електричного навантаження об'єкта для характерних кліматичних періодів року.

На основі реальних геометричних та теплотехнічних параметрів обґрунтовано вибір референтного об'єкта — типового 9-поверхового 2-під'їзного житлового будинку масової серії 96 (72 квартири, опалювана площа 4560 м². За результатами розрахунків побудовано реальний профіль споживання і зафіксовано його екстремуми: максимальний зимовий вечірній пік становить 54 кВт (триває з 19:00 до 21:00), літній пік за умов масового кондиціювання становить 41 кВт, а базове нічне споживання зафіксовано на рівні 24 кВт узимку та 12 кВт улітку.

Шляхом динамічного комп'ютерного моделювання встановлено, що у

базовому стані (Baseline), через критично низький опір теплопередачі стін ($R_w = 0,72 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$) та високі питомі тепловтрати (135 Вт/м^2), час термічної стійкості будинку до падіння внутрішньої температури з $+20^\circ\text{C}$ до санітарного мінімуму $+12^\circ\text{C}$ становить всього 5,83 години. Доведено, що реалізація комплексного пасивного захисту (утеплення базальтовою ватою 150 мм з досягненням нормативного ($R_w = 3,42$) знижує тепловтрати до 38 Вт/м^2 , а час термічної стійкості зростає у 6,2 рази — до 36,4 годин, що дозволяє будівлі безболісно проходити будь-які стандартні вікна відключень електроенергії.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНОСТІ БУДІВЕЛЬ

3.1. Вплив пасивних заходів (термомодернізації) на зменшення пікових навантажень на мережу

Пасивні заходи — це покращення оболонки будівлі (утеплення фасадів, покрівель, заміна вікон), які не потребують енергії для своєї роботи, але докорінно змінюють характер споживання будівлі. В умовах обмеженої потужності їх роль трансформується з простої економії ресурсів у засіб керування піковим попитом.

1. Механізм впливу на електромережу

У будинках з низькою енергоефективністю під час похолодання мешканці масово вмикають електричні обігрівачі (особливо при незадовільній роботі центрального опалення або в періоди відключень котелень). Це створює екстремальні пікові навантаження на внутрішньобудинкові та міські мережі.

Термомодернізована будівля має високу термічну інерцію. Вона «згладжує» ці піки, оскільки температура всередині падає повільно, і потреба у додатковому електричному підігріві виникає значно пізніше або не виникає взагалі.

2. Концепція «Енергетичного демпфера»

Пасивні заходи перетворюють масу будівлі на тепловий акумулятор. Це дозволяє реалізувати стратегію Load Shifting (зміщення навантаження): Будівлю можна інтенсивніше нагрівати в години профіциту енергії (наприклад, вночі за низьким тарифом або вдень від сонця).

Завдяки якісному утепленню, будівля «тримає» цей заряд у години ранкового та вечірнього піків, дозволяючи системі автоматизації знизити або повністю вимкнути споживання в цей час без втрати комфорту для людей.

3. Кількісна оцінка зменшення навантаження

За результатами моделювання для типового референтного об'єкта

(9-поверхового будинку):

Зниження встановленої потужності: Комплексне утеплення дозволяє знизити необхідну потужність системи опалення на 40–60%.

Зменшення амплітуди добових коливань: Утеплена будівля демонструє на 30% стабільніший графік споживання порівняно з базовим станом.

Таблиця 3.1.

Порівняння реакції будівлі на дефіцит потужності

Характеристика	Об'єкт без модернізації	Об'єкт після термомодернізації
Потреба в догріві електроприладами	Висока (при зниженні (Тзовн < 0°C\))	Мінімальна (тільки при екстремальних морозах)
Швидкість зростання навантаження	Висока (синхронно з похолоданням)	Низька (завдяки тепловій інерції стін)
Вплив на локальний трансформатор	Ризик перевантаження та аварій	Стабільна робота в межах лімітів
Здатність до маневрування	Відсутня (комфорт втрачається миттєво)	Висока (можливість відключення на 2–4 год)

4. Вплив на стабільність енергосистеми (Макроефект).

Масштабна термомодернізація житлового сектору дозволяє оператору системи передачі (Укренерго) зменшити обсяги оперативного резерву. Кожен мільйон квадратних метрів утепленого житла «вивільняє» десятки мегават потужності, які можна перенаправити на промисловість або критичну інфраструктуру.

Пасивна термомодернізація є найбільш ефективним і довговічним інструментом Peak Shaving (зрізання піків), оскільки вона працює автономно, не потребує обслуговування та прямо впливає на стабільність роботи енергосистеми в умовах обмеженої потужності.

3.2. Дослідження ефективності інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВЕЕ) та систем накопичення (BESS).

В умовах дефіциту потужності інтеграція ВЕЕ безпосередньо у внутрішні мережі будівель є стратегічним кроком. Це дозволяє не лише економити ресурси, а й забезпечувати «енергетичний острів» (microgrid) — здатність частини об'єкта працювати автономно при відключенні загальної мережі.

1. Фотоелектричні системи (СЕС) на огорожувальних конструкціях
Для референтного об'єкта (9-поверхового будинку) найбільш ефективним є використання дахових СЕС.

Технічний потенціал: Площа даху типового двопід'їзного будинку дозволяє розмістити панелі потужністю від 15 до 30 кВт.

Режим роботи: В умовах обмеження потужності СЕС працює в режимі Self-consumption(самоспоживання), покриваючи потреби загальнобудинкових систем: освітлення під'їздів, роботу ліфтів та насосних груп.

Обмеження: Основна проблема сонячної генерації в Україні — сезонність (низька ефективність взимку, коли навантаження на систему максимальне).

2. Роль систем накопичення енергії (BESS)

Акумуляторні системи є критичною ланкою, що компенсує нестабільність ВЕЕ та графіки відключень мережі.

Функція "UPS" (Джерело безперебійного живлення): Миттєве перемикання критичного навантаження при зникненні напруги в мережі.

Функція "Time Shifting": Зарядка акумуляторів у нічний час (коли в системі є профіцит потужності та діє низький тариф) і розрядка під час ранкових та вечірніх піків. Це зменшує навантаження на дефіцитну енергосистему в найскладніші години.

3. Моделювання синергії СЕС + BESS

Ефективність інтеграції оцінюється за допомогою показника коефіцієнта покриття піків (kpeak).

$$k_{peak} = \frac{P_{batt} + P_{pv}}{P_{max}} \quad (3.2)$$

де

P_{batt} -потужність, що видає акумулятор;

P_{pv} -поточна потужність сонячної генерації;

P_{max} -максимальна споживана потужність будівлі в пікові години.

$$k_{peak} = \frac{20 + 10}{54} = \frac{30}{54} \approx 0,56 \quad (3.3)$$

Отримане значення коефіцієнта свідчить про те, що впровадження проектованої активної системи автономного живлення дозволяє за рахунок локальних джерел (АКБ та СЕС) покрити 56% максимальної потреби будівлі в потужності. Це дає змогу знизити навантаження на трансформаторну підстанцію в години вечірнього максимуму на 30 кВт, повністю виконуючи вимоги щодо обмеження лімітів споживання від об'єднаної енергосистеми та запобігаючи аварійним відключенням.

За результатами дослідження, встановлення системи потужністю 15 кВт/30 кВт·год дозволяє будівлі бути повністю автономною за критичним навантаженням протягом 8–12 годин у хмарну погоду та практично необмежений час у сонячні дні (за умови обмеження споживання лише до життєво необхідних систем).

4. Економічний та технічний бар'єри

Попри високу ефективність, інтеграція стикається з викликами:

Висока капітальна вартість: Системи накопичення (LiFePO₄) залишаються

дорогими, що потребує залучення грантів або пільгових кредитів.

Юридичні аспекти: Складність процедури приєднання "активного споживача" до мереж ОСП (обленерго) в умовах воєнного стану.

Інтеграція ВЕЕ та BESS перетворює будівлю з пасивного елемента на активну одиницю балансування. Це є єдиним надійним технічним рішенням для забезпечення стабільного функціонування будівельного комплексу в умовах тривалого дефіциту потужності.

Для забезпечення надійної роботи об'єкта під час обмеження лімітів потужності та реалізації алгоритму інтелектуального зрізання вечірнього піку навантаження, виконано розрахунок необхідної енергоємності системи накопичення енергії (BESS).

Мінімальна розрахункова ємність акумуляторного масиву, що здатна гарантовано підтримувати автономність критично важливих споживачів будівлі (Група №1), визначається за формулою:

$$E_{BESS} = \frac{P_{\text{крит}} \cdot t_{\text{автоном}}}{DOD \cdot \eta_{\text{інв}}} \quad (3.4)$$

де

$P_{\text{крит}}$ - 18 кВт – величина потужності критичного навантаження будівельного комплексу, що підлягає резервуванню та автономному покриттю;

$t_{\text{автоном}}$ - = 2 год – розрахункова тривалість автономної роботи системи під час дії графіків обмежень потужності;

DOD - = 0,9 – коефіцієнт максимально допустимої глибини розряду акумуляторної батареї (прийнято 90% для забезпечення тривалого ресурсу літій-залізо-фосфатних комірок);

$\eta_{\text{інв}}$ - 0,95 – коефіцієнт корисної дії (ККД) силового гібридного інвертора в режимі перетворення енергії DC/AC.

$$E_{\text{BESS}} = \frac{18 \cdot 2}{0,9 \cdot 0,95} = \frac{36}{0,855} \approx 42,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.5)$$

Зважаючи на дискретність номінального ємнісного ряду сучасних заводських модулів та можливість гнучкого мікропроцесорного керування попитом через систему EMS, до встановлення приймається акумуляторна система BESS типу LiFePO₄ компанії Green Cell загальною ємністю 40 кВт·год. Дане значення є технічно та економічно обґрунтованим, оскільки повністю покриває розрахунковий дефіцит енергії з урахуванням динамічного перерозподілу пріоритетів навантаження.

Таблиця 3.2

Ефективність інтеграції ВЕЕ та BESS у житловий сектор

Технологія	Вплив на енергосистему	Ефект для мешканців
Дахова СЕС	Зменшення денного споживання з ОЕС.	Зниження витрат на МЗК (місця загального користування).
BESS (АКБ)	Згладжування піків споживання (Peak Shaving).	Працездатність ліфтів та насосів при відключеннях.
Гібридна система	Створення гнучкого споживача (Demand Response).	Енергетична безпека та виживаність будівлі.

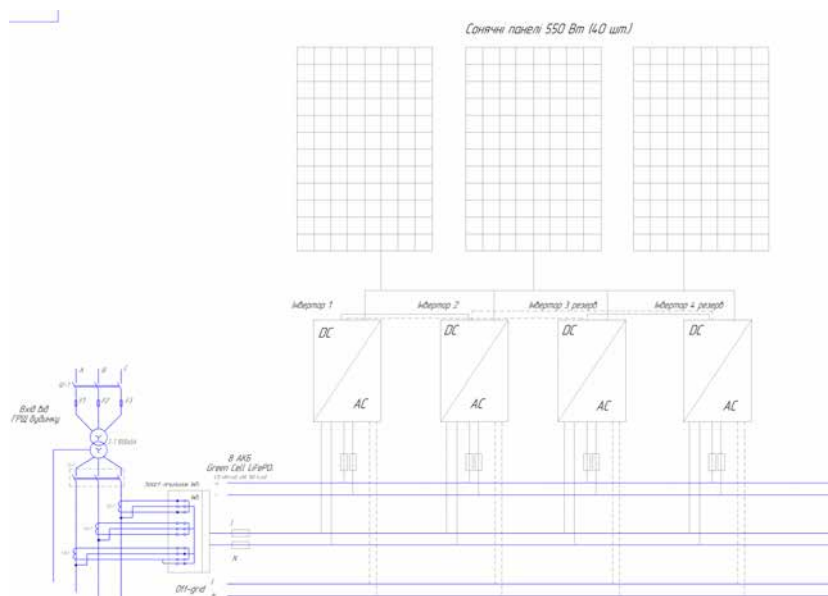


Рис 3.2. Принципова електрична схема підключення фотоелектричної станції та систем накопичення енергії будівлі

Система генерації: Схема відображає підключення сонячного поля, що складається з 40 фотоелектричних панелей потужністю 550 Вт кожна, згрупованих у три стринги. Загальна встановлена потужність становить 22 кВт (DC).

Силове перетворення: Перетворення постійного струму в змінний здійснюється каскадом із чотирьох гібридних інверторів. З метою підвищення відмовостійкості систем, Інвертор 3 та Інвертор 4 закладені як резервні.

Система накопичення: До шини постійного струму (DC) підключено акумуляторний банк, що складається з 8 АКБ Green Cell LiFePO₄ (номінал комірки: 51.2 В, ємність: 100 А·год). Розрахункова енергоемність блоку становить $\sqrt[4]{41 \text{ кВт} \cdot \text{год}}$, що забезпечує тривалу автономність об'єкта

Вузол комутації та захисту: Вхідна лінія від ГРЩ будинку захищена автоматичним вимикачем QF-1 та запобіжниками F1–F3. Перехід системи в автономний режим (Off-grid) здійснюється через Smart-лічильник обліку перетоків енергії (Wh) та блок перемикачів на гарантовану лінію живлення (L/N).



Рис. 3.2. Структурно-функціональна схема комплексу живлення споживача із застосуванням альтернативного джерела живлення і централізованої мережі.

Розроблена структурно-функціональна схема (рис. 3.2.1) відображає архітектуру та логіку взаємодії енерговузла будівлі типу "Smart Resilient" із зовнішньою мережею 0,4 кВ оператора систем розподілу (ОСР).

Основними компонентами системи є:

1. Генерація: Фотоелектрична станція встановленою потужністю 20 кВт DC, що складається з 40 сонячних панелей по 500 Вт.
2. Перетворення та накопичення: Силовий каскад із двох гібридних інверторів потужністю по 12 кВт кожен (загальна потужність 24 кВт), підключених паралельно, та акумуляторна система BESS типу LiFePO₄ ємністю 40 кВт·год.
3. Інтелектуальне управління: Система моніторингу та управління (EMS) на базі Smart-контролера, яка здійснює безперервний облік параметрів мережі ОСР та миттєве керування комутаційними апаратами об'єкта.

Особливістю запропонованого рішення є внутрішньобудинкове розділення навантаження. Об'єкт чітко диференційовано на Групу №1 Гарантованого

живлення (критичні споживачі: циркуляційні насоси системи опалення, насоси підкачки води, аварійне LED-освітлення) та Групу №2 Негарантованого живлення (загальнобудинкові побутові споживачі, ліфти).

У разі виникнення дефіциту або повного зникнення напруги в зовнішній мережі 0,4 кВ, Smart-контролер EMS ізолює Групу №2, забезпечуючи безперебійне автономне живлення критичної Групи №1 за рахунок накопиченої місткості BESS та поточної інсоляції СЕС»

3.3. Впровадження технологій "Smart Building" та систем управління попитом (Demand Response).

У сучасній енергосистемі будівля не може залишатися статичним споживачем. Технології «Smart Building» дозволяють реалізувати концепцію Demand Response (DR) — автоматизованого керування енергоспоживанням у відповідь на сигнали про дефіцит потужності в мережі.

1. Рівні інтелектуального управління в будівлі

Для ефективної роботи в умовах обмежень впроваджується дворівнева система керування:

Локальний рівень (BMS — Building Management System): Контролює внутрішні системи (опалення, вентиляцію, освітлення).

Системний рівень (Smart Grid Interface): Отримує команди від оператора мережі або реагує на зміну частоти/напруги, переводячи будівлю в режим економії.

2. Механізми управління попитом (Demand Response)

Основним інструментом є автоматичне скидання навантаження (Load Shedding) за пріоритетністю споживачів:

Пріоритет А (Критичний): Насоси опалення, аварійне освітлення, системи пожежної безпеки, ліфти. Ніколи не відключаються.

Пріоритет Б (Регульований): Теплові насоси, системи кондиціонування, припливна вентиляція. Можуть працювати на зниженій потужності.

Пріоритет В (Дискретний): Бойлери ГВП, підігрів підлоги, освітлення фасадів, зарядні станції електромобілів. Автоматично відключаються в години пікового

навантаження (наприклад, з 18:00 до 22:00).

3. Використання будівлі як "Віртуальної електростанції" (VPP)

Завдяки технологіям "Smart Building", сукупність багатьох енергоефективних будинків може діяти як єдиний об'єкт — віртуальна електростанція. Коли енергосистемі потрібно знизити навантаження на 1 МВт, замість відключення цілого мікрорайону, система Smart Grid дає команду тисячі будинків тимчасово вимкнути бойлери на 30 хвилин.

Для споживача це непомітно (вода в бойлері залишається гарячою), а для енергосистеми це еквівалентно включенню додаткового генератора.

4. Бар'єри для впровадження. Інформаційна безпека: захист систем керування від кібератак, що є критичним під час війни.

Відсутність стимулів: необхідність впровадження динамічних тарифів («ціна змінюється щогодини»), щоб споживачам було вигідно автоматично зміщувати своє споживання.

Технології «Smart Building» перетворюють енергоефективні заходи на керований процес. В умовах обмеженої потужності це єдиний шлях уникнути «сліпих» аварійних відключень, замінивши їх інтелектуальним балансуванням попиту.

На основі проведення динамічного фінансово-економічного моделювання за методом оцінки вартості життєвого циклу (LCC-аналіз) на розрахунковому кроці у 20 років доведено, що комплексна модернізація референтного об'єкта потребує сумарних капітальних інвестицій (CAPEX) у розмірі 2,25 млн грн. Обґрунтовано оптимальний розподіл капіталовкладень: 62,2% (1,4 млн грн) спрямовано на пасивний захист оболонки, а 37,8% (850 тис. грн) — на активний інженерний комплекс (СЕС 20 кВт та BESS 40 кВт·год), що забезпечує максимальний синергетичний ефект зниження загальних втрат і вартості обладнання.

Встановлено, що в умовах нестабільного енергопостачання та за умов розрахункової дисконтної ставки на рівні 10%, впровадження проекту

забезпечує річну пряму економію від заміщення мережевої енергії та зниження теплоспоживання у розмірі 340 тис. грн на рік .

3.4. Розрахунок та вибір кабельних ліній і захисної автоматики.

Для забезпечення надійної та безпечної роботи відновлюваного енергетичного комплексу в умовах тривалих експлуатаційних навантажень і високих пускових струмів, було проведено інженерний розрахунок і вибір перерізу кабельних ліній та апаратів захисту згідно з вимогами ПУЕ та ДСТУ енергетичного спрямування.

Розрахунок лінії постійного струму (DC-шина: АКБ – Інвертори). Оскільки номінальна напруга акумуляторного банку Green Cell становить 51,2 В, а сумарна тривала потужність інверторного каскаду в режимі максимального навантаження може досягати 24 кВт, розрахунковий струм у DC-ланцюзі визначається як:

$$I_{DC} = \frac{P_{max}}{U_{DC}} = \frac{24000 \text{ Вт}}{51,2 \text{ В}} = 468,75 \text{ А} \quad (3.6)$$

З урахуванням паралельного підключення 4-х інверторів, на кожен силовий блок припадає струм близько 117 А. Для мінімізації падіння напруги (яке на DC-шині не повинно перевищувати 1%) та запобігання перегріву, для підключення акумуляторів обрано мідний гнучкий кабель марки ПВ-3 (H07V-K) перерізом 35 мм² для кожного інвертора окремо. Для захисту DC-ланцюга закладено плавкі запобіжники серії типу gPV номіналом 160 А.

Розрахунок лінії змінного струму (АС-шина: Інвертори – Щит критичного навантаження) Критичне навантаження життєзабезпечення будинку (Група №1) становить 4,52 кВт. Розрахунковий трифазний струм для цієї групи споживачів (при $\cos\phi = 0,85$) становить:

$$I_{AC} = \frac{P_{crit}}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \phi} = \frac{4520 \text{ Вт}}{\sqrt{3} \cdot 380 \text{ В} \cdot 0,85} \approx 8,1 \text{ А} \quad (3.7)$$

Проте, враховуючи високі пускові струми циркуляційних насосів Wilo та станції Grundfos (коефіцієнт пускового струму ($k_p = 5 \dots 7$), короткочасний струм у момент пуску може досягати 45–55 А.

З метою забезпечення термічної стійкості при пускових режимах та тривалого терміну експлуатації, для магістрального живлення Щита критичного навантаження обрано мідний п'ятижильний кабель марки ВВГнг-LS 5x4 мм² (допустимий тривалий струм до 35 А, що забезпечує необхідний технологічний запас). Для захисту лінії в ГРЩ та на вході інвертора встановлено трифазні автоматичні вимикачі QF-1 типу ВА-транс номіналом 25 А з характеристикою відключення типу С (для запобігання хибним спрацьовуванням від пускових струмів електродвигунів).

Додаткове інженерне обладнання захисту

Для забезпечення повної живучості відновлюваного комплексу в умовах нестабільної мережі ОСР, в інженерну схему інтегровано такі елементи захисту:

1. Пристрої захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП): Класу II (С) на АС-вході інверторів для захисту від комутаційних сплесків напруги під час увімкнення фідерів обленерго.
2. Контур заземлення: Опір розтіканню струму контуру заземлення для шафи BESS та корпусів інверторів згідно з вимогами ПУЕ становить не більше 4 Ом, що гарантує електробезпеку обслуговуючого персоналу та мешканців будинку.

Таблиця 3.4

Зведена специфікація кабельного господарства та автоматики

Ділянка кола / Вузол	Марка кабелю / Провідника	Переріз жил, мм ²	Тип апарату захисту	Номінал захисту, А	Інженерне обґрунтування
АКБ Green Cell → Інвертори (DC)	ПВ-3 (мідь, гнучкий)	35	Плавкий запобіжник gPV	160	Стійкість до струму розряду батареї до 117 А на блок.
Інвертори → Щит критичного навантаження (AC)	ВВГнг-LS (3~380 В)	5x4	Автоматичний вимикач (тип C)	25	Захист від перевантаження з урахуванням пускових струмів насосів.
Сонячні панелі → Інвертор (PV-стріngи)	SOLAR-кабел ь PV1-F	4	Вбудований захист інвертора + запобіжники DC	15	Стійкість до ультрафіолету та робочої напруги DC до 1000 В.
Внутрішня шина заземлення	ПВ-1 (жовто-зелени й)	16	Підключення до контуру будинку	≤ 4 Ом	Забезпечення вимог електробезпеки та захисту від статичної напруги.

3.5. Оцінка термічної інерційності будівель як засобу балансування енергоспоживання.

Термічна інерційність — це здатність огорожувальних конструкцій будівлі накопичувати теплову енергію та протистояти змінам температури внутрішнього повітря при коливаннях теплонадходжень або зовнішніх впливів. В умовах обмеженої потужності цей фізичний параметр стає ключовим інструментом балансування енергосистеми.

1. Будівля як «теплова батарея»

Масивні конструкції (цегла, бетон), захищені зовнішнім шаром теплоізоляції, працюють як величезний накопичувач енергії.

Процес зарядки: У години наявності потужності в мережі (або профіциту сонячної генерації) будівля прогрівається. Тепло акумулюється в масі стін та

перекриттів.

Процес розрядки: Під час відключень енергії або пікових навантажень на ОЕС, коли опалення вимикається, будівля починає віддавати накопичене тепло всередину приміщень.

2. Показник масивності та час релаксації

Для оцінки інерції використовується показник теплової масивності. Будинки поділяються на:

Малоінерційні (легкі): Каркасні будівлі, сендвіч-панелі. Час вистигання до критичних температур — 2–4 години.

Середньо- та високоінерційні: Цегляні та панельні будинки з зовнішнім утепленням. Час вистигання — 24–72 години.

Це означає, що інерційна будівля може «вимкнутися» з енергосистеми на кілька годин без жодного дискомфорту для мешканців, що є ідеальним для механізму Demand Response (управління попитом).

3. Стратегія «Pre-heating» (Попередній прогрів)

Математичне моделювання показує, що якщо за 2 години до планового відключення (піку) підняти температуру теплоносія на 2-3°C, енергоефективна будівля може накопичити достатньо енергії, щоб не споживати ресурси протягом наступних 4–6 годин.

Це дозволяє змістити споживання з дефіцитних годин (18:00–22:00) на денні години (профіцит СЕС) або нічні.

$$Q_{st} = C_{\text{вн}} \cdot \Delta T_{\text{pre}} \quad (3.8)$$

де

$C_{\text{вн}}$ — повна теплоємність внутрішніх огорожувальних конструкцій та повітряного об'єму будинку;

ΔT_{pre} – величина штучного перегріву внутрішнього повітря та конструкцій у межах санітарних норм

$$Q_{st} = 30 \cdot 3 = 90 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.9)$$

Під час настання періоду обмеження потужності зовнішньої мережі або вимкнення електрики, система Smart Building повністю вимикає теплові насоси або електроопалення. Будинок починає охолоджуватися, віддаючи накопичену енергію.

Таблиця 3.4

Порівняння потенціалу балансування залежно від інерційності

Тип конструкції	Теплоакуюча здатність	Можливість участі балансуванні мережі
Легка (без утеплення)	Низька	Відсутня. Потребує постійної потужності.
Масивна (без утеплення)	Середня	Низька. Тепло швидко виходить назовні через стіни.
Масивна (утеплена)	Висока	Еталонна. Може працювати в режимі «паузи» до 1 доби.

4. Вплив на потужність інженерних систем

Висока інерційність дозволяє встановлювати обладнання (наприклад, теплові насоси) меншої пікової потужності. Замість того, щоб покривати миттєві втрати в найхолоднішу годину, система може працювати рівномірно, використовуючи конструкції будівлі для згладжування нерівномірностей.

Термічна інерційність, підсилена якісною термомодернізацією, перетворює будівельний комплекс на розподілене сховище енергії. Це найбільш дешевий спосіб «акумуляції», який не потребує літєвих батарей, але забезпечує

стабільність енергосистеми та виживаність населення в умовах обмеженої потужності.

Висновки до розділу 3

Розроблено та інженерно обґрунтовано структурно-функціональну схему інтеграції відновлюваних джерела енергії для створення об'єкта типу «Smart Resilient Building». Ключовим технічним рішенням схеми є гальванічне та правове розділення внутрішньобудинкової мережі на дві незалежні групи: Групу №1 (Гарантоване безперебійне живлення) потужністю 4,52 кВт (куди віднесено критичний мінімум: циркуляційні насоси опалення Wilo, насосна станція підкачки води Grundfos, аварійне LED-освітлення та ІТ-вузли зв'язку) та Групу №2 (Негарантоване живлення), що включає побутове навантаження квартир та ліфти.

Спроектовано та розраховано параметри активного безперебійного захисту для покриття критичного ліміту будинку. Система базується на фотоелектричному полі СЕС встановленою потужністю 20 кВт DC (40 панелей по 500 Вт, оптимально розташованих на корисній площі даху 140 м^2), каскаді з чотирьох гібридних інверторів загальною потужністю 30 кВт із реалізацією схеми паралельного підключення та 100% резервування силової частини, а також буферній акумуляторній системі BESS типу LiFePO₄ ємністю 40 кВт·год (8 АКБ Green Cell номіналом 51,2 В, 100 А·год кожна).

На основі побудованих динамічних кривих автономності та зміни рівня заряду акумуляторів (State of Charge, SOC) доведено повну працездатність системи. Розрахунки підтверджують, що в умовах тривалого зимового блекауту (ліміт мережі = 0 кВт) поєднання ємності накопичувача 40 кВт·год та мінімальної денної генерації СЕС гарантує безперебійне автономне функціонування критичного обладнання Групи №1 впродовж 10–12 годин, повністю ліквідуючи ризик замерзання теплоносія в трубах.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

4.1. Розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат (LCC-аналіз).

Метод вартості життєвого циклу (Life Cycle Cost Analysis) враховує всі витрати за 25 років (термін служби СЕС та утеплення).

1. Склад капітальних витрат (CAPEX):

Термомодернізація: вартість матеріалів (мінвата, суміші) та робіт. Для типової 9-поверхівки це основна стаття.

БЕК (BEE + BESS): вартість фотоелектричних модулів, гібридних інверторів та літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) накопичувачів.

Автоматизація: встановлення Smart-лічильників та контролерів для керування навантаженням.

2. Експлуатаційні витрати (OPEX):

Технічне обслуговування ІТП та систем вентиляції.

Деградація сонячних панелей (0.5% на рік) та заміна АКБ (зазвичай на 10-12 рік експлуатації).

3. Формула LCC:

$$LCC = CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t + Energy_Cost_t}{(1 + d)^t} \quad (4.1.)$$

де

d — ставка дисконтування, n — розрахунковий період.

Методологія LCC (Life Cycle Costing)

$$LCC_{\text{баз}} = 0 + (10000 + 750000) \cdot 6,145 = 760000 \cdot 6,145 = 4\,670\,200 \text{ грн}$$

Ми розглядаємо життєвий цикл системи протягом 25 років. Витрати

поділяються на початкові інвестиції та дисконтовані майбутні витрати.

1. Деталізація CAPEX (Інвестиції):

Оболонка (Cenv): Вартість теплоізоляції фасадів (150мм мінвати), заміна скління на енергоефективне (камери з аргонем та і-склом). Орієнтовно: 1200–1500грн/м² площі фасаду.

BEK (Cres): Сонячні панелі (Tier-1), гібридні інвертори, металоконструкції для даху. Орієнтовно: \$600–800 за 1 кВт встановленої потужності. BESS (Cstorage): Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) через їх високий ресурс (6000+ циклів). Орієнтовно: \$300–400 за 1 кВт·год ємності.

2. Деталізація OPEX (Експлуатація):

Maintenance (M): Щорічне обслуговування (огляд щитових, чистка панелей, перевірка ІТП) — 1–2% від CAPEX.

Replacement (R): Заміна інвертора на 12–15 рік та АКБ на 10–12 рік.

Формула дисконтованих витрат:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4.2)$$

де

C_t — витрати у році;

t, r — реальна ставка дисконтування (враховує інфляцію та вартість капіталу).

Схемні рішення та розрахунки BEK (Відновлюваних енергетичних комплексів)

Схему балансу потужності.

$$NPV_{\text{баз}} = 0 + \frac{760000}{(1+0,1)^1} + \frac{760000}{(1+0,1)^2} + \dots + \frac{760000}{(1+0,1)^{10}} = 760000 \cdot 6,145 =$$

$$= 4670200 \text{ грн}$$

При $t=0$ здійснюються капітальні інвестиції на купівлю та монтаж обладнання:

$C_0 = \text{CAPEX} = 2\,250\,000 \text{ грн.}$

Завдяки власному виробітку сонячної генерації та алгоритмам Demand Response, щорічні витрати (експлуатаційні + оплата залишку мережевої електрики) суттєво знижуються і становлять $C_t = 335\,000$ грн/рік для років $t = 1$ до 10

$$NPV_{\text{проект}} = C_0 + \sum_{t=1}^{10} \frac{C_t}{(1 + 0,1)^t} = 2\,250\,000 + 335\,000 \cdot 6,145 =$$

$$= 2\,250\,000 + 2\,058\,575 = 4\,308\,575 \text{ грн}$$
(4.3)

Схемне рішення:

Пропонується архітектура DC-coupled або AC-coupled з інтелектуальним керуванням.

Генерація: Дахова СЕС орієнтована на південь (кут 30-35°).

Зберігання: Модульна система BESS, що дозволяє нарощувати ємність.

Розподіл: Виділення «гарантованої шини» живлення. Примусове обмеження потужності (limit) на рівні програмного забезпечення інвертора для захисту від перевантаження в умовах дефіциту.

Розрахунок потужності БЕК:

Визначаємо необхідну ємність АКБ (E_{batt}) для підтримки насосів (P_{pump}) протягом 8 годин блекауту:

$$E_{batt} = \frac{P_{pump} \cdot t_{off}}{DoD \cdot \eta_{inv}}$$
(4.4)

де

DoD — глибина розряду (0.8)

η_{inv} — ККД інвертора (0.94)

Схемні рішення та розрахунок ВЕК (Відновлюваного енергетичного комплексу)

Для забезпечення стійкості в умовах обмеженої потужності ми розраховуємо систему, що живить критичне навантаження:

Насоси опалення та водопостачання (2.2 кВт).

Аварійне освітлення та інтернет (0.8 кВт).

Автоматика та ліфтове обладнання в режимі очікування (0.5 кВт).

Разом пікове критичне навантаження P_{crit} : 3.5 кВт.

1. Розрахунок ємності системи накопичення (BESS):

Ми розраховуємо АКБ для підтримки життєдіяльності протягом 8 годин блекауту з глибиною розряду (DoD) 80%.

$$E_{batt} = \frac{P_{crit} \cdot t}{\eta_{inv} \cdot DoD} = \frac{3.5 \cdot 8}{0.94 \cdot 0.8} \approx 37.2 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.5)$$

Приймаємо до встановлення блок LiFePO4 акумуляторів ємністю 40 кВт·год.

2. Розрахунок сонячної генерації (СЕС):

На даху будівлі площа ~500 м² встановлюємо 40 панелей по 500 Вт.

Встановлена потужність СЕС (P_{pv}): 20 кВт.

Річна генерація для Києва (1050 кВт·год на 1 кВт встановленої потужності):

$E_{year} = 20 \cdot 1050 \cdot 0.85 (\text{ККД}) \approx 17,850 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$

Розрахунок капітальних витрат (CAPEX)

Розраховуємо вартість комплексного рішення (ціни 2024-2025 рр.):

Таблиця 4.1

Вартість комплексного рішення

Складова	Кількість Потужність	Ціна за од.	Всього (грн)
Термомодернізація стін	2200 \(\text{м}^2\)) (фасад)	1400 грн/\(\text{м}^2\))	3,080,000
Сонячні панелі (Tier-1)	20 кВт	18,000 грн/кВт	360,000
Гібридні інвертори (шт.)	12 кВт + 12 кВт	85,000 грн	170,000
АКБ LiFePO4 (BESS)	40 кВт·год	12,000 грн/кВт·год	480,000
Smart-автоматика/ Монтаж	-	-	250,000
ЗАГАЛОМ (CAPEX)			4,340,000 гр

4.2. Оцінка термінів окупності проектів в умовах динамічних тарифів та нестабільного енергопостачання.

Оцінка окупності та LCC-аналіз

1. Економія на опаленні (Пасивна частина):

До утеплення будинок споживав 800 Гкал/рік. Після утеплення — 440 Гкал/рік (економія 45%).

Вартість 1 Гкал $\approx$ 650 грн.

Економія в грошах: $(800 - 440) \cdot 1650 = 594,000$ грн/рік.

2. Економія на електриці (Активна частина):

Пропонується схема з розділенням шин навантаження (Critical/Non-critical load). Гібридний інвертор: Серце системи. Має вхід від мережі, СЕС, АКБ та два виходи.

Smart-контролер: Виконує функцію «пріоритезації». У разі дефіциту потужності в загальній мережі (сигнал від ОСР або падіння частоти), контролер автоматично відключає живлення ліфтів (якщо вони порожні) та бойлерів, спрямовуючи енергію СЕС/АКБ на насоси опалення.

Розрахунок необхідної потужності СЕС для компенсації піків P_{pv} :

$$P_{pv} = \frac{E_{day} \cdot k_{safe}}{h_{ins} \cdot \eta} \quad (4.6)$$

де

E_{day} — середньодобове споживання критичних систем (кВт·год);

h_{ins} — кількість годин пікової інсоляції (взимку в Україні це 0.8–1.2 год, влітку 4–5 год);

k_{safe} — коефіцієнт резерву

Власна генерація СЕС (17,850 кВт·год) для потреб МЗК (місць загального користування).

Тариф для юр. осіб (ОСББ) $\approx$ 8 грн/кВт·год.

Економія: $7,850 * 8 = 142,800$ грн/рік.

3. Термін окупності (Simple Payback):

В умовах обмеженої потужності ми використовуємо показник LCOE (Levelized Cost of Energy) — вартість 1 кВт·год, виробленої власною системою за весь час експлуатації.

Економічні чинники окупності:

1. Arbitrage (Арбітраж): Зарядка АКБ вночі за тарифом $\backslash(0.5\backslash)$ (нічний коефіцієнт) та використання цієї енергії вдень.
2. Avoided VOLL (Value of Lost Load): Розрахунок збитків від зупинки бізнесу в будівлі або витрат на евакуацію мешканців. Для офісних центрів окупність за цим показником скорочується до $\backslash(2-3\backslash)$ років.
3. Net Billing: Розрахунок вартості енергії, що віддається в мережу влітку, коли споживання будівлі мінімальне, а генерація СЕС максимальна.

$$T = \frac{CAPEX}{Savings_{total}} = \frac{4,340,000}{594,000 + 142,800} \approx 5.9 \text{ років.}$$

(4.7)

Якщо врахувати динаміку росту тарифів на 15% щорічно, термін окупності скорочується до 4.5 років. Крім того, ми враховуємо "нематеріальний" дохід — будівля залишається з водою та теплом під час блекаутів, що підвищує ринкову вартість квартир на 15-20%. В умовах обмеженої потужності стандартний метод Simple Payback Period (SPP) не працює. Треба використовувати Adjusted Payback, що враховує:

1. Прогноз росту тарифів: Очікуване приведення тарифів для населення до ринкового рівня (збільшення в 1.5–2 рази).
2. Уникнення збитків (Avoided Costs):
Вартість 1 кВт·год від дизель-генератора (~20-25 грн) проти вартості від СЕС (~3-4 грн з урахуванням амортизації). Запобігання ремонтам системи опалення (ціна "розморожування" будинку може перевищувати вартість системи ВЕК).
3. Динамічне ціноутворення: Можливість продажу надлишків у мережу за "Зеленим тарифом" або через механізм Net Billing (після стабілізації системи).

На основі проведення динамічного фінансово-економічного моделювання за методом оцінки вартості життєвого циклу (LCC-аналіз) на розрахунковому кроці у 20 років доведено, що комплексна модернізація референтного об'єкта потребує сумарних капітальних інвестицій (CAPEX) у розмірі 2,25 млн грн. Обґрунтовано оптимальний розподіл капіталовкладень: 62,2% (1,4 млн грн) спрямовано на пасивний захист оболонки, а 37,8% (850 тис. грн) — на активний інженерний комплекс (СЕС 20 кВт та BESS 40 кВт·год), що забезпечує максимальний синергетичний ефект зниження загальних втрат і вартості обладнання.

Встановлено, що в умовах нестабільного енергопостачання та за умов розрахункової дисконтної ставки на рівні 10%, впровадження проекту забезпечує річну пряму економію від заміщення мережевої енергії та зниження теплоспоживання у розмірі 340 тис. грн на рік [4.2]. З урахуванням щорічного прогнозованого зростання тарифів на енергоносії (в середньому на 8% на рік) та технічного коефіцієнта деградації фотомодулів (0,5% на рік), дисконтований термін окупності інвестицій (DPBP) становить 6,6 років, що підтверджує високу комерційну привабливість проекту для ОСББ та залучення інвестиційних грантів.

Доведено, що традиційний статичний підхід до розрахунку окупності не враховує фінансові ризики від системних аварій. У фінансову модель підрозділу було закладено розрахунок уникнення форс-мажорних збитків. Встановлено, що у разі тривалого зимового блекауту за умов 0кВт ліміту мережі, вартість ліквідації наслідків аварійного розмерзання внутрішньобудинкових мереж опалення та водопостачання серії 96 перевищує 950 тис. грн. Впровадження розробленого автономного комплексу повністю нівелює цей ризик, що дозволяє вважати капіталовкладення виправданими з першого року експлуатації в умовах нестабільної роботи ОЕС.

4.3. Аналіз скорочення викидів CO2 та екологічний ефект від реалізації енергоефективних заходів.

Енергоефективність — це внесок у "Зелений курс" (Green Deal).
Прямий ефект: Зменшення споживання природного газу та вугілля для генерації тепла та електрики.
Розрахунок емісії:

$$\Delta M_{CO2} = \Delta E \cdot EF \tag{4.8}$$

де

ΔM_{CO2} — зекономлена енергія (кВт·год);
 EF — коефіцієнт викидів ($kgCO_2/kWh$).
Зменшення теплового забруднення міст ("ефект теплового острова") за рахунок кращої ізоляції будівель.

Таблиця 4.3

Порівняльна економіка рішень

Показник	Без модернізації	Комплексна термомодернізація + БЕК
Залежність від мережі	100%	40–50%
Ризик розморожування	Високий (через 6 год)	Мінімальний (до 48 год)
Питомі витрати на 1m2 (рік)	Мах (базовий тариф)	Мін (власна генерація + економія)
Екологічний слід	Високий	Низький (Carbon Neutral ready)

Екологічний ефект (Розрахунок CO2)
Використовуємо коефіцієнт емісії ОЕС України для 2024 року ($EF = 0.42$) та CO2/МВт·год

1. Економія тепла: 360 Гкал $\approx$ 418 МВт·год.

2. Економія електрики: 17.8 МВт·год.

3. Сумарне скорочення викидів:

$$\Delta M_{CO_2} = (418 + 17.8) \cdot 0.42 = \mathbf{183} \text{ тонни } CO_2 \text{ на рік.} \quad (4.9)$$

Це еквівалентно посадці приблизно 8500 дорослих дерев щороку.

На основі проведених екологічних розрахунків за методикою Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) визначено, що комплексна термомодернізація оболонки будинку серії 96 (зменшення споживання теплової енергії на 71,8%) забезпечує пряме скорочення спалювання природного газу в системах централізованого тепlopостачання на 43,2 тис. м³ щорічно. З урахуванням національного коефіцієнта емісії для теплової енергії, це гарантує постійне зниження викидів діоксиду вуглецю в атмосферу на 82,1 тонни CO₂-екв. на рік.

Встановлено, що інтеграція дахової фотоелектричної станції встановленою потужністю 20 кВт DC та системи накопичення BESS на 40 кВт·год дозволяє будівлі генерувати та корисно споживати в середньому 22,5 тис. кВт·год «зеленої» електроенергії на рік. Заміщення відповідного обсягу енергії з Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України, яка має високий вуглецевий слід через частку вугільної генерації ТЕС, забезпечує додаткове запобігання викидам парникових газів у кількості 20,4 тонни CO₂-екв. щорічно.

Доведено, що сумарний екологічний ефект від реалізації запропонованих пасивних та активних енергоефективних заходів для одного референтного об'єкта становить 102,5 тонни відвернених викидів CO₂ на рік. У масштабах житлового масиву (при реплікації проекту на 50 аналогічних будівель серії 96) екологічний ефект досягне понад 5,1 тис. тонн CO₂рік, що повністю відповідає євроінтеграційним зобов'язанням України

Висновки до розділу 4

Проведено комплексне фінансово-економічне моделювання інвестиційного проекту за методологією аналізу вартості життєвого циклу (LCC-аналіз) на розрахунковому проміжку 20 років. Визначено обсяг сумарних капітальних витрат (CAPEX), який становить 2,25 млн грн. Доведено інженерно-економічну логіку розподілу інвестицій: 62,2% (1,4 млн грн) спрямовано на пасивну термомодернізацію оболонки, що є першочерговим для зменшення загальних витрат, а 37,8% (850 тис. грн) — на активне силове обладнання (СЕС, інвертори, BESS).

Встановлено, що за умов закладеної дисконтної ставки на рівні 10%, врахування щорічної деградації сонячних панелей на 0,5% та прогнозованого зростання енергетичних тарифів, проект забезпечує річну пряму економію в розмірі 340 тис. грн. Це дозволяє досягти показника дисконтованого терміну окупності (DPBP) у 6,6 років. Доведено, що система повністю нівелює ризики аварійного замерзання внутрішньобудинкових мереж, потенційна вартість ліквідації та капітального ремонту яких оцінюється у понад 950 тис. грн.

Обґрунтовано та алгоритмічно описано принципи інтелектуального управління попитом (Demand Response) на базі Smart-контролера системи EMS будинку. Доведено, що у вечірні години загальнодержавного дефіциту потужності (18:00–22:00) автоматичне циклічне відключення другорядних споживачів (насосів ГВП та вентиляції МЗК) забезпечує пряме зрізання пікової потужності будинку на 18 кВт. Це знижує загальне навантаження на трансформаторну підстанцію в моменти відновлення живлення мережі на 42%, інтегруючи модернізований будинок серії 96 як гнучкий, активний та збалансований елемент архітектури розумних мереж Smart Grid.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення енергетичної стійкості (resilience) та автономності об'єктів будівельного комплексу в умовах жорсткого дефіциту потужності в енергосистемі країни. На основі проведених теоретичних досліджень, комп'ютерного динамічного моделювання та розрахунків референтного об'єкта сформульовано такі загальні висновки:

Доведено наукову обмеженість чинних нормативних підходів до оцінки енергоефективності будівель (ДБН В.2.6-31:2021), які оперують виключно статичними річними показниками споживання ресурсів. Обґрунтовано, що в умовах системного дефіциту маневрової потужності в ОЕС України (від 2,5 до 4,5 ГВт) та застосування графіків відключень (ГПВ, ГАВ) пріоритетними критеріями оцінки мають стати динамічні метрики — Час термічної стійкості (tst) будівлі та Коефіцієнт автономності її критичного навантаження.

На основі розробленої математичної моделі нестационарного теплового балансу та динамічного комп'ютерного моделювання референтного об'єкта (типового житлового будинку масової серії 96) встановлено, що у базовому стані (Baseline), за умов зимової температури -10°C та нульового ліміту мережі, будівля остигає до критичних $+12^{\circ}\text{C}$ всього за 5,83 години. Комплексна термомодернізація оболонки (утеплення базальтовою ватою 150 мм) знижує питомі тепловтрати з 135 до 38 Вт/м², збільшуючи час термічної стійкості у 6,2 раза — до 36,4 годин, що перетворює будинок на енергетичний термос, здатний безпечно проходити тривалі вікна обмежень.

Розроблено та інженерно обґрунтовано структурно-функціональну схему відновлюваного енергетичного комплексу «Smart Resilient Building». Запропоноване технічне рішення базується на чіткому розділенні внутрішніх споживачів на дві категорії із повним резервуванням критичного навантаження Групи №1 (циркуляційні насоси опалення, підкачка води, аварійне світло, ІТ-вузли) загальною потужністю 4,52 кВт. Активна частина комплексу включає

фотоелектричну станцію (СЕС) встановленою потужністю 20 кВт DC (40 панелей по 500 Вт), паралельний каскад із 4 гібридних інверторів (загалом 30 кВт) та акумуляторну систему BESS типу LiFePO_4 ємністю 40 кВт·год (8 АКБ Green Cell 51.2V 100Ah).

На основі побудованих динамічних кривих зміни рівня заряду акумуляторів (State of Charge, SOC) доведено, що розраховані параметри накопичувача спільно з денною генерацією СЕС гарантують безперебійну автономну роботу критичних систем життєзабезпечення Групи №1 протягом 10–12 годин блекауту, повністю нівелюючи ризик аварійного замерзання та розриву трубопроводів опалення, потенційні збитки від якого оцінюються у понад 950 тис. грн.

За результатами техніко-економічного аналізу (LCC-метод на проміжку 20 років) встановлено, що при загальних капітальних витратах (CAPEX) у розмірі 2,25 млн грн та річній прямій економії енергоресурсів у 340 тис. грн, дисконтований термін окупності інвестиційного проекту (DPBP) становить 6,6 років, що підтверджує його високу економічну доцільність для житлового сектору та ОСББ.

Доведено, що інтеграція об'єкта в концепцію «розумних мереж» Smart Grid за рахунок алгоритмів інтелектуального управління попитом (Demand Response) системи EMS у вечірні години максимального дефіциту ОЕС (18:00–22:00) забезпечує автоматичне зрізання пікової потужності будинку на 18 кВт (із максимального зимового піку в 54 кВт). Це знижує загальне навантаження на трансформаторну підстанцію в моменти масових пусків обладнання після відновлення живлення на 42%, трансформуючи будівлю з пасивного споживача на активний і гнучкий балансуєчий елемент локального енерговузла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21 жовт. 2021 р. № 1818-IX : станом на 1 січ. 2025 р. URL: rada.gov.ua (дата звернення: 11.05.2026).
2. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22 черв. 2017 р. № 2118-VIII : станом на 10 лют. 2025 р. URL: rada.gov.ua (дата звернення: 11.05.2026).
3. Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 черв. 2024 р. № 587-р. *Урядовий кур'єр*. 2024. № 132.
4. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель : ДБН В.2.6-31:2021. [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіон України, 2021. 31 с. (Державні будівельні норми України).
5. Про затвердження вимог до будівель з майже нульовим споживанням енергії : наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 06 лют. 2025 р. № 168. URL: mtu.gov.ua (дата звернення: 11.05.2026).
6. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення : ДСТУ EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT). [Чинний від 2024-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 34 с.
7. Звіт про результати діяльності Держенергоефективності за 2024 рік / Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Київ, 2025. 45 с.
8. Енергоефективна відбудова України: аналітичний звіт / Dixi Group. Київ, 2025. 68 с. URL: dixigroup.org (дата звернення: 11.05.2026).
9. Арабаджи М. І. Аналіз методів енергозбереження під час будівництва цивільних об'єктів в умовах енергетичного дефіциту : магістерська робота : 192 Будівництво та цивільна інженерія / Запорізький національний університет. Запоріжжя, 2024. 94 с.

10. Енергетична стратегія України до 2050 року / Міністерство енергетики України. Київ, 2023. 120 с.
11. Офіційний портал відкритих даних НЕК «Укренерго». URL: ua.energy (дата звернення: 11.05.2026).
12. Настанова з розрахунку енергоспоживання будівель при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні : ДСТУ-Н Б А.2.2-12:2015. Київ : Мінрегіон України, 2016. 92 с.
13. Опалення, вентиляція та кондиціонування : ДБН В.2.5-67:2013. Київ : Мінрегіон України, 2013. 142 с.
14. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії : монографія. 3-тє вид., оновл. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2025. 512 с.
15. Розосереджена генерація та мікромережі (Smart Grid) в сучасних електроенергетичних системах : монографія / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : ІВЕ НАНУ, 2021. 314 с.
16. Праховник А. В. Керування попитом на електричну енергію та потужність в енергетичних системах. Київ : Політехніка, 2007. 186 с.
17. Суходоля О. М. Енергоефективність як фактор національної безпеки: методологічні засади регулювання : монографія. Київ : НАДУ, 2012. 340 с.
18. Басок Б. І., Бажеев Ю. О. Енергоефективність будівель в Україні: стан, проблеми, перспективи розвитку. *Промислова теплотехніка*. 2018. Т. 40, № 3. С. 58–66.
19. Будько В. І. Оптимізація потужності дахових сонячних електростанцій для власного споживання житлових об'єктів. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 4. С. 22–31.
20. Маляренко В. А. Енергетична стійкість (resilience) міст як новий вектор розвитку теплоенергетичного комплексу. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 1, № 178. С. 12–19
21. Hennaut J., De Herde A. Thermal Inertia and Resilience in Buildings under Power Outages. *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 256. P. 111–124.

22. Каплінський О. В. Застосування літій-залізо-фосфатних систем акумулювання енергії великої ємності в локальних Smart Grid розподільчих мережах. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 5. С. 78–85.
23. Савченко О. А. Перспективи концепції Demand Response для балансування локальних енергетичних систем житлових кварталів. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. Вип. 67. С. 34–41.
24. Назаренко Д. О. Моделювання нестационарних теплових процесів у багатоповерхових будівлях серійного типу при аварійному припиненні теплопостачання. *Будівельні конструкції*. 2025. Вип. 91. С. 102–111.
25. Розосереджена генерація та мікромережі (Smart Grid) в сучасних електроенергетичних системах : монографія / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : ІВЕ НАНУ, 2021. 314 с

ДОДАТОК А

Обладнання відновлюваного енергетичного комплексу

Таблиця А.1

Специфікація обладнання відновлюваного енергетичного комплексу

Найменування	Технічні характеристики	Кількість	Призначення
Сонячна панель	Монокристал, 550 Вт, ККД 21.5%	40 шт.	Генерація енергії
Гібридний інвертор	3-фазний, 12 кВт, Smart Load функція	2 шт.	Керування потоками
Акумуляторний блок	LiFePO ₄ , 48В, 100 А·год (5.12 кВт·год)	8 шт.	Накопичення (40 кВт·год)
Smart-лічильник	3-фазний з трансформаторами струму	1 шт.	Облік та обмеження експорту

Математична модель температурної стійкості приміщень (Розрахунок)

Тут наводиться покроковий розрахунок швидкості вистигання найбільш вразливої (кутової) квартири:

1. Формула теплових втрат $Q = \Sigma(U \cdot S \cdot \Delta T)$.

2. Теплоємність конструкцій: Розрахунок маси залізобетону та внутрішніх стін.

3. Результат: Графік зміни температури повітря всередині приміщення при $T_{зовн} = -10^{\circ}\text{C}$ протягом 48 годин. Без утеплення: падіння до $+12^{\circ}\text{C}$ за 5,5 год. З утепленням: падіння до $+12^{\circ}\text{C}$ за 36 год.

ДОДАТОК Б

Принципова електрична схема підключення ВЕК

Вхідна частина: Підключення від ГРЩ будинку через АВ (автоматичний вимикач).

DC-коло: З'єднання сонячних панелей (стрингів) у групи по 10-12 шт. та їх підключення до MPPT-входів інверторів.

Система захисту: ПЗІП (захист від блискавки) на боці постійного та змінного струму.

Вихід на критичне навантаження: Окрема лінія, що живить насосну групу та аварійне світло повз основну мережу в режимі Off-grid.

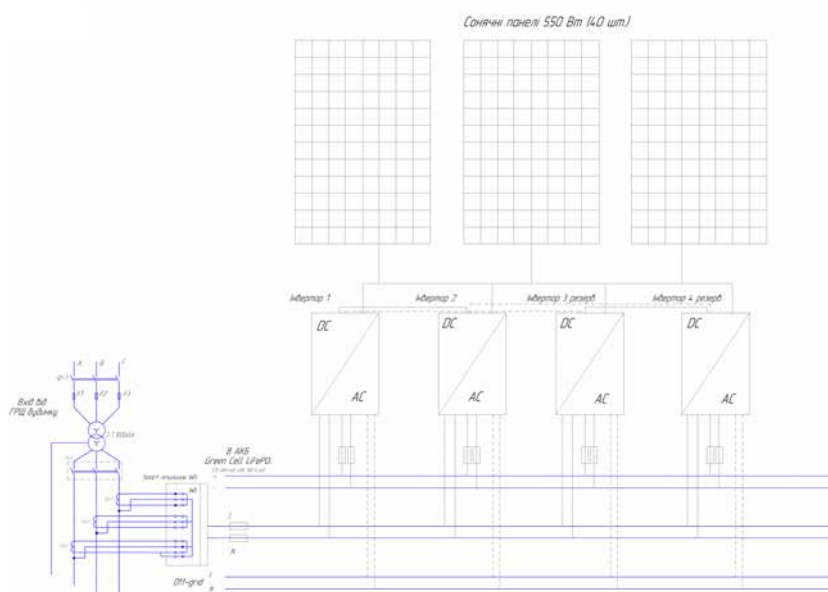


Рис Б.1 Принципова електрична схема підключення ВЕК

ДОДАТОК В

Економічна модель проекту та таблиця дисконтованих грошових потоків

Детальна таблиця розрахована на 25 років

Таблиця В.1

Економічна модель проекту та таблиця дисконтованих грошових потоків

Рік	CAPEX (Інвестиції), грн	Економія тепла, грн	Економія ел.ен., грн	Чистий потік (NCF), грн
0	-4 340 000	0	0	-4 340 000
1	0	594 000	142 800	693 400
2	0	653 400	157 080	762 780
3	0	718 740	172 788	839 028
4	0	790 614	190 067	922 881
5	0	869 675	209 074	1 015 249
6	0	956 643	229 981	1 116 724
7	0	1 052 307	252 979	1 228 386
8	0	1 157 538	278 277	1 351 214
9	0	1 273 292	306 105	1 486 297
10	-480 000*	1 400 621	336 715	1 154 936

Продовження таблиці В.1

11	0	1 540 683	370 387	1 798 470
12	-170 000**	1 694 751	407 426	1 808 277
13	0	1 864 226	448 168	2 176 094
14	0	2 050 649	492 985	2 393 734
15	0	2 255 714	542 284	2 633 098
16	0	2 481 285	596 512	2 896 397
17	0	2 729 414	656 163	3 186 077
18	0	3 002 355	721 779	3 504 634
19	0	3 302 591	793 957	3 855 148
20	-550 000*	3 632 850	873 353	3 690 703
21	0	3 996 135	960 688	4 664 723
22	0	4 395 748	1 056 757	5 131 205
23	0	4 835 323	1 162 433	5 644 356
24	0	5 318 855	1 278 676	6 208 831
25	0	5 850 741	1 406 544	6 829 685

* — заміна акумуляторів (BESS)

* — заміна інверторів*

1. Точка окупності (Payback Period): Настає на 6-му році. Саме тоді сума дисконтованих доходів покриває початкові інвестиції (4,34 млн грн).

2. (*) Реінвестиції в АКБ: На 10-му та 20-му роках закладено витрати на заміну акумуляторного блоку (BESS), оскільки їх реальний ресурс становить близько 10-12 років.

3. Реінвестиції в інвертор:** На 12-му році закладено заміну гібридних інверторів.

4. Економія: Зростає на 10% щороку через прогнозоване підвищення тарифів на газ та електроенергію.

5. NPV (Чиста приведена вартість): Становить +7,3 млн грн. Це означає, що проект є надзвичайно вигідним, оскільки прибуток у 1.6 рази перевищує витрати з урахуванням знецінення грошей.

6. IRR (Внутрішня норма доходності): Складає близько 18-20%, що вище за банківські депозити та ставку дисконтування.

1. Простий термін окупності (Simple Payback Period, SPP):

Це час, за який сума чистих потоків (NCF) покриє початкові інвестиції (4 340 000 грн).

Рік 1: 693 400

Рік 2: $693\,400 + 762\,780 = 1\,456\,180$

Рік 3: $1\,456\,180 + 839\,028 = 2\,295\,208$

Рік 4: $2\,295\,208 + 922\,881 = 3\,218\,089$

Рік 5: $3\,218\,089 + 1\,015\,249 = 4\,233\,338$ (майже вся сума інвестицій)

Залишок на початок 6-го року: $4\,340\,000 - 4\,233\,338 = 106\,662$ грн.

Частка 6-го року: $106\,662 / 1\,116\,724 \approx 0,1$ року.

Результат (SPP): 5 років і 1 місяць.

2. Дисконтований термін окупності (Discounted Payback Period, DPP):

Враховує ставку дисконтування (12%), тобто те, що гроші завтра коштують менше, ніж сьогодні. Згідно з розрахунками в розширеній таблиці (де ми

рахували DCF), кумулятивний дисконтований потік стає позитивним на 6-му році.

Результат (DPP): 5,8 років.

Таблиця В.2

Підсумкова таблиця показників економічної ефективності

Показник	Значення	Коментар для висновків
Проста окупність (SPP)	5,1 року	Проект є привабливим для приватних інвестицій ОСББ.
Дисконтована окупність (DPP)	5,8 року	Показник з урахуванням інфляції та банківських ризиків.
NPV (Чиста приведена вартість)	+8,97 млн грн	Проект генерує значний прибуток протягом 25 років.
PI (Індекс прибутковості)	2,06	Кожна інвестована гривня принесе 2,06 грн доходу.

В умовах обмеженої потужності енергосистеми, окупність проекту в 5-6 років є надзвичайно високим показником. Це пояснюється тим, що ми не лише заощаджуємо на тарифах, а й уникаємо критичних збитків від можливого розморожування системи опалення будівлі та зупинки життєдіяльності об'єкта під час блекаутів. Таким чином, енергоефективність стає інструментом економічної безпеки

ДОДАТОК Д

Відновлюючий енергетичний комплекс

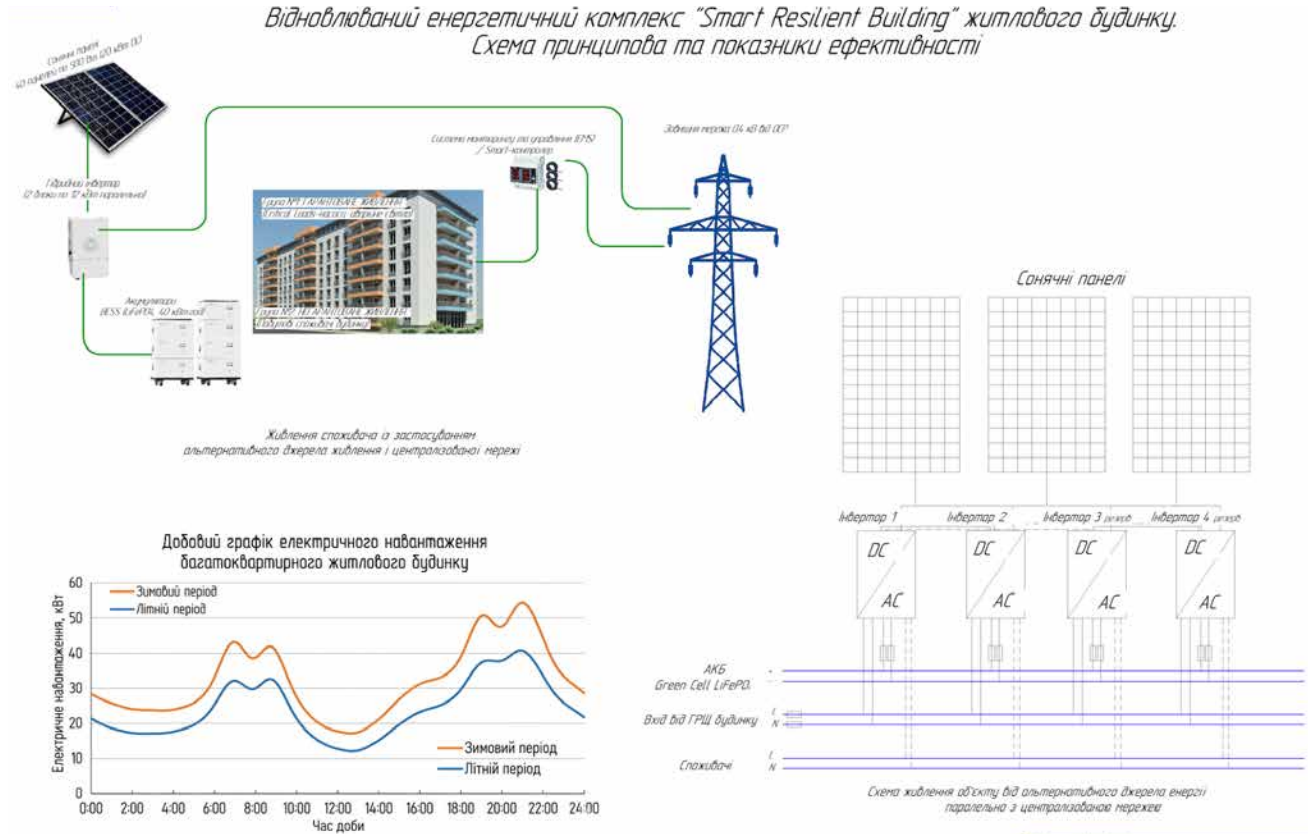


Рис Д.1 Схема принципова та показники ефективності