Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“___“ _____2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Методика будівництва та енергозабезпечення будинків з нульовим споживанням енергії Methods for construction and energy supply of zero-energy buildings»

Виконав здобувач вищої освіти
ІІ курсу магістратури, групи ЕНМ-24М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____ Михайло МОСКАЛЕНКО
«____»_____2025 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____ Олександр СІРІКОВ
«_____»_____2025 р.

Рецензент _____
_____

м. Кропивницький, 2025

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *будівництва, транспорту та енергетики*
Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*
Галузь знань *14 «Електрична інженерія»*
Спеціальність
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма
Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри
_____ Петро ПЛЄШКОВ
«_____»_____2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Москаленко Михайла Олександровича
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи *Методика будівництва та енергозабезпечення будинків з нульовим споживанням енергії*
Methods for construction and energy supply of zero-energy buildings

2. Керівник роботи *Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту *08.12.2025 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи *Метою роботи є аналіз методики будівництва та енергозабезпечення будинків з нульовим споживанням енергії. Завдання роботи: теоретичні основи будинків з нульовим споживанням енергії; енергозабезпечення та комплексне використання ВДЕ в будинках з нульовим споживанням енергії; методика будівництва будинків з нульовим споживанням енергії; практична частина: проєкт будинку з нульовим енергоспоживанням; охорона праці.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	*к.т.н., доц. Савеленко І.В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*10.10.25*	
2	*Теоретичні основи будинків з нульовим споживанням енергії*	*17.10.25*	
3	*Енергозабезпечення та комплексне використання ВДЕ в будинках з нульовим споживанням енергії*	*24.10.25*	
4	*Методика будівництва будинків з нульовим споживанням енергії*	*31.10.25*	
5	*Практична частина: проєкт будинку з нульовим енергоспоживанням*	*14.11.25*	
6	*Охорона праці*	*21.11.25*	
7	*Висновки*	*28.11.25*	
8	*Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї*	*08.12.25*	

Дата видачі завдання
«____» _____ 2025 р.
Підпис керівника
_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання
«____» _____ 2025 р.
Підпис здобувача
_____ Москаленко М. О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Москаленко М. О. Методика будівництва та енергозабезпечення будинків з нульовим споживанням енергії.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025.

Магістерська робота присвячена розробленню методики проєктування, будівництва та енергозабезпечення житлових будинків з нульовим або близьким до нульового рівнем споживання енергії в кліматичних умовах центральної частини України. В роботі проаналізовано сучасні підходи до класифікації NZEB, міжнародні та національні нормативні вимоги, фізичні основи енергоефективності будівель, а також принципи пасивного та активного енергозбереження.

Розглянута методика інтегрованого поєднання архітектурно-конструктивних рішень, теплоізоляційних огороджувальних конструкцій, інженерних систем та відновлюваних джерел енергії для досягнення критеріїв NZEB. Запропоновано послідовність кроків «зменшення – оптимізація – генерація», що передбачає мінімізацію тепловтрат, вибір високоефективних систем опалення, вентиляції з рекуперацією і кондиціонування, а також проєктування комплексу ФЕС, теплового насоса та системи акумуляції.

У практичній частині виконано повний цикл розрахунків для умовного двоповерхового житлового будинку: обґрунтовано архітектурно-планувальні рішення, визначено оптимальні товщини утеплення огороджувальних конструкцій, розраховано параметри теплового насоса «повітря–вода», вентиляції з рекуперацією тепла, фотоелектричної станції потужністю близько 6,5 кВт та акумулятора ємністю 16–20 кВт·год. Побудовано річний енергетичний баланс будівлі.

Ключові слова: будинок з нульовим споживанням енергії, енергоефективність, тепловий насос, фотоелектрична станція, рекуперація тепла, теплоізоляція, енергетичний баланс.

ABSTRACT

Moskalenko M. O. Methods for construction and energy supply of zero-energy buildings.

Qualification work for the second (master's) level of higher education in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics», educational and professional program «Energy Management», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The master's thesis is devoted to the development of a methodology for the design, construction and energy supply of residential buildings with zero or close to zero energy consumption in the climatic conditions of the central part of Ukraine. The work analyzes modern approaches to the NZEB classification, international and national regulatory requirements, the physical foundations of energy efficiency of buildings, as well as the principles of passive and active energy saving.

The methodology for an integrated combination of architectural and structural solutions, thermal insulation enclosing structures, engineering systems and renewable energy sources to achieve NZEB criteria is considered. The sequence of steps "reduction - optimization - generation" is proposed, which involves minimizing heat loss, choosing highly efficient heating, ventilation with recovery and air conditioning systems, as well as designing a photovoltaic complex, a heat pump and an accumulation system.

In the practical part, a full cycle of calculations was performed for a conventional two-story residential building: architectural and planning solutions were substantiated, optimal insulation thicknesses of enclosing structures were determined, parameters of an air-to-water heat pump, ventilation with heat recovery, a photovoltaic plant with a capacity of about 6.5 kW and a battery with a capacity of 16–20 kWh were calculated. An annual energy balance of the building was constructed.

Key words: zero-energy house, energy efficiency, heat pump, photovoltaic plant, heat recovery, thermal insulation, energy balance.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БУДИНКІВ З НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ 10
1.1. Поняття та класифікація будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB) 10
1.2. Міжнародні стандарти й нормативні вимоги (EU NZEB, Passivhaus, LEED, BREEAM) 13
1.3. Фізичні основи енергоефективності будівель 17
1.4. Теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій 21
1.5. Технології мінімізації енергоспоживання на етапі експлуатації 24
1.6. Висновки до розділу 26
РОЗДІЛ 2 ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВДЕ В БУДИНКАХ З НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ 27
2.1. Загальні принципи проєктування енергетичних систем у NZEB 27
2.2. Сонячна енергетика: фотоелектричні системи та сонячні колектори 30
2.3. Вітрові та геотермальні системи для індивідуальної забудови 33
2.4. Теплові насоси: типи, режими роботи, ефективність 36
2.5. Системи акумуляції енергії (електричні, теплові, гібридні) 39
2.6. Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням 43
2.7. Висновки до розділу 46
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА БУДІВНИЦТВА БУДИНКІВ З НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ 48
3.1. Планувальні рішення та архітектурно-конструктивні підходи 48
3.2. Пасивні методи енергозбереження 53
3.3. Теплоізоляційні матеріали та багатошарові огороджувальні конструкції 58
3.5. Висновки до розділу 70
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА: ПРОЄКТ БУДИНКУ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ 71
4.1. Характеристика об’єкта та вихідних даних 71

4.2. Обґрунтування архітектурних рішень 76
4.3. Розрахунок оптимальної товщини утеплення 80
4.4. Вибір та розрахунок системи опалення, вентиляції і кондиціонування .. 87
4.5. Розрахунок фотоелектричної станції і акумуляції 94
4.6. Баланс енергії будинку протягом року 99
4.7. Висновки до розділу 104
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ 106
5.1. Загальна характеристика робіт з монтажу ФЕС і АКБ у NZEB 106
5.2. Небезпечні фактори при роботах на висоті та монтажі модулів ФЕС ... 108
5.3. Електротехнічні небезпеки при монтажі ФЕС та АКБ 108
5.4. Фізичні, хімічні та ергономічні шкідливі фактори 110
5.5. Висновки до розділу 111
ВИСНОВКИ 113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 116

ВСТУП

Сучасний етап розвитку енергетики та будівництва характеризується зростанням вартості енергоресурсів, посиленням вимог до енергетичної безпеки держави та необхідністю зниження викидів парникових газів. Значну частку кінцевого енергоспоживання в Україні становлять житлові будівлі, більшість з яких зведені без урахування принципів енергоефективності. У таких умовах особливої актуальності набуває концепція будинків з нульовим або майже нульовим споживанням енергії (NZEB), які поєднують високий рівень теплотехнічних характеристик, застосування відновлюваних джерел енергії та сучасних систем керування енергоспоживанням.

Запровадження в Україні європейських підходів до енергетичної сертифікації будівель, національних планів з підвищення енергоефективності та вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії ставить перед проєктувальниками, забудовниками і споживачами завдання переходу від поодиноких демонстраційних об’єктів до системних рішень. Водночас, на практиці залишається багато невирішених питань, пов’язаних із адаптацією міжнародних стандартів до кліматичних, економічних та нормативних умов України, а також з вибором оптимальних технічних рішень для конкретних типів житлових будинків.

Особливе значення має сегмент індивідуальної житлової забудови, де рішення щодо теплозахисних характеристик огороджувальних конструкцій, систем опалення, вентиляції, кондиціонування, а також конфігурації фотоелектричних установок та акумуляції енергії приймаються на рівні окремого домогосподарства. Помилки на етапі проєкту призводять до завищених інвестиційних витрат або до незадовільної енергетичної поведінки будівлі протягом десятиліть експлуатації. Тому розроблення цілісної методики будівництва та енергозабезпечення NZEB, орієнтованої на реальні умови центральної частини України, є важливим науково-практичним завданням.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз методики будівництва та енергозабезпечення будинків з нульовим споживанням енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

– теоретично обґрунтувати концепцію будинків з нульовим та майже нульовим споживанням енергії (NZEB);

– розробити та обґрунтувати концепцію енергетичної системи NZEB;

– розробити методику архітектурно-конструктивного та теплотехнічного проєктування NZEB;

– реалізувати запропоновану методику на прикладі конкретного двоповерхового житлового будинку.

Об’єкт дослідження проєктування, будівництво та енергозабезпечення житлового будинку з нульовим (або близьким до нульового) річним споживанням енергії в кліматичних умовах України.

Предмет дослідження методика інтегрованого поєднання архітектурно-конструктивних рішень, теплоізоляційних огороджувальних конструкцій, інженерних систем та відновлюваних джерел енергії з метою досягнення нульового річного енергоспоживання житлового будинку.

У роботі застосовано комплекс теоретичних і практичних методів: аналіз нормативних документів та міжнародних стандартів, математичне моделювання теплопередачі та енергобалансу, інженерні розрахунки теплових втрат і теплових надходжень, методи техніко-економічного порівняння варіантів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені підходи можуть бути використані при проєктуванні і реконструкції індивідуальних житлових будинків, при підготовці енергетичних сертифікатів та в навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі енергоефективного та «зеленого» будівництва.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БУДИНКІВ З НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ

1.1. Поняття та класифікація будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB)

Будинки з нульовим споживанням енергії (NZEB, Nearly/Net Zero Energy Buildings) становлять новий етап розвитку енергоефективного будівництва, спрямований на суттєве зниження екологічного навантаження та оптимізацію енергоресурсів у житловому і громадському секторі. Основною особливістю NZEB є забезпечення балансу між річним споживанням енергії та її виробництвом з відновлюваних джерел на рівні окремої будівлі або її найближчої інфраструктури. Такий будинок має мінімальні тепловтрати, використовує високоефективні інженерні системи та оснащений комплексом технологій генерації енергії, що дозволяє досягти майже нульового або нульового енергетичного балансу.

Концепція NZEB сформувалася у відповідь на глобальні виклики, пов’язані з енергетичною безпекою, змінами клімату та необхідністю декарбонізації будівельного сектору. У Європейському Союзі вимога будувати нові будівлі за стандартами NZEB закріплена у Директиві 2010/31/ЄС, згідно з якою усі нові об’єкти після 2021 року мають відповідати підвищеним показникам енергоефективності та використовувати значну частку енергії з відновлюваних джерел. Подібні підходи підтримуються у США, Канаді, Японії та інших країнах, що розробили власні методики оцінювання таких будівель.

У більшості міжнародних стандартів NZEB визначається як будівля, що:

– характеризується дуже низьким рівнем енергоспоживання завдяки пасивним і активним методам енергозбереження;

– забезпечує значну частину своїх енергетичних потреб за рахунок відновлюваних джерел енергії, розташованих на території або поблизу об’єкта;

– досягає річного балансу спожитої та виробленої енергії, що може бути близьким до нуля або нульовим.

Наявність власних джерел ВДЕ (сонячних панелей, теплових насосів, вітрових турбін тощо) дає змогу будинку працювати автономно або з мінімальною залежністю від зовнішніх мереж. У разі підключення до мережі будівля може передавати надлишки електроенергії, компенсуючи споживання у періоди дефіциту.

У практичному застосуванні розрізняють два підходи до «нульовості»:

– «енергетичний нуль» – рівність обсягів споживання та генерації енергії протягом року;

– «вуглецевий нуль» – мінімізація викидів CO_2 протягом життєвого циклу будівлі.

Сучасні проєкти NZEB дедалі частіше орієнтовані саме на другий підхід, що відповідає світовим трендам декарбонізації.

Класифікація будинків з нульовим споживанням енергії.

Будинки з нульовим енергоспоживанням класифікують за різними ознаками залежно від типу енергетичного балансу, джерел генерації, конструктивних особливостей та методів досягнення енергоефективності. Найпоширеніші класифікації наведені нижче.

1. За енергетичним балансом.

а) Будинки з чистим нульовим споживанням енергії (Net Zero Energy Building). Річна генерація відновлюваної енергії повністю покриває річне споживання. Можливий обмін енергією з мережею.

б) Будинки з майже нульовим споживанням енергії (Nearly Zero Energy Building). Споживання енергії істотно менше за традиційні будівлі, а частина потреб забезпечується ВДЕ, але баланс не досягає абсолютного нуля.

в) Будинки з позитивним енергобалансом (Plus Energy Buildings). Генерують енергії більше, ніж споживають; надлишки передаються у мережу або використовуються для сусідньої інфраструктури.

2. За джерелами відновлюваної енергії.

– Сонячні NZEB – переважне використання фотоелектричних систем та сонячних колекторів.

– Геотермальні NZEB – застосування теплових насосів із геотермальними зондами.

– Вітрові NZEB – наявність малих вітрогенераторів у приватних домогосподарствах.

– Гібридні NZEB – поєднання декількох джерел (PV + теплонасос + акумуляція).

3. За ступенем автономності

1. Автономні (off-grid) – будинок повністю незалежний від зовнішніх електромереж, має систему акумуляції достатньої ємності.

2. Мережеві (on-grid) – підключені до мережі, але мають власні системи генерації; надлишкова енергія може експортуватися.

3. Гібридні – здатні працювати як автономно, так і в мережевому режимі, залежно від умов.

4. За конструктивною концепцією

– Пасивні будинки (Passive House) – основний акцент на мінімізації тепловтрат і вентиляції з рекуперацією; генерація енергії відіграє допоміжну роль.

– Активні будинки (Active House) – інноваційні системи управління, високий рівень автоматизації, активна генерація енергії.

– Біопозитивні будинки – використання екологічних матеріалів, озеленення, систем відновлення ресурсів (дощова вода, природна вентиляція).

5. За призначенням

– житлові (одноквартирні, багатоквартирні),

– громадські (офіси, освітні установи, лікарні),

– промислові та складські,

– комерційні (торговельні центри, готелі).

Будинки з нульовим споживанням енергії формують нову парадигму у будівництві, спрямовану на мінімізацію енергоспоживання та максимальне використання ВДЕ. Класифікація NZEB включає енергетичні, технологічні та конструктивні аспекти, що дозволяє адаптувати концепцію до різних кліматичних і економічних умов. Чітке розуміння їх типів і характеристик є основою для подальшого проєктування та оптимізації енергетичних систем.

1.2. Міжнародні стандарти й нормативні вимоги (EU NZEB, Passivhaus, LEED, BREEAM)

Розвиток концепції будівель з нульовим або майже нульовим енергоспоживанням неможливий без чіткої системи регламентів, стандартів і нормативних вимог, які визначають мінімальні характеристики енергоефективності, екологічності та якості будівництва. На міжнародному рівні сформувався комплекс підходів, що охоплюють як суто енергетичні параметри, так і ширші аспекти сталого розвитку. Серед ключових систем виділяються: стандарти Європейського Союзу (EU NZEB), німецький стандарт Passivhaus, а також міжнародні системи екологічної сертифікації будівель – LEED та BREEAM.

Стандарти Європейського Союзу (EU NZEB)

У Європейському Союзі поняття NZEB визначено Директивою 2010/31/ЄС щодо енергетичної ефективності будівель (EPBD) та оновленою редакцією 2018/844/ЄС. Згідно з цими документами, NZEB – це будівля з дуже низьким рівнем енергоспоживання, де значна частина потреб покривається за рахунок енергії з відновлюваних джерел, що виробляються на місці або поблизу.

Визначення NZEB у ЄС не є абсолютно уніфікованим: кожна країна має право встановлювати власні показники відповідно до кліматичних умов. Проте загальні вимоги включають:

– мінімізоване первинне енергоспоживання, яке не перевищує нормативно встановлених меж (зазвичай 40–90 кВт·год/м²·рік);

– високу теплоізоляцію огороджувальних конструкцій (U ≤ 0,15–0,20 Вт/(м²·К));

– герметичність оболонки будівлі, перевірену тестом BlowerDoor;

– вентиляцію з рекуперацією тепла, що зменшує втрати енергії;

– використання ВДЕ, таких як сонячні панелі, теплові насоси, біоенергетичні установки.

З 2021 року всі нові будівлі на території ЄС повинні відповідати стандартам NZEB, а державні будівлі – ще з 2019 року. У майбутньому очікується перехід до концепції «Zero Emission Building», де акцент зміщується не тільки на енергію, а й на декарбонізацію.

Стандарт Passivhaus

Німецький стандарт «Passivhaus» є одним із найбільш вимогливих та однозначно визначених підходів до енергоефективного будівництва. Його головною метою є мінімізація потреби у тепловій енергії до рівня, за якого традиційні системи опалення практично не потрібні.

Основні критерії стандарту Passivhaus:

1. Питомі тепловтрати на опалення ≤ 15 кВт·год/м²·рік.

2. Первинне енергоспоживання ≤ 120 кВт·год/м²·рік.

3. Герметичність оболонки $n_{50} \leq 0{,}6$ год$^{-1}$, перевірена тестом надлишкового тиску.

4. Коефіцієнт теплопередачі U огороджувальних конструкцій – не більше 0,10–0,15 Вт/(м²·К).

5. Ефективна вентиляція з рекуперацією тепла (ККД рекуператора ≥ 75 %).

На відміну від стандартів NZEB, Passivhaus не акцентує увагу на обов’язковій генерації енергії з відновлюваних джерел. Проте досягнення вищевказаних показників робить будинок надзвичайно економним, і для доведення його до NZEB достатньо встановити мінімальні системи ВДЕ.

Стандарт має декілька модифікацій:

– Classic базовий клас пасивного будинку;

– Plus будинок виробляє частину енергії;

– Premium будинок із значним надлишком генерації.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

Система LEED – міжнародний стандарт екологічної сертифікації будівель, розроблений Американською радою з «зеленого» будівництва (USGBC). Вона охоплює широкий спектр характеристик: енергоспоживання, водокористування, екологічність матеріалів, якість внутрішнього середовища тощо. LEED не є суто стандартом NZEB, але дає можливість оцінити ступінь сталості та енергоефективності будівлі.

Будівлі отримують сертифікат у чотирьох рівнях залежно від кількості балів: Certified, Silver, Gold, Platinum.

Основні критерії, що стосуються енергетики:

– зменшення енергоспоживання на 20–40 % порівняно з базовим рівнем;

– застосування ВДЕ при проектній потужності від 3–10 % і більше;

– оптимізація систем HVAC, використання високоефективного обладнання;

– інтеграція систем автоматичного керування та енергомоніторингу;

– мінімізація вуглецевих викидів.

LEED широко застосовується у США, Канаді, країнах Азії, ЄС, а також у великих проєктах комерційного будівництва.

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

BREEAM – британська система екологічної оцінки будівель, яка є однією з найстаріших у світі. Як і LEED, вона не визначає NZEB безпосередньо, але встановлює вимоги до енергоефективності, управління ресурсами та екологічності. BREEAM оцінює будівлю за низкою критеріїв: енергоефективність, управління будівництвом, здоров'я та комфорт мешканців, транспортна доступність, матеріали, водні ресурси, відходи, інновації.

Рівні сертифікації: Pass, Good, Very Good, Excellent, Outstanding.

У сфері енергетики BREEAM передбачає:

– розрахунок рівня CO_2-викидів, пов'язаних з експлуатацією будівлі;

– впровадження високоефективних систем енергопостачання;

– використання ВДЕ та технологій низьковуглецевого виробництва енергії;

– наявність систем моніторингу споживання.

На відміну від Passivhaus, BREEAM враховує не тільки енергетичну частину, але й середовище, транспорт, міські умови, що робить його комплексним стандартом суспільного сталого розвитку.

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика стандартів для будинків з нульовим споживанням енергії

Параметр	**EU NZEB**	**Passivhaus**	**LEED**	**BREEAM**
Основна мета	Майже нульове річне споживання енергії	Максимальне зниження тепловтрат	Екологічність та сталий розвиток	Комплексна екологічність
Обов'язковість	Регламент ЄС	Добровільний	Добровільний	Добровільний
Акцент	ВДЕ + інвестиції в ефективність	Пасивна енергоефективність	Менеджмент ресурсів	Комплексна сталість
Генерація ВДЕ	Обов'язкова	Не обов'язкова	Бажана	Бажана
Енергоефективність	Висока	Дуже висока	Середня–висока	Середня–висока

Міжнародні стандарти у сфері енергоефективного будівництва формують методологічну основу для розвитку NZEB у різних регіонах світу. EU NZEB встановлює нормативні вимоги, обов’язкові для країн ЄС, тоді як Passivhaus визначає найвищі технічні критерії ефективності оболонки будівлі. Системи LEED та BREEAM спрямовані на комплексну оцінку сталості, включно з енергоспоживанням. Синтез положень цих стандартів дає можливість розробляти високоефективні, екологічні та економічно доцільні будинки нового покоління.

1.3. Фізичні основи енергоефективності будівель

Енергоефективність будівель базується на комплексі фізичних процесів, що визначають тепловий стан внутрішнього середовища, величину тепловтрат та потреби в енергії для опалення, охолодження, вентиляції й освітлення. Розуміння цих процесів є ключовим при проєктуванні будинків з нульовим або майже нульовим споживанням енергії, оскільки дає можливість підвищити термічний опір огороджувальних конструкцій, оптимізувати роботу інженерних систем та забезпечити комфортні умови для користувачів із мінімальними енергетичними витратами.

1.3.1. Теплопередача в огороджувальних конструкціях

Основним фізичним механізмом втрати теплової енергії будівлею є теплопередача, яка включає три процеси: теплопровідність, конвекцію та теплове випромінювання.

1. Теплопровідність. Теплопровідність – це передавання тепла через матеріали огороджувальних конструкцій (стіни, покрівлі, підлоги, вікна). Кількісно теплопровідність описується законом Фур'є:

$$q = \lambda \cdot \Delta T / \delta, \tag{1.1}$$

де q – щільність теплового потоку;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

ΔT – різниця температур;

δ – товщина шару.

Чим менше значення λ, тим кращі теплоізоляційні властивості матеріалу. Ефективні теплоізолятори мають значення (λ = 0,030–0,045 Вт/(м·К)), що у 20–30 разів нижче за бетон або цеглу.

2. Конвекція. Конвекція виникає в повітрі, яке контактує з поверхнями огороджувальних конструкцій. Наявність щілин, негерметичностей, порушеної паро- чи гідроізоляції значно збільшує конвективні втрати. Для NZEB важливим є показник повітропроникності, що контролюється тестом BlowerDoor.

3. Теплове випромінювання. Теплове випромінювання відбувається між поверхнями з різними температурами. Вікна є найвразливішим елементом, тому застосовують низькоемісійні покриття, які зменшують втрати за рахунок відбиття інфрачервоного теплового випромінювання.

1.3.2. Загальний коефіцієнт теплопередачі U

Теплотехнічна якість огороджувальної конструкції визначається коефіцієнтом теплопередачі:

$$U = 1/R_{sum}, \tag{1.2}$$

де R_{sum} – сумарний термічний опір усіх шарів конструкції з урахуванням поверхневих опорів.

Чим менше значення U, тим вища енергоефективність конструкції. Сучасні вимоги для NZEB становлять:

- стіни: $U \leq 0{,}15–0{,}20$ Вт/(м²·К);
- дах: $U \leq 0{,}10–0{,}15$ Вт/(м²·К);
- вікна: $U \leq 0{,}80–1{,}00$ Вт/(м²·К).

1.3.3. Повітропроникність і герметичність будівлі

Одним із ключових факторів енергоефективності є герметичність зовнішньої оболонки. Інфільтрація холодного повітря може збільшити тепловтрати до 20–30 %.

Показник герметичності оцінюється коефіцієнтом повітрообміну:

$$n_{50} = V_{50}/V_{буд},$$

де n_{50} – кількість повних обмінів повітря за годину при різниці тисків 50 Па.

Для NZEB вимоги: $n_{50} \leq 0{,}6–1{,}0$ год$^{-1}$.

1.3.4. Теплові мости

Теплові мости – це локальні ділянки конструкції з підвищеним коефіцієнтом теплопередачі, де відбуваються значні втрати тепла. Основні типи:

- геометричні (кути, стики),
- матеріальні (контакт матеріалів із різною теплопровідністю),
- конструктивні (анкерні елементи, перемички).

Теплові мости збільшують тепловтрати на 10–25 %, викликають появу конденсату та плісняви. У будинках з нульовим споживанням енергії їх усунення – обов’язковий елемент проєктування.

1.3.5. Тепловий комфорт та мікроклімат

Тепловий комфорт у приміщенні визначається: температурою повітря; температурою внутрішніх поверхонь; вологістю; швидкістю повітря; інтенсивністю теплового випромінювання. Фізичний базис комфорту описується рівнянням енергетичного балансу людини. Для NZEB типове підтримання:

– температури 20–22 °C взимку,

– 23–26 °C влітку,

– відносної вологості 40–60 %.

Один із ключових параметрів – температура поверхонь, оскільки низькі температури стін створюють дискомфорт навіть за нормальної температури повітря.

1.3.6. Сонячні теплові надходження та інсоляція

Сонячна радіація є одним із основних пасивних джерел тепла в енергоефективних будинках. Рівень теплових надходжень описується формулою:

$$Q_{\text{сол}} = A_{\text{вік}} \cdot g \cdot I, \tag{1.3}$$

де $A_{\text{вік}}$ – площа вікон,

g – коефіцієнт пропускання сонячної енергії,

I – інтенсивність сонячної радіації.

У NZEB будівлі орієнтуються таким чином, щоб максимізувати надходження взимку та мінімізувати перегрівання влітку (завдяки жалюзі, навісам, низькому g-коефіцієнту).

1.3.7. Вентиляція та рекуперація тепла

Система вентиляції відповідає за видалення CO_2, вологи та забруднень. Енерговитрати вентиляції значні, тому в NZEB використовують рекуператори з ККД 75–95 %, які повертають тепло витяжного повітря.

Втрати вентиляції визначаються:

$$Q_{\text{вент}} = c \cdot \rho \cdot L(T_{\text{і}} - T_{\text{о}}), \tag{1.4}$$

де L – повітрообмін,

c – теплоємність повітря,

ρ – густина повітря.

Рекуперація дозволяє зменшити ці втрати у 3–5 разів.

Фізичні основи енергоефективності будівель охоплюють процеси теплопередачі, взаємодії будівлі з навколишнім середовищем та умови мікроклімату. Оптимізація теплопровідності, герметичності, вентиляції та сонячних теплонадходжень дозволяє суттєво зменшити тепловтрати, що є ключовою передумовою створення будинків з нульовим споживанням енергії. Глибоке розуміння цих процесів забезпечує наукове обґрунтування для подальших інженерних рішень у проєктуванні NZEB.

1.4. Теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій

1. Значення теплотехнічних властивостей огороджувальних конструкцій у NZEB.

Огороджувальні конструкції будівлі – стіни, покрівля, перекриття, підлога та віконні системи – відіграють ключову роль у формуванні теплового режиму приміщень та визначають величину тепловтрат. Для будинків із нульовим споживанням енергії (NZEB) їх теплотехнічні характеристики мають бути оптимізовані таким чином, щоб забезпечити мінімальний коефіцієнт теплопередачі, високі показники повітронепроникності, ефективну роботу теплоізоляційного шару та відсутність містків холоду. Саме якість огороджувальних конструкцій визначає, яку частку тепла слід компенсувати інженерними системами й відновлюваними джерелами енергії.

2. Основні параметри теплотехнічної оцінки.

2.1. Коефіцієнт теплопередачі (*U*-value).

Коефіцієнт теплопередачі *U* – це кількість теплової енергії, що проходить через 1 м² огороджувальної конструкції за умови різниці температур у 1 °C (Вт/м²·К).

Чим нижче значення *U*, тим кращі теплоізоляційні властивості конструкції. Основні нормативи для NZEB за європейськими рекомендаціями:

- стіни: $U \leq 0{,}12–0{,}18$ Вт/(м²·К);

- покрівля: $U \leq 0{,}10–0{,}15$ Вт/(м²·К);

- підлога: $U \leq 0{,}15–0{,}20$ Вт/(м²·К);

- вікна: $U \leq$ 0,80–1,00 Вт/(м²·К) (трипакети).

Для України норми ДБН В.2.6-31 передбачають схожі або дещо вищі вимоги, залежно від кліматичного району.

2.2. Тепловий опір конструкції (*R*-value).

Тепловий опір (*R*) є оберненою величиною коефіцієнта теплопередачі:

$$R = 1/U. \quad (1.5)$$

Він характеризує здатність матеріалу чи конструкції протидіяти тепловому потоку. Для забезпечення критеріїв NZEB тепловий опір огороджувальних конструкцій повинен бути достатньо високим, що досягається завдяки використанню товстих шарів утеплювача з низькою теплопровідністю.

2.3. Теплопровідність матеріалів (λ-value).

Показник теплопровідності λ залежить від фізичної природи матеріалу. Типові значення:

- мінеральна вата: 0,033–0,040 Вт/(м·К);

- пінополіуретан (ППУ): 0,022–0,028 Вт/(м·К);

- газобетон: 0,10–0,18 Вт/(м·К);

- цегла: 0,56–0,80 Вт/(м·К).

Чим нижче λ тим вищі теплоізоляційні властивості матеріалу.

3. Теплоізоляція та конструктивні рішення.

3.1. Оптимальна товщина теплоізоляційного шару.

Досягнення NZEB передбачає застосування значно більшої товщини теплоізоляції порівняно з будівлями попередніх поколінь. Типові значення:

- стіни: 200–350 мм;

- покрівля: 250–400 мм;

- підлога: 150–250 мм.

3.2. Усунення містків холоду.

Містки холоду виникають у зонах конструкційних стиків, кріплень, армування, перемичок та вузлів «стіна–дах–фундамент». Їх необхідно мінімізувати для забезпечення стабільного теплового контуру. Основні рішення: використання термовставок; ізоляція бетонних елементів; безперервний тепловий контур; винесення точок кріплення у теплу зону; застосування теплих профілів у вікнах і дверях.

3.3. Паро- та вітрозахист.

У конструкціях NZEB важливим є контроль вологи:

- паронепроникний шар – з внутрішнього боку утеплювача;
- вітрозахисна мембрана – з зовнішнього боку.

Це мінімізує ризик конденсації, покращує повітронепроникність і забезпечує довговічність теплоізоляційних матеріалів.

4. Повітронепроникність огороджувальних конструкцій.

Висока герметичність – один із ключових критеріїв будівель класу NZEB та пасивних будинків. Основний індикатор:

$$n_{50} \leq 0{,}6 \text{ раз/год},$$

де n_{50} – об’ємний повітрообмін при різниці тиску 50 Па (тест Blower Door).

5. Віконні та світлопрозорі конструкції.

Вікна становлять одну з найменш енергоефективних частин огороджувальних конструкцій. Тому в NZEB використовують:

- трипакетні склопакети з коефіцієнтом теплопередачі $U_{\text{window}} \leq 0{,}80$–$1{,}00$ Вт/м^{2}К;
- теплі рамні профілі з коефіцієнтом $U_{\text{frame}} \leq 0{,}90$–$1{,}20$, Вт/м^{2}К;
- напилення низькоемісійних (Low-E) покриттів;
- газонаповнення камер аргоном або криптоном;

- оптимальну орієнтацію на південь для максимального пасивного сонячного тепла;

- зовнішнє сонцезахистне обладнання для уникнення перегріву влітку.

6. Теплотехнічні вузли та їх моделювання.

Для NZEB обов’язковим є комп’ютерне моделювання конструктивних вузлів у спеціальних програмах: THERM, WUFI, DesignBuilder, PHPP.

Моделювання дає змогу оцінити:

- розподіл температур у конструкції;

- ризик утворення конденсату;

- теплові втрати через містки холоду;

- відповідність нормативним вимогам.

Це дозволяє оптимізувати проєкт ще до початку будівництва.

1. Теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій є визначальним фактором енергетичної ефективності будівель NZEB.

2. Низькі значення коефіцієнта теплопередачі та високий тепловий опір досягаються завдяки використанню якісної теплоізоляції та сучасних матеріалів.

3. Усунення містків холоду, контроль вологи та високий рівень повітронепроникності є обов’язковими умовами при проектуванні огороджувальних конструкцій.

4. Світлопрозорі конструкції мають суттєвий вплив на тепловий баланс будівлі й повинні відповідати підвищеним вимогам NZEB.

5. Моделювання теплотехнічних процесів дозволяє коректно оцінити ефективність рішень та забезпечити дотримання стандартів енергоефективності.

1.5. Технології мінімізації енергоспоживання на етапі експлуатації

Пасивні технології енергозбереження.

Пасивні рішення забезпечують зниження потреби у механічних системах опалення, вентиляції та кондиціонування.

Основні пасивні технології:

- Оптимальна орієнтація будинку (південна експозиція для зимового прогріву).

- Висока теплоізоляція та низький U-value всіх огороджувальних конструкцій.

- Герметичний контур будівлі із мінімальним повітрообміном при тиску 50 Па.

- Сонцезахист (жалюзі, маркізи, зовнішні ролети) для запобігання перегріву влітку.

- Теплові буфери (енергетичні тамбури, зелені дахи, зимові сади).

Енергоефективні системи опалення, вентиляції та кондиціонування.

Інноваційні технології:

- Вентиляція з рекуперацією тепла (ККД 85–95%).

- Теплові насоси «повітря–вода», «ґрунт–вода» для опалення та ГВП.

- Системи пасивного охолодження (ґрунтові теплообмінники, нічне провітрювання).

- Системи автоматичного балансування тепла у приміщеннях.

Високоефективне освітлення та електрообладнання.

Енергоефективні технології включають:

- світлодіодне (LED) освітлення з ККД понад 100–150 лм/Вт;

- датчики руху та освітленості;

- інтелектуальні системи керування освітленням;

- прилади класу енергоефективності A+++.

Автоматизація, «розумний будинок» та системи моніторингу.

Цифрові технології дозволяють мінімізувати енергоспоживання шляхом адаптивного керування параметрами будівлі. Такі системи зменшують споживання електроенергії на 10–25%.

Відновлювані джерела енергії.

Для NZEB характерна максимальна інтеграція ВДЕ:

- сонячні електростанції (1–10 кВт);

- сонячні колектори для ГВП;
- вітрогенератори малої потужності;
- гібридні системи PV + тепловий насос;
- акумулювання енергії у батареях або теплових буферах.

1.6. Висновки до розділу

1. Будинки з нульовим споживанням енергії (NZEB) формують нову парадигму будівництва, в якій поєднуються мінімальне енергоспоживання, широке використання відновлюваних джерел енергії та різні типи енергетичного, технологічного й конструктивного класифікування будівель.

2. Міжнародні стандарти EU NZEB, Passivhaus, LEED і BREEAM створюють нормативно-методичну основу для проєктування високоефективних будівель, поєднуючи вимоги до енергоспоживання, використання ВДЕ й загальної екологічності.

3. Фізичні процеси теплопередачі, повітропроникності, утворення теплових мостів, сонячних теплонадходжень та вентиляції визначають базовий рівень енергоефективності будівлі та мають бути враховані при формуванні мікроклімату й енергобалансу.

4. Теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій (коефіцієнт теплопередачі, тепловий опір, відсутність містків холоду, герметичність і якість світлопрозорих елементів) є визначальним фактором зниження тепловтрат і досягнення вимог NZEB.

5. Обґрунтовано, що поєднання пасивних рішень, енергоефективних систем опалення, вентиляції, кондиціонування й освітлення, автоматизованого керування та інтеграції відновлюваних джерел енергії забезпечує мінімізацію експлуатаційного енергоспоживання будівель.

РОЗДІЛ 2
ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВДЕ В БУДИНКАХ З НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ

2.1. Загальні принципи проєктування енергетичних систем у NZEB

Проєктування енергетичних систем у будинках з нульовим споживанням енергії ґрунтується на комплексному підході, що поєднує архітектурно-планувальні рішення, інженерні системи та відновлювані джерела енергії (ВДЕ) в єдину керовану систему. Метою є забезпечення такого режиму роботи будівлі, за якого річне споживання первинної енергії мінімізується, а залишкова потреба покривається переважно за рахунок місцевих ВДЕ.

Концепція «зменшення – оптимізація – генерація»

Базовим підходом до проєктування енергетичних систем NZEB є послідовність:

1. Зменшення енергопотреб (Reduce)

- максимальне зниження тепловтрат через огороджувальні конструкції;
- забезпечення високої повітронепроникності оболонки будівлі;
- використання пасивних засобів енергозбереження (орієнтація будинку, сонцезахист, природне освітлення);
- мінімізація внутрішніх теплоприпливів від обладнання та освітлення.

2. Оптимізація інженерних систем (Optimize)

- застосування високоефективних систем опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC);
- впровадження вентиляції з рекуперацією тепла, низькотемпературних систем опалення;
- використання енергоощадного обладнання класу A+++;

- впровадження інтелектуальних систем керування енергоспоживанням.

3. Генерація енергії з відновлюваних джерел (Generate)

- покриття залишкової потреби за рахунок фотоелектричних систем, сонячних колекторів, вітрових та геотермальних установок;

- поєднання ВДЕ з системами акумуляції (електричними та тепловими) для вирівнювання добових і сезонних коливань.

Такий підхід дозволяє уникнути завищення потужності обладнання і забезпечує економічно обґрунтований вибір технічних рішень.

Енергетична концепція NZEB має формуватися з урахуванням:

- кліматичних параметрів регіону (розрахункові температури, тривалість опалювального періоду, рівень інсоляції, вітровий режим);

- характеру експлуатації будівлі (житлова, громадська, змінність роботи, щільність заселення);

- локальних обмежень ділянки (затінення, орієнтація, наявність мереж, можливість буріння свердловин тощо).

На основі цих даних виконується енергетичне моделювання будівлі, яке дозволяє оцінити річний баланс енергії, пікові навантаження та доцільність застосування тих чи інших ВДЕ.

Енергетична система NZEB розглядається не ізольовано, а в тісному зв’язку з архітектурою будинку. Ключові принципи:

- єдиний тепловий контур: безперервний шар теплоізоляції та паро-/вітрозахисту, мінімізація теплових містків;

- пасивне використання сонячної енергії: оптимальна площа та орієнтація скління, застосування сонцезахисних пристроїв;

- сумісність з низькотемпературними системами: тепла підлога, стінові/стельові панелі, радіатори з великою поверхнею теплообміну;

- інтеграція інженерних вузлів (тепловий насос, буферні ємності, гідравлічні розподілювачі) в компактні технічні приміщення.

Такий підхід забезпечує узгодженість теплотехнічних та інженерних характеристик будівлі.

Роль систем акумуляції та керування

Для досягнення нульового або близького до нуля енергетичного балансу важливими є:

- електричні накопичувачі (літій-іонні або інші акумуляторні системи), що дозволяють використовувати надлишок генерації фотоелектричних панелей у вечірні та нічні години;

- теплові акумулятори (буферні баки, ємності з фазозмінними матеріалами, ґрунтові сховища), які згладжують нерівномірність роботи теплових насосів та сонячних колекторів;

- інтелектуальні системи керування (EMS, “розумний будинок”), що координують роботу джерел, споживачів та накопичувачів, оптимізують енергоспоживання відповідно до тарифів, прогнозу погоди та поведінки користувачів.

Завдяки цьому підвищується частка власного використання енергії від ВДЕ та зменшується навантаження на зовнішні мережі.

Оптимальне рішення має забезпечувати прийнятний компроміс між мінімізацією енергоспоживання, початковими витратами та екологічним ефектом.

Загальні принципи проєктування енергетичних систем у NZEB базуються на поєднанні пасивних будівельних рішень, високоефективних інженерних систем, відновлюваних джерел енергії, засобів акумуляції та інтелектуального керування. Реалізація концепції “зменшення – оптимізація – генерація” в поєднанні з урахуванням кліматичних умов та економічних критеріїв дозволяє створювати будинки з мінімальним споживанням первинних енергоресурсів і високим рівнем комфорту для користувачів.

2.2. Сонячна енергетика: фотоелектричні системи та сонячні колектори

Сонячна енергетика є одним з базових елементів енергетичної інфраструктури будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB). Вона забезпечує перетворення відновлюваного сонячного випромінювання на електричну та теплову енергію без прямих викидів парникових газів. Застосування фотоелектричних систем і сонячних колекторів дозволяє суттєво зменшити споживання традиційних енергоносіїв, підвищити енергетичну автономність будівель та сформувати позитивний екологічний ефект.

В концепції NZEB сонячна енергетика виконує декілька ключових функцій:

- покриття значної частини потреб будівлі в електроенергії;
- забезпечення ГВП та, частково, підтримки системи опалення;
- зниження пікових навантажень на мережу;
- створення умов для роботи будівлі в автономному або напівавтономному режимі.

Висока прогнозованість річного потенціалу сонячної радіації та розвиток технологій накопичення енергії роблять сонячні системи одним із найперспективніших рішень для житлової та громадської забудови.

Типова фотоелектрична система (ФЕС) для будинку NZEB включає:

- фотоелектричні модулі, об’єднані в масив на покрівлі або фасаді;
- інвертор для перетворення постійного струму в змінний мережевий;
- систему захисту та комутації (контролери, автомати, запобіжники);
- акумуляторні батареї (для автономних і гібридних систем);
- систему моніторингу, що відстежує генерацію та стан обладнання.

За схемою приєднання ФЕС поділяють на:

- мережеві (on-grid) – працюють паралельно з мережею, надлишок енергії передається постачальнику;

- автономні (off-grid) – забезпечують живлення окремої будівлі без підключення до зовнішніх мереж;
- гібридні – поєднують можливості мережевої та автономної роботи з використанням акумуляторів.

Фотоелектричні модулі інтегруються безпосередньо у будівельні конструкції (покрівля, фасад, світлопрозорі елементи), поєднуючи функції огороджувальних конструкцій та джерела генерації.

Ефективність ФЕС залежить від рівня інсоляції, кута нахилу та орієнтації модулів, температурних умов, наявності затінення та якості інверторного обладнання.

Сонячні колектори: класифікація та принцип роботи

Сонячні колектори призначені для перетворення сонячної енергії на теплову, яка використовується для приготування гарячої води і, частково, для опалення будівлі.

Основні типи колекторів:

- плоскі колектори – складаються з абсорбера, прозорого покриття, теплоізоляції та корпусу; забезпечують ефективність 40–60 % і широко застосовуються у системах ГВП;
- вакуумні трубчасті колектори – мають знижені теплові втрати за рахунок вакуумної ізоляції, забезпечують вищі температури теплоносія та ефективність 60–75 %, можуть використовуватися для підтримки низькотемпературного опалення;
- концентруючі колектори – застосовуються переважно в промислових та великих централізованих системах; у житлових NZEB використовуються рідко.

Принцип дії сонячного колектора полягає в поглинанні сонячного випромінювання абсорбером та передаванні тепла теплоносію, який циркулює через теплообмінник і передає енергію до акумуляційного бака.

Інтеграція фотоелектричних систем і колекторів у енергетичну схему NZEB

Для досягнення нульового або майже нульового енергетичного балансу важливо грамотно інтегрувати ФЕС та сонячні колектори в загальну систему енергозабезпечення будинку. Основні принципи інтеграції:

- оптимальний розподіл площі покрівлі між електричною та тепловою генерацією з урахуванням потреб будівлі;

- застосування комбінованих PV/T-модулів, що одночасно виробляють електричну й теплову енергію;

- поєднання колекторів із системою теплового насоса та буферними ємностями для збільшення сезонного ККД;

- використання акумуляторів (електричних та теплових) для вирівнювання добових коливань навантаження;

- застосування інтелектуальних систем керування, які забезпечують пріоритет власної генерації та оптимальний режим роботи обладнання.

Ефективність застосування сонячної енергетики у будинку з нульовим споживанням енергії оцінюється за кількома критеріями:

- частка покриття електричних і теплових навантажень за рахунок сонячних систем;

- річний баланс енергії (різниця між генерацією та споживанням);

- економічні показники – строк окупності, приведені витрати за життєвий цикл, зменшення платежів за енергоресурси;

- екологічний ефект – скорочення викидів CO_2 та інших забруднювальних речовин.

У properly спроєктованому NZEB фотоелектрична система, як правило, забезпечує від 50 до 100 % річної потреби будівлі в електроенергії, а сонячні колектори – до 60–80 % потреб у гарячій воді.

Сонячна енергетика є невід’ємним компонентом енергетичної концепції будинків з нульовим споживанням енергії. Фотоелектричні системи забезпечують генерацію електричної енергії, а сонячні колектори – покриття значної частини теплових навантажень. Їх комбіноване

використання в поєднанні з системами акумуляції та інтелектуальним керуванням дозволяє мінімізувати споживання традиційних енергоносіїв, підвищити автономність будівлі та досягти вимог сучасних стандартів енергоефективності.

2.3. Вітрові та геотермальні системи для індивідуальної забудови

Вітрові та геотермальні системи належать до перспективних напрямів використання відновлюваних джерел енергії в будинках з нульовим споживанням енергії (NZEB). Вони доповнюють сонячну енергетику, підвищують надійність енергопостачання та дозволяють зменшити частку традиційних енергоресурсів у балансі будівлі. Для індивідуальної забудови доцільним є застосування мало- та мікропотужних вітроустановок, а також теплових насосів, що використовують тепло ґрунту або води.

Вітрові енергетичні системи для індивідуальних будинків

Для приватних будинків зазвичай застосовують установки потужністю від 0,3 до 20 кВт, які можуть працювати автономно, у гібриді з фотоелектричними системами або в паралель із мережею.

Для індивідуальної забудови найчастіше використовуються:

- турбіни горизонтальної осі (HAWT) – забезпечують вищий ККД, але потребують достатньої швидкості та стабільності вітру, а також відкритого розташування;

- турбіни вертикальної осі (VAWT) – краще працюють у турбулентних потоках, можуть розміщуватися ближче до будинку, проте мають нижчу ефективність.

Доцільність застосування вітрових систем визначається середньорічною швидкістю вітру (бажано не менше 4,5–5 м/с на рівні ротора), відсутністю значного затінення та можливістю встановлення щогли достатньої висоти.

Основні переваги для NZEB:

- генерація електроенергії у темний час доби та в періоди низької сонячної активності;

- можливість зменшити розмір фотоелектричної установки або ємність батарей;

- підвищення енергетичної автономності будівлі.

До недоліків належать залежність від вітрового потенціалу місцевості, акустичний вплив, візуальне сприйняття та підвищені вимоги до надійності механічних частин.

Геотермальні системи для індивідуальної забудови

Геотермальні системи в індивідуальних будинках зазвичай реалізуються у вигляді комплексів «геотермальний теплообмінник – тепловий насос». Вони використовують відносно стабільну температуру ґрунту або води як джерело низькопотенціального тепла, яке переноситься до будівлі для опалення чи, навпаки, відводиться з неї для охолодження.

Основні компоненти геотермальної системи:

- тепловий насос типу «ґрунт–вода», «вода–вода» або «розсіл–вода»;

- первинний контур – ґрунтовий або водний теплообмінник;

- вторинний контур – система опалення/охолодження (тепла підлога, фанкойли, низькотемпературні радіатори);

- буферні ємності для акумуляції тепла.

Типи ґрунтових теплообмінників

1. Горизонтальні колектори

Прокладаються на глибині 1,2–2,0 м у вигляді трубопроводів із теплоносієм. Переваги – простота монтажу та відносно низька вартість. Недолік – значна необхідна площа ділянки та залежність від сезонних змін температури верхніх шарів ґрунту.

2. Вертикальні зонди (свердловинні теплообмінники)

Розміщуються у свердловинах глибиною 50–150 м. Забезпечують стабільну температуру теплоносія та високу ефективність, але потребують спеціалізованого буріння, що збільшує капітальні витрати.

3. Водяні теплообмінники

Використовують тепло підземних чи поверхневих вод. Мають найвищу ефективність, але їх застосування обмежується гідрогеологічними умовами та екологічними вимогами.

Завдяки високому сезонному коефіцієнту перетворення (SCOP, як правило 3,5–5,0 і вище) геотермальні системи дозволяють істотно зменшити споживання електроенергії для опалення та охолодження й забезпечити високий рівень комфорту.

Інтеграція вітрових і геотермальних систем у NZEB

Для індивідуальної забудови найбільш ефективним є комбіноване використання різних ВДЕ:

- поєднання геотермального теплового насоса з фотоелектричними панелями та, за наявності достатнього вітрового ресурсу, малою вітроустановкою;

- застосування акумуляційних систем (електричних і теплових) для згладжування добових та сезонних коливань навантаження;

- використання інтелектуальних систем керування, які оптимізують режими роботи джерел, накопичувачів та споживачів енергії.

Такий підхід дозволяє підвищити рівень енергетичної автономності будинку, зменшити викиди парникових газів та забезпечити відповідність вимогам стандартів NZEB.

Вітрові та геотермальні системи є важливими складовими комплексу відновлюваних джерел енергії для будинків з нульовим споживанням енергії. Вітрові установки доцільно застосовувати в регіонах із достатнім вітровим потенціалом як додаткове джерело електроенергії, тоді як геотермальні теплові насоси забезпечують високоефективне теплопостачання і холодопостачання будівлі. Раціональна інтеграція цих технологій із сонячною енергетикою, системами акумуляції та інтелектуальним керуванням дозволяє сформувати надійну, екологічно чисту й економічно доцільну енергетичну систему NZEB.

2.4. Теплові насоси: типи, режими роботи, ефективність

Теплові насоси є одним із базових елементів енергетичних систем будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB), оскільки дозволяють перетворювати низькопотенціальну енергію навколишнього середовища (повітря, ґрунту, води) у корисне тепло з мінімальними витратами електроенергії. Застосування теплових насосів дає змогу суттєво знизити потребу в паливі, зменшити викиди парникових газів і забезпечити високу енергоефективність будівель.

За видом джерела тепла та споживача теплової енергії теплові насоси поділяють на такі основні групи:

- *повітряні теплові насоси (повітря–повітря, повітря–вода)*

Використовують тепло зовнішнього повітря. Переваги – простота монтажу, відсутність земляних робіт, відносно невисока вартість. Недоліком є зниження ефективності за низьких зовнішніх температур.

- *ґрунтові теплові насоси (ґрунт–вода, розсіл–вода)*

Джерелом тепла виступає ґрунт зі стабільною температурою на глибині 1,5–2 м і більше. Високий сезонний коефіцієнт перетворення, стабільна робота протягом року, але значні капітальні витрати на влаштування горизонтальних колекторів або свердловин.

- *водяні теплові насоси (вода–вода)*

Використовують енергію підземних чи поверхневих вод. Характеризуються найвищою ефективністю, проте потребують відповідних гідрогеологічних умов і додаткових захисних заходів.

Для житлових NZEB найбільш характерними є компресійні теплові насоси типу «повітря–вода» та «розсіл–вода», які забезпечують опалення, охолодження та підготовку гарячої води.

Режими роботи теплових насосів

Сучасні теплові насоси є багатофункціональними пристроями й можуть працювати в декількох режимах:

1. Режим опалення

Основний режим у холодний період року. Тепло від низькотемпературного джерела передається до системи опалення (тепла підлога, низькотемпературні радіатори, фанкойли). Для NZEB пріоритетними є системи з температурою подачі 30–40°C, що дозволяє досягти високих значень коефіцієнта перетворення.

2. Режим приготування гарячої води (ГВП)

Тепловий насос нагріває воду в бойлері непрямого нагріву. У цьому режимі температура теплоносія може бути підвищена до 50–60 °C, що дещо зменшує ефективність, однак забезпечує санітарні вимоги.

3. Режим охолодження

Реверсивні теплові насоси влітку працюють як холодильні машини. Тепло з приміщень відводиться в зовнішнє середовище (повітря, ґрунт, воду), забезпечуючи комфортний мікроклімат.

4. Бівалентний режим

Передбачає спільну роботу теплового насоса з додатковим джерелом тепла (електричним або газовим котлом). Застосовується при дуже низьких температурах зовнішнього повітря, коли потужності ТН недостатньо для повного покриття теплових навантажень.

Показники ефективності теплових насосів

Ефективність роботи теплового насоса оцінюється за допомогою ряду коефіцієнтів:

- COP (Coefficient of Performance) – миттєвий коефіцієнт перетворення у режимі нагріву, що визначається як відношення корисної теплової потужності до спожитої електричної потужності.

Типові значення:

- для повітряних ТН – 2,5–4,0;
- для ґрунтових – 4,0–5,0;
- для водяних – до 5,0–6,0.

- EER (Energy Efficiency Ratio) – аналогічний показник у режимі охолодження.

- SCOP (Seasonal COP) – сезонний коефіцієнт продуктивності, що враховує зміну зовнішніх умов і режимів роботи впродовж опалювального періоду. SCOP є більш репрезентативним показником для порівняння реальної ефективності різних систем.

- SPF (Seasonal Performance Factor) – відношення загальної кількості тепла, поданого системою за сезон, до сумарного споживання електроенергії усіма елементами (компресор, циркуляційні насоси, автоматика).

Чим вищі значення цих коефіцієнтів, тим менше первинної енергії витрачається на забезпечення теплового комфорту.

На роботу та ефективність теплових насосів впливають:

- температура джерела тепла (ґрунт і вода забезпечують більш стабільні умови, ніж зовнішнє повітря);

- температурний графік системи опалення (низькотемпературні системи значно підвищують COP);

- якість проєктування та гідравлічне балансування системи;

- наявність буферної ємності та відповідний алгоритм керування;

- інтеграція з іншими ВДЕ, насамперед з фотоелектричними системами, що дозволяє частково або повністю покривати споживання електроенергії тепловим насосом.

У будинках з нульовим споживанням енергії теплові насоси виконують функції центрального елемента системи теплопостачання та холодопостачання. Завдяки високій ефективності та можливості роботи у комплексі з ВДЕ вони:

- істотно знижують питомі витрати первинної енергії;

- дозволяють реалізувати низькотемпературні системи опалення з підвищеним комфортом;

- забезпечують гнучкість енергетичної схеми будівлі та можливість її подальшої модернізації;

- сприяють досягненню вимог національних та європейських стандартів щодо енергоефективності та скорочення викидів CO_2.

Отже, правильний вибір типу теплового насоса, його потужності та режимів роботи є одним із ключових завдань при проєктуванні енергетичних систем NZEB.

2.5. Системи акумуляції енергії (електричні, теплові, гібридні)

Системи акумуляції енергії є невід'ємною складовою енергетичної інфраструктури будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB), оскільки забезпечують узгодження у часі між генерацією та споживанням енергії. Нерівномірний характер роботи відновлюваних джерел енергії (сонячні фотоелектричні системи, вітроустановки) призводить до необхідності накопичення надлишків енергії у періоди їх надлишкової генерації та використання у періоди дефіциту. Застосування електричних, теплових та гібридних систем акумуляції дозволяє підвищити автономність будівлі, зменшити пікові навантаження на мережу та підвищити загальну енергоефективність NZEB.

Електричні системи акумуляції енергії

Електричні системи акумуляції забезпечують накопичення електроенергії, яка надходить від фотоелектричних панелей, вітрових установок або мережі, з подальшим її використанням у години підвищеного навантаження або за відсутності власної генерації.

Основними типами електричних накопичувачів, що застосовуються в індивідуальній забудові, є:

- Літій-іонні акумулятори (Li-ion)

Характеризуються високою енергетичною щільністю, великим ресурсом циклів (до кількох тисяч), високим ККД перетворення (до 90–95 %) та компактністю. Є найбільш поширеним рішенням у системах накопичення енергії для NZEB.

- Літій-залізо-фосфатні акумулятори ($LiFePO_4$)

Мають покращені показники безпеки та термічної стабільності, дещо нижчу енергетичну щільність, але довший строк служби. Рекомендуються для стаціонарних систем з підвищеними вимогами до надійності.

- Свинцево-кислотні акумулятори (у тому числі AGM та GEL)

Відзначаються нижчою вартістю, однак мають менший ресурс циклічної роботи, нижчий ККД та більшу масу. Їх застосування в сучасних NZEB обмежене й доцільне переважно в малобюджетних або резервних системах.

Електричні накопичувачі працюють у складі інверторних комплексів, що забезпечують керування зарядом/розрядом, захист від перенапруги та глибокого розряду, а також можливість роботи в режимах резервного живлення.

Основні функції електричної акумуляції у NZEB:

- збільшення частки власного споживання електроенергії від ВДЕ;

- забезпечення безперебійного живлення критичних споживачів;

- зменшення пікових навантажень та оптимізація роботи з багатозонними тарифами.

Теплові системи акумуляції енергії

Теплові накопичувачі призначені для зберігання тепла або холоду, що утворюється внаслідок роботи теплових насосів, сонячних колекторів, котлів або систем кондиціювання. У структурі енергоспоживання будівлі значна частка припадає саме на теплові навантаження (опалення, гаряче водопостачання, охолодження), тому теплові системи акумуляції є особливо доцільними.

Основні типи теплових акумуляторів:

- *Акумуляційні баки з водою (буферні ємності)*

Найпоширеніше рішення, що застосовується у поєднанні з тепловими насосами та сонячними колекторами. Вода використовується як теплоносій і акумулятор, дозволяючи згладжувати нерівномірність роботи джерел тепла,

зменшувати кількість пусків/зупинок компресора теплового насоса та підвищувати ресурс обладнання.

- Ємності з фазозмінними матеріалами (PCM)

Використовують приховану теплоту плавлення або кристалізації. Це дає змогу накопичувати значні обсяги енергії при відносно невеликих змінах температури. Такі системи є перспективними для акумуляції як тепла, так і холоду, зокрема у системах кондиціювання.

- Сезонні (геосезонні) теплові акумулятори

Реалізуються у вигляді підземних резервуарів або ґрунтових масивів, у які протягом теплого періоду року закачується надлишкове тепло, а взимку воно використовується для опалення. Цей принцип особливо ефективний у поєднанні з геотермальними тепловими насосами.

Перевагами теплової акумуляції є відносно низька вартість одиниці накопиченої енергії, екологічність та конструктивна простота. Обмеженнями є значні габарити (особливо для водяних систем) та потреба у ретельному теплотехнічному розрахунку для уникнення надмірних тепловтрат.

Гібридні системи акумуляції енергії

Гібридні системи акумуляції поєднують електричні та теплові накопичувачі у єдиній енергетичній схемі будівлі. Такий підхід дозволяє найбільш повно використовувати потенціал відновлюваних джерел енергії та оптимізувати роботу енергетичних систем NZEB.

Типові приклади гібридних рішень:

- Комплекс “фотоелектрична система + електричний акумулятор + тепловий насос + буферна ємність”

У денний час надлишок електроенергії від сонячних панелей використовується для живлення теплового насоса та заряджання батарей. Частина енергії перетворюється у тепло, що акумулюється в баках, а частина – накопичується в електричному вигляді для вечірніх навантажень.

- Поєднання геотермального теплового насоса з сезонною тепловою акумуляцією та обмеженою ємністю електричних батарей

Така схема дозволяє мінімізувати обсяг дорогих електричних акумуляторів за рахунок активного використання теплових резервуарів та високої ефективності геотермальної системи.

- Інтелектуально керовані гібридні системи

Застосування систем енергетичного моніторингу та керування (EMS) дозволяє в реальному часі вибирати оптимальний режим: куди спрямувати надлишок енергії – у електричний акумулятор, у нагрів буферної ємності чи, за наявності, у мережу.

Гібридний підхід забезпечує:

- підвищення частки власного використання енергії від ВДЕ;

- зменшення пікових навантажень на електричну мережу;

- гнучкість у виборі режимів роботи залежно від тарифів, погодних умов та профілю споживання.

Критерії вибору систем акумуляції для NZEB

При виборі типу та параметрів систем акумуляції енергії враховуються такі основні критерії:

- характер енергоспоживання будівлі (співвідношення електричних і теплових навантажень, добовий та сезонний профілі);

- потенціал та структура генерації від ВДЕ (частка сонячної, вітрової, геотермальної енергії);

- економічні показники – капітальні витрати, строк окупності, приведені витрати за життєвий цикл;

- надійність та довговічність обладнання;

- конструктивні та просторові обмеження (наявність місця для встановлення баків, батарей, підземних резервуарів);

- екологічні аспекти – матеріали, утилізація, вплив на довкілля.

Системи акумуляції енергії відіграють визначальну роль у забезпеченні ефективної роботи будинків з нульовим споживанням енергії. Електричні накопичувачі дозволяють узгодити генерацію та споживання електроенергії, теплові – оптимізувати використання джерел тепла, а гібридні

рішення забезпечують максимально гнучке та економічно доцільне управління енергетичними потоками. Правильний вибір та проєктування систем акумуляції, у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії та інтелектуальними системами керування, є необхідною умовою досягнення цільового рівня енергоефективності та енергетичної автономності NZEB.

2.6. Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням

Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням (Energy Management Systems, EMS) є невід'ємною складовою енергетичної концепції будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB). Вони забезпечують координацію роботи джерел енергії, систем споживання та акумуляції, дозволяючи мінімізувати витрати енергоресурсів, підвищити частку використання відновлюваних джерел енергії та зберегти необхідний рівень комфорту для користувачів.

Головним призначенням інтелектуальних систем керування енергоспоживанням є оптимізація енергобалансу будівлі в режимі реального часу. До основних завдань EMS належать:

- моніторинг параметрів енергосистеми: споживання електричної та теплової енергії, генерації від ВДЕ, стану акумуляторів, показників мікроклімату;

- управління роботою інженерних систем (опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення, ГВП, побутових приладів);

- оптимальний розподіл енергії між джерелами, накопичувачами та споживачами;

- реалізація енергозберігальних сценаріїв залежно від часу доби, присутності людей, тарифів, прогнозу погоди;

- забезпечення надійності та безпеки роботи енергосистеми (виявлення аварійних режимів, перевантажень, аномального споживання).

Таким чином, EMS виконує роль «енергетичного мозку» будівлі, який приймає рішення на основі даних від сенсорів та заданих критеріїв.

Структура інтелектуальної системи керування

Типова архітектура системи інтелектуального керування енергоспоживанням у NZEB включає такі основні компоненти:

- Вимірювальні прилади та датчики: електролічильники, теплові лічильники, датчики температури, вологості, CO_2, освітленості, датчики присутності, стану вікон і дверей тощо.

- Виконавчі пристрої: електронні термостати, клапани, сервоприводи, реле, перетворювачі частоти, інвертори, контролери теплових насосів, модулі керування освітленням.

- Комунікаційна інфраструктура: дротові (Modbus, KNX, BACnet) і бездротові (Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave) протоколи, що забезпечують обмін даними між обладнанням та центральним контролером.

- Центральний контролер або сервер EMS: здійснює збір даних, їх обробку, зберігання та реалізацію алгоритмів керування. Може бути локальним (в межах будівлі) або хмарним.

- Інтерфейс користувача: веб-інтерфейси, мобільні застосунки, панелі управління, що дозволяють відстежувати стан системи, змінювати налаштування, керувати сценаріями.

Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням у NZEB використовують різні підходи та алгоритми, серед яких:

1. Правилове керування (Rule-Based Control)

Робота системи визначається набором логічних правил типу «якщо–то». Наприклад: якщо доступна сонячна генерація і температура в буферному баку нижча за задану, то увімкнути тепловий насос у режимі нагріву.

2. Прогнозне керування (Model Predictive Control, MPC)

Алгоритми використовують прогнози погоди, графіки навантаження та генерації, а також тарифну інформацію для оптимального планування роботи обладнання на певний період часу.

3. Адаптивне та навчальне керування

Застосовуються елементи машинного навчання для:

- виявлення індивідуальних звичок користувачів;

- уточнення моделей теплової інерційності будівлі;

- автоматичного налаштування режимів HVAC і освітлення.

4. Економічна оптимізація

EMS може мінімізувати витрати на електроенергію шляхом:

- перенесення роботи енергоємних приладів у періоди низьких тарифів;

- максимізації власного споживання енергії від ВДЕ;

- обмеження пікових навантажень, що особливо важливо при використанні обмежених потужностей приєднання.

У будинках NZEB інтелектуальні системи керування забезпечують тісну інтеграцію:

- з фотоелектричними системами – пріоритетне використання власної генерації, керування зарядом батарей;

- з тепловими насосами – узгодження роботи з прогнозом сонячної генерації, зовнішньою температурою та тепловим навантаженням;

- з електричними та тепловими накопичувачами – оптимізація режимів заряд/розряд, акумуляція надлишків енергії;

- з мережею (Smart Grid) – можливість реакції на сигнали від оператора мережі, участь у програмах попиту-відгуку (Demand Response).

Завдяки цьому досягається більш рівномірний профіль навантаження будівлі, знижується надлишкова генерація в мережу та підвищується використання власних ресурсів.

Використання інтелектуальних систем керування енергоспоживанням забезпечує низку суттєвих переваг:

- зменшення загального енергоспоживання за рахунок точного регулювання та усунення зайвих витрат;

- збільшення частки використання енергії від ВДЕ, у тому числі власної генерації;

- зниження експлуатаційних витрат, пов’язаних з оплатою енергоносіїв та обслуговуванням обладнання;

- підвищення комфорту та якості мікроклімату завдяки стабілізації температури, вологості, якості повітря;

- моніторинг стану обладнання, раннє виявлення несправностей, продовження ресурсу систем.

Попри значні переваги, впровадження інтелектуальних систем має й певні обмеження:

- відносно високі початкові інвестиції у обладнання та програмне забезпечення;

- необхідність професійного проєктування та налаштування;

- вимоги до кібербезпеки та захисту даних;

- залежність від якості інтернет-з’єднання (у разі використання хмарних сервісів);

- можливі складнощі у взаємодії обладнання різних виробників без єдиних стандартів.

Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням є ключовим інструментом реалізації концепції NZEB. Вони забезпечують поєднання пасивних та активних заходів енергозбереження, інтегрують відновлювані джерела енергії, системи акумуляції та інженерне обладнання в єдиний керований комплекс. Завдяки використанню сучасних алгоритмів керування, прогнозування та оптимізації такі системи дозволяють досягти високого рівня енергоефективності, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільний комфорт у будівлях з нульовим споживанням енергії.

2.7. Висновки до розділу

1. Енергетична концепція NZEB має базуватися на послідовній реалізації принципу «зменшення – оптимізація – генерація», інтеграції архітектурних рішень, високоефективних інженерних систем, відновлюваних джерел енергії, засобів акумуляції та інтелектуального керування, що у

сукупності мінімізує споживання первинної енергії при збереженні високого рівня комфорту.

2. Сонячна енергетика (фотоелектричні системи та сонячні колектори) є базовим елементом енергетичної інфраструктури NZEB, забезпечуючи значну частку електричних і теплових навантажень будівлі, зменшуючи споживання традиційних енергоносіїв та формуючи позитивний екологічний і економічний ефект.

3. Вітрові та геотермальні системи здатні ефективно доповнювати сонячну енергетику в індивідуальній забудові, підвищуючи енергетичну автономність, знижуючи залежність від мережі та забезпечуючи стабільне теплопостачання й електропостачання за умови раціонального вибору типу установок і врахування локальних природних умов.

4. Теплові насоси, завдяки високим значенням сезонних коефіцієнтів перетворення (SCOP, SPF) та можливості роботи в режимах опалення, охолодження й підготовки ГВП, виступають ключовим елементом систем теплопостачання та холодопостачання NZEB, істотно знижуючи питомі витрати первинної енергії та викиди CO_2.

5. Електричні, теплові та гібридні системи акумуляції енергії відіграють визначальну роль в узгодженні нерівномірних графіків генерації ВДЕ та споживання енергії, підвищують частку власного використання енергії від ВДЕ, зменшують пікові навантаження на мережу й забезпечують гнучкість та надійність енергетичної системи будинку.

6. Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням (EMS), інтегровані з джерелами енергії, системами акумуляції та інженерним обладнанням, виконують роль «енергетичного мозку» NZEB, забезпечуючи моніторинг, оптимізацію режимів роботи, економічну доцільність, підвищення частки використання ВДЕ та стабільний комфорт у будівлі.

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИКА БУДІВНИЦТВА БУДИНКІВ З НУЛЬОВИМ СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ

3.1. Планувальні рішення та архітектурно-конструктивні підходи

Планувальні рішення та архітектурно-конструктивні підходи відіграють ключову роль у формуванні енергоефективності будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB). Навіть за використання високоефективних інженерних систем досягти низького енергоспоживання без оптимальної форми будівлі, раціонального зонування приміщень, правильної орієнтації за сторонами світу та якісних огороджувальних конструкцій є надзвичайно складно. Тому архітектурно-планувальний етап проєктування слід розглядати як фундамент для подальшої оптимізації інженерних систем та енергетичного балансу будівлі.

До базових принципів архітектурно-планувальних рішень для NZEB належать:

- *компактність форми будівлі*, мінімізація площі огороджувальних конструкцій при заданому об’ємі;
- *раціональна орієнтація* відносно сторін світу з урахуванням інсоляції та переважаючих вітрів;
- *функціональне зонування* внутрішніх приміщень з виділенням «теплих» та «буферних» зон;
- *мінімізація теплових містків* за рахунок конструктивних рішень;
- *інтеграція пасивних сонячних надходжень* та природного освітлення в архітектурну концепцію;
- *можливість подальшої модернізації* та нарощування енергоефективних систем.

Орієнтація будівлі має суттєвий вплив на її енергетичний баланс. Для помірного клімату раціональними вважаються такі підходи:

- *південний фасад* – основна площа засклення для використання пасивних сонячних теплоприпливів взимку;
- *північний фасад* – мінімальна кількість вікон, бажано з високими теплоізоляційними показниками;
- *східний та західний фасади* – помірне засклення з ефективним сонцезахистом для уникнення перегріву в літній період.

Для кількісної оцінки використовується *коефіцієнт засклення фасаду:*

$$\mu_{скл} = A_{вік}/A_{фас}, \quad (3.1)$$

де $A_{вік}$ – сумарна площа світлопрозорих огороджень фасаду,

$A_{фас}$ – загальна площа відповідного фасаду.

Рекомендовані значення $\mu_{скл}$ для житлових NZEB наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Орієнтовні рекомендації щодо відношення площі засклення до площі фасаду

Орієнтація фасаду	Рекомендоване $\mu_{скл}$, %	Коментар
Південний	25–40	Максимізація пасивних теплоприпливів, обов’язковий зовнішній сонцезахист
Східний	15–25	Ранкове сонце, помірне засклення
Західний	10–20	Уникаємо перегріву ввечері, підсилений сонцезахист
Північний	5–15	Мінімізація тепловтрат

Важливим показником енергоефективності є *коефіцієнт компактності* будівлі, що визначається відношенням площі зовнішніх огороджувальних конструкцій до опалюваного об’єму:

$$k_c = A_{огр}/V_{оп}, \quad (3.2)$$

де $A_{огр}$ – сумарна площа зовнішніх огороджувальних конструкцій (стіни, покрівля, підлога над холодними приміщеннями або ґрунтом),

$V_{оп}$ – опалюваний об’єм будівлі.

Чим менше значення k_c, тим менші питомі тепловтрати через огороджувальні конструкції. Для NZEB доцільно прагнути до *максимально компактної форми:* близької до кубічної або прямокутного паралелепіпеда зі сприятливим співвідношенням сторін.

Таблиця 3.2. Орієнтовна оцінка компактності різних форм будівель.

Форма будівлі	Приклад плану	Орієнтовний коефіцієнт k_c, м²/м³	Коментар
Кубічна/близька до куба	Квадратний план, 2–3 пов.	0,7–0,8	Найбільш енергоефективна форма
Прямокутник помірно витягнутий	Співвідношення сторін 1:2	0,8–0,9	Прийнятно для NZEB
Складної форми з еркерами	Багатокутний контур	0,9–1,1	Підвищені тепловтрати
Розгалужена форма (L-, U-подібна)	Декілька крил	>1,1	Небажана для NZEB

Для орієнтовної оцінки питомих тепловтрат може бути використана спрощена формула:

$$q_{огр} = U_{сер} \cdot k_c \cdot \Delta T_р, \tag{3.3}$$

де $U_{сер}$ – середній коефіцієнт теплопередачі огороджувальних конструкцій,

$\Delta T_р$ – розрахункова різниця температур внутрішнього та зовнішнього повітря в опалювальний період.

Функціональне та теплотехнічне зонування внутрішнього простору

Енергоефективність NZEB значною мірою залежить від розміщення приміщень відносно теплового контуру будівлі. Виділяють такі основні типи зон:

- *«Теплі зони»* – житлові кімнати, вітальня, дитячі, кабінет; розміщуються переважно з південного, південного-східного та південного-західного боку;

- *«Помірні зони»* – кухня, санвузли, допоміжні кімнати; можуть розташовуватися в центральній частині або з менш сприятливих орієнтацій;
- *«Буферні зони»* – коридори, сходові клітки, гардеробні, комори, технічні приміщення, тамбури; бажано розміщувати з північного боку для зменшення тепловтрат.

Такий підхід дозволяє:

- використовувати сонячну радіацію для обігріву найбільш використовуваних приміщень;
- зменшити втрати тепла через огороджувальні конструкції в зонах з найменше критичними вимогами до температури;
- оптимізувати довжину внутрішніх комунікацій (повітроводи, трубопроводи, електромережі).

Архітектурно-конструктивні рішення огороджувальних конструкцій

Архітектурно-конструктивні рішення повинні забезпечувати одночасно:

- високий тепловий опір огороджувальних конструкцій;
- відсутність або мінімізацію теплових містків;
- герметичність повітряного контуру;
- довговічність і технологічність конструкцій.

Типовими є *багатошарові стінові конструкції*:

- несучий шар (цегла, газобетон, монолітний або збірний залізобетон, дерев’яний каркас);
- теплоізоляційний шар (мінеральна вата, пінополістирол, PIR, ековата тощо);
- вітро- та гідрозахисний шар;
- оздоблювальний шар (штукатурка, вентильований фасад, фасадні панелі).

Особлива увага приділяється вузлам: стіна–покрівля; стіна–фундамент; обрамлення віконних та дверних прорізів; стики панелей та каркасних елементів.

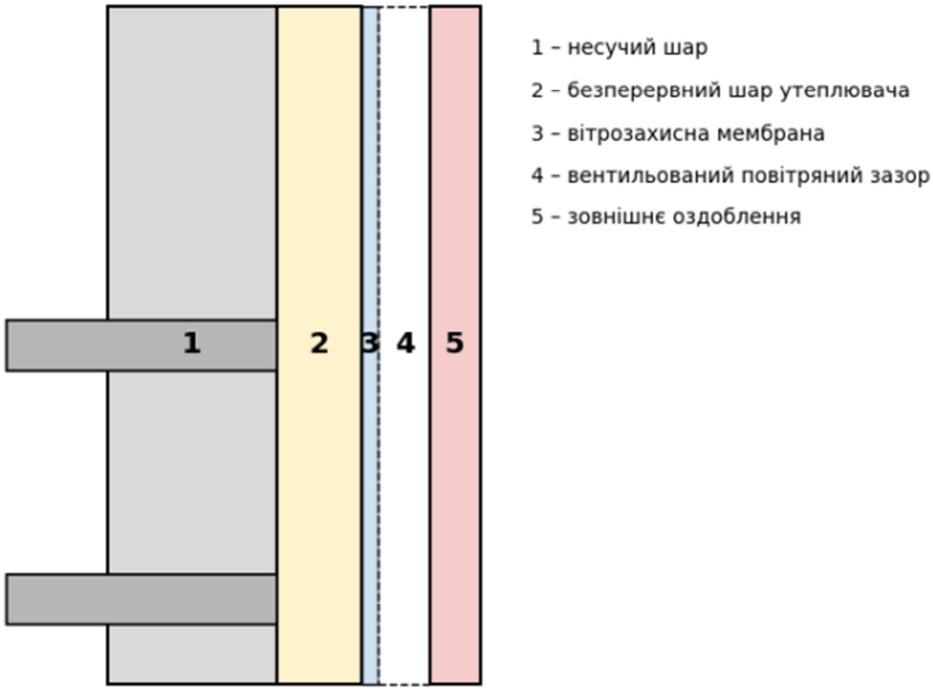

Рис. 3.1. Утеплена зовнішня стіна для NZEB.

Віконні системи та сонцезахист

Світлопрозорі конструкції є одним з найбільш критичних елементів з точки зору тепловтрат та перегріву. Для NZEB застосовуються:

- *енергоефективні склопакети* з низькоемісійним покриттям та газонаповненням (Ar, Kr);
- *теплі рамні профілі* з перерваними термомостами;
- *герметичний монтаж* за трирівневою схемою з паро-, тепло- та гідроізоляційними шарами.

Важливо не тільки зменшити тепловтрати (низьке U_{window}), але й обмежити перегрів влітку. Для цього застосовують:

- зовнішні жалюзі, ролети, маркізи;
- фіксовані горизонтальні козирки над вікнами південних фасадів;
- вертикальні ламелі на східних та західних фасадах.

Конструктивна система (каркасна, стінова, змішана) обирається з урахуванням:

- можливості забезпечення *безперервного теплоізоляційного шару*;
- мінімізації *мостів холоду* через балки, ригелі, колони, пояси;

- масивності та *теплової інерційності* огороджувальних конструкцій (важкі конструкції сприяють згладженню температурних коливань);
- технологічності монтажу та вартості.

Для індивідуальних NZEB переважно застосовують:

- *енергоефективну кам'яну або блокову забудову* (газобетон + зовнішнє утеплення);
- *каркасно-панельні системи* з високоякісною заводською теплоізоляцією;
- *дерев'яні каркасні та CLT-системи* із комбінованою теплоізоляцією.

Планувальні рішення та архітектурно-конструктивні підходи в NZEB визначають базовий рівень енергоефективності будівлі ще до етапу вибору інженерних систем. Компактна форма, раціональна орієнтація за сторонами світу, продумане функціональне зонування приміщень, безперервний теплоізоляційний контур та якісні віконні системи з ефективним сонцезахистом дозволяють суттєво зменшити тепловтрати та ризик перегріву. Використання простих розрахункових показників (коефіцієнт компактності, питомі площі огороджувальних конструкцій і засклення) та графічно-схематичного аналізу дає змогу вже на ранніх стадіях проєктування обирати найбільш енергоефективні архітектурно-планувальні рішення для будинків з нульовим споживанням енергії.

3.2. Пасивні методи енергозбереження

Пасивні методи енергозбереження є основою енергоефективного проєктування будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB). На відміну від активних систем, які потребують складного інженерного обладнання, пасивні рішення закладаються вже на стадії архітектурно-планувальних та конструктивних рішень. До ключових пасивних факторів належать орієнтація будівлі, раціональне використання сонячної інсоляції та енергоефективні віконні системи. Саме вони визначають базовий рівень теплових надходжень і втрат, а отже – подальші потреби в опаленні, охолодженні та освітленні.

Орієнтація будівлі як фактор енергозбереження

Орієнтація будівлі відносно сторін світу істотно впливає на:

- величину *пасивних сонячних теплоприпливів* у зимовий період;
- *ризик перегріву* влітку;
- *якість природного освітлення* приміщень;
- *вітровий режим* та тепловтрати через інфільтрацію.

У помірному кліматі оптимально, коли:

- основні житлові приміщення орієнтовані на *південь, південний-схід або південний-захід*;
- допоміжні та буферні приміщення (сходові клітини, гардеробні, технічні) розміщені ближче до *північного фасаду*;
- площа засклення північного фасаду мінімізується.

Для кількісної оцінки використовується коефіцієнт засклення фасаду:

$$\mu_{скл,i} = A_{вік,i}/A_{фас,i}, \tag{3.4}$$

де $A_{вік,i}$ – сумарна площа вікон на фасаді з орієнтацією i,

$A_{фас,i}$ – площа відповідного фасаду.

Таблиця 3.3. Орієнтовні значення $\mu_{скл}$ для житлового NZEB

Орієнтація фасаду	Рекомендоване $\mu_{скл}$, %	Примітка
Південний	25–40	Максимізація пасивних теплоприпливів, обов’язковий сонцезахист
Південний-схід / південний-захід	20–30	Компроміс між освітленням і перегрівом
Східний	15–25	Ранкове сонце, бажаний сонцезахист
Західний	10–20	Високий ризик перегріву ввечері
Північний	5–15	Мінімізація тепловтрат

Інсоляція та пасивне використання сонячної енергії

Сонячна інсоляція визначає потенціал пасивного обігріву та природного освітлення. Для NZEB важливо:

- забезпечити *достатню тривалість інсоляції* житлових приміщень у холодний період;
- обмежити *надмірне сонячне надходження* влітку;
- врахувати *затінення* від сусідньої забудови, дерев, рельєфу.

Сумарні пасивні теплові надходження через засклення приблизно можна оцінити:

$$Q_{\text{solar}} = \Sigma A_{\text{вік},i} \cdot g_{\text{tot},i} \cdot I_i \cdot F_{\text{sh},i,} \qquad (3.5)$$

де $A_{\text{вік},i}$ – площа вікон на фасаді з орієнтацією i,

$g_{\text{tot},i}$ – загальний коефіцієнт сонячного пропускання (склопакет + сонцезахист),

I_i – середня за період сонячна радіація на вертикальну площину орієнтації i,

$F_{\text{sh},i,}$ – коефіцієнт затінення (0…1).

Для оцінки ризику перегріву вводять *коефіцієнт літніх надходжень*:

$$\phi_{\text{summer}} = Q_{\text{solar,summer}}/A_{\text{оп}}, \qquad (3.6)$$

де $Q_{\text{solar,summer}}$ – сумарні сонячні надходження за літні місяці,

$A_{\text{оп}}$ – опалювана площа будівлі.

При надто великих значеннях ϕ_{summer} необхідно збільшувати рівень сонцезахисту або зменшувати площу засклення.

Віконні системи як елемент пасивного енергозбереження

Вікна в NZEB одночасно є:

- джерелом *тепловтрат* (через теплопровідність і інфільтрацію);
- джерелом *пасивних теплоприпливів*;
- засобом забезпечення *природного освітлення*.

Для досягнення балансу необхідно:

- Використовувати *енергоефективні склопакети* з низьким коефіцієнтом теплопередачі U_{window} та низькоемісійними покриттями.

- Забезпечити *герметичний монтаж* вікон у площині теплоізоляційного шару.
- Застосовувати *зовнішній сонцезахист* (жалюзі, ролети, маркізи, козирки).

Кількісно тепловтрати через вікна оцінюються:

$$Q_{\text{loss, w}} = U_{\text{window}} \cdot A_{\text{вік}} \cdot \Delta T_{\text{р}} \cdot t_{\text{оп}}, \quad (3.7)$$

де $A_{\text{вік}}$ – сумарна площа світлопрозорих конструкцій,

$\Delta T_{\text{р}}$ – розрахункова різниця температур,

$t_{\text{оп}}$ – тривалість опалювального періоду (у годинах).

Таблиця 3.4. Порівняння орієнтовних параметрів віконних систем

Тип вікна	U_{window}, Вт/(м²·К)	g (сонячний коеф.)	Примітка
Одинарне скло	4,5–5,0	0,75–0,85	Великі втрати, практично не застосовується
Подвійний склопакет без покриття	2,6–3,0	0,65–0,75	Недостатньо для NZEB
Подвійний Low-E	1,3–1,5	0,55–0,65	Можливий варіант для реконструкції
Трипакет Low-E	0,7–1,0	0,45–0,55	Рекомендовано для NZEB

Поєднання орієнтації, інсоляції та віконних систем

Ефективність пасивних методів енергозбереження визначається комбінованою дією трьох факторів:

1. *Орієнтація будівлі* формує базовий розподіл надходження сонячної енергії по фасадах.
2. *Інсоляція та сонцезахист* регулюють величину сонячних надходжень у різні пори року.
3. *Віконні системи* визначають співвідношення між тепловтратами та пасивними теплоприпливами.

Для попередньої оцінки можна використовувати спрощений *баланс тепла через вікна:*

$$Q_{net} = Q_{solar} - Q_{loss,\ w}, \tag{3.8}$$

де при $Q_{net} > 0$ віконні системи вносять позитивний вклад у тепловий баланс (у зимовий період), а при $Q_{net} < 0$ – є переважно джерелом втрат.

Таблиця 3.5. Якісна оцінка впливу рішень на енергобаланс через вікна

Рішення	**Взимку**	**Влітку**
Велике південне засклення без сонцезахисту	+ Пасивний обігрів	– Перегрів приміщень
Велике південне засклення із зовнішнім захистом	+ Пасивний обігрів	+ Контрольовані надходження
Велике західне засклення	± Невеликий ефект	– Сильний перегрів увечері
Мінімальне північне засклення	– Зменшення втрат	0 Майже без впливу на перегрів

Отже, як висновок, можна зазначити наступне:

1. Орієнтація будівлі за сторонами світу є одним із найефективніших пасивних інструментів енергозбереження, оскільки дозволяє підвищити частку корисних сонячних теплоприпливів узимку та обмежити перегрів улітку.

2. Раціональне використання інсоляції вимагає одночасного врахування сонячної геометрії, затінення та застосування зовнішніх сонцезахисних пристроїв, що забезпечують сезонно адаптовані теплові надходження.

3. Енергоефективні віконні системи з низьким коефіцієнтом теплопередачі, належним монтажем і продуманим сонцезахистом є ключовим елементом пасивної енергетичної концепції NZEB.

4. Комплексний аналіз орієнтації, інсоляції та параметрів віконних систем на ранніх стадіях проєктування дозволяє істотно знизити потребу в активних системах опалення й охолодження, що є необхідною умовою досягнення нульового або майже нульового енергоспоживання будівлі.

3.3. Теплоізоляційні матеріали та багатошарові огороджувальні конструкції

Теплоізоляційні матеріали та конструкція огороджувальних елементів є одними з ключових чинників енергоефективності будівель з нульовим споживанням енергії (NZEB). Навіть найсучасніші інженерні системи не зможуть забезпечити низьке енергоспоживання, якщо зовнішні стіни, покрівля, перекриття та віконні вузли мають значні тепловтрати, теплові містки або проблеми з вологісним режимом. У цьому підрозділі розглянуто основні типи теплоізоляційних матеріалів, їхні теплотехнічні характеристики, принципи формування багатошарових огороджувальних конструкцій та базові методи їх теплотехнічного розрахунку.

Роль теплоізоляції в NZEB

Для NZEB характерні дуже низькі значення коефіцієнтів теплопередачі огороджувальних конструкцій. Це досягається шляхом:

- збільшення товщини теплоізоляційного шару;
- застосування матеріалів з низькою теплопровідністю;
- формування *безперервного теплоізоляційного контуру*;
- мінімізації теплових містків у вузлах.

Загальні тепловтрати через огороджувальні конструкції наближено описуються:

$$Q_{\text{огр}} = \Sigma U_{\text{j}} \cdot A_{\text{j}} \cdot \Delta T_{\text{р}} \cdot t_{\text{оп}}, \qquad (3.8)$$

де U_{j} – коефіцієнт теплопередачі j-го елемента,

A_{j} – його площа,

$\Delta T_{\text{р}}$ – розрахункова різниця температур (внутрішнє–зовнішнє повітря),

$t_{\text{оп}}$ – тривалість опалювального періоду.

Чим менше U_{j}, тим менші річні тепловтрати й, відповідно, потреби в опаленні.

Основні теплотехнічні характеристики та розрахункові співвідношення

Для оцінки теплоізоляційних властивостей конструкції використовуються:

- *коефіцієнт теплопровідності матеріалу* λ, Вт/(м·К);

Основна характеристика – *коефіцієнт теплопровідності* λ, Вт/(м·К). Чим нижче λ, тим кращі теплоізоляційні властивості.

Таблиця 3.6. Орієнтовні теплотехнічні характеристики поширених теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	λ, Вт/(м·К)	Густина, кг/м³	Особливості
Мінеральна вата (плити)	0,035–0,040	30–120	Негорюча, паропроникна
Скловата	0,036–0,042	15–60	Легка, волокниста
Пінополістирол (EPS)	0,035–0,040	12–25	Низька вартість, обмежена паропроникність
Екструдований ППС (XPS)	0,032–0,038	30–45	Висока міцність, водостійкість
Пінополіізоціанурат (PIR/PUR)	0,022–0,028	30–40	Дуже низька (\lambda), жорсткі плити
Целюлозна вата (ековата)	0,038–0,042	30–60	Насипна/надувна, екологічна
Деревоволокнисті плити	0,038–0,050	50–200	Добра паропроникність, теплоємність

- *тепловий опір* шару R_i, м²·К/Вт:

$$R_i = d_i/\lambda_i, \tag{3.9}$$

де d_i – товщина шару, м;

- *загальний тепловий опір конструкції:*

$$R_\Sigma = R_{si} + \Sigma R_i + R_{se}, \tag{3.10}$$

де R_{si}, R_{se} – внутрішній та зовнішній поверхневі опори теплопередачі;

- *коефіцієнт теплопередачі* (U-value):

$$U = 1/R_{\Sigma}. \quad (3.11)$$

У NZEB зазвичай орієнтуються на значення U для зовнішніх стін рівня 0,10–0,20 Вт/(м²·К), для покрівлі – 0,08–0,15 Вт/(м²·К).

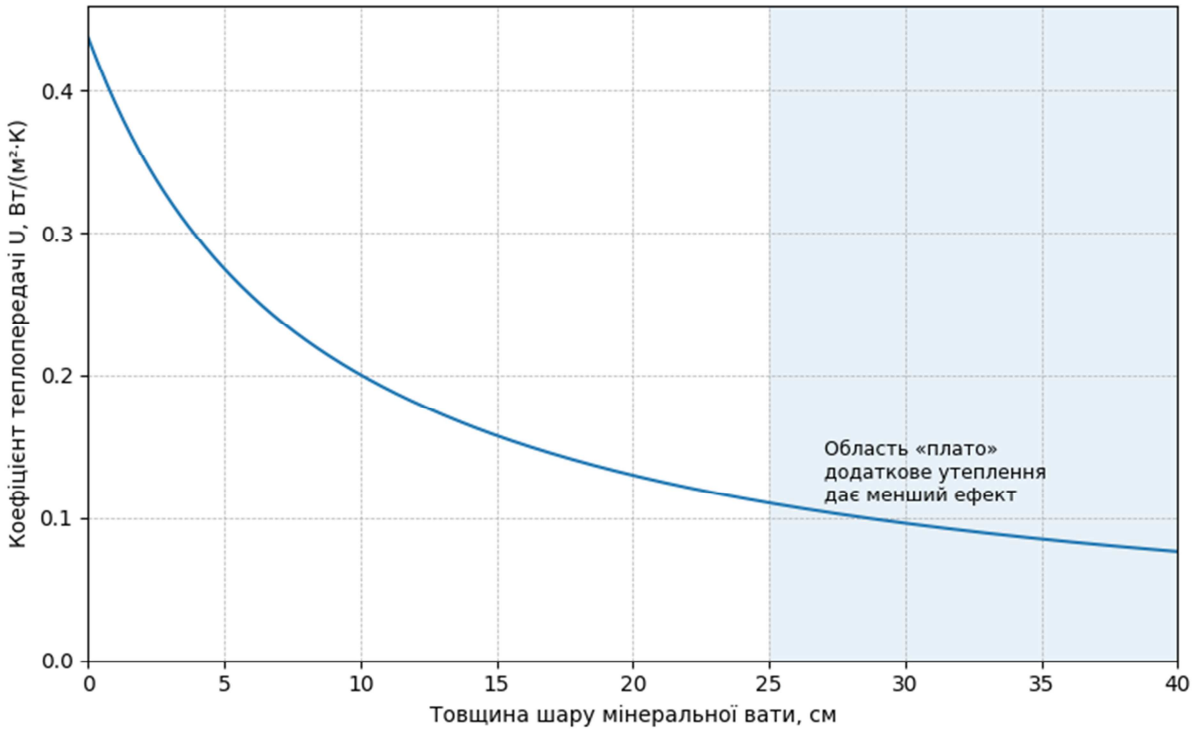

Рис. 3.2. Залежність U від товщини шару мінеральної вати.

Принципи формування багатошарових огороджувальних конструкцій

Загальний принцип послідовності шарів “із середини назовні”:

1. *Внутрішнє оздоблення* (гіпсокартон, штукатурка).
2. *Пароізоляційний шар* (плівка, мембрана, фарба з високим μ) – обмежує дифузію вологи з теплого вологого повітря всередині.
3. *Несучий шар* (цегла, бетон, каркас).
4. *Теплоізоляція* (один або кілька шарів).
5. *Вітрозахисний/гідрозахисний шар* – захист від вітру та зовнішньої вологи, при цьому бажана паропроникність назовні.
6. *Зовнішнє оздоблення* (штукатурка, фасадні плити, вентильований фасад).

Приклад теплотехнічного розрахунку багатошарової стіни

Розглянемо приклад зовнішньої стіни NZEB (з внутрішнім оздобленням, несучим газобетоном та зовнішнім утепленням мінеральною ватою).

Таблиця 3.7. Приклад складу та розрахунку технічного опору стіни

№	Шар	Товщина d_i, м	λ_i, Вт/(м·К)	$R_i = d_i/\lambda_i$, м²·К/Вт
–	Внутрішній поверхневий опір R_{si}	–	–	0,13
1	Гіпсова штукатурка	0,015	0,70	0,021
2	Газобетонний блок	0,250	0,12	2,083
3	Теплоізоляція (мінеральна вата)	0,200	0,037	5,405
4	Штукатурка по сітці	0,010	0,87	0,011
–	Зовнішній поверхневий опір R_{se}	–	–	0,04

$$R_{si} = 0{,}13 + 0{,}021 + 2{,}083 + 5{,}405 + 0{,}011 + 0{,}04 \approx 7{,}69 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт},$$

$$U = 1/7{,}69 \approx 0{,}13 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

що відповідає високому рівню теплозахисту, характерному для NZEB.

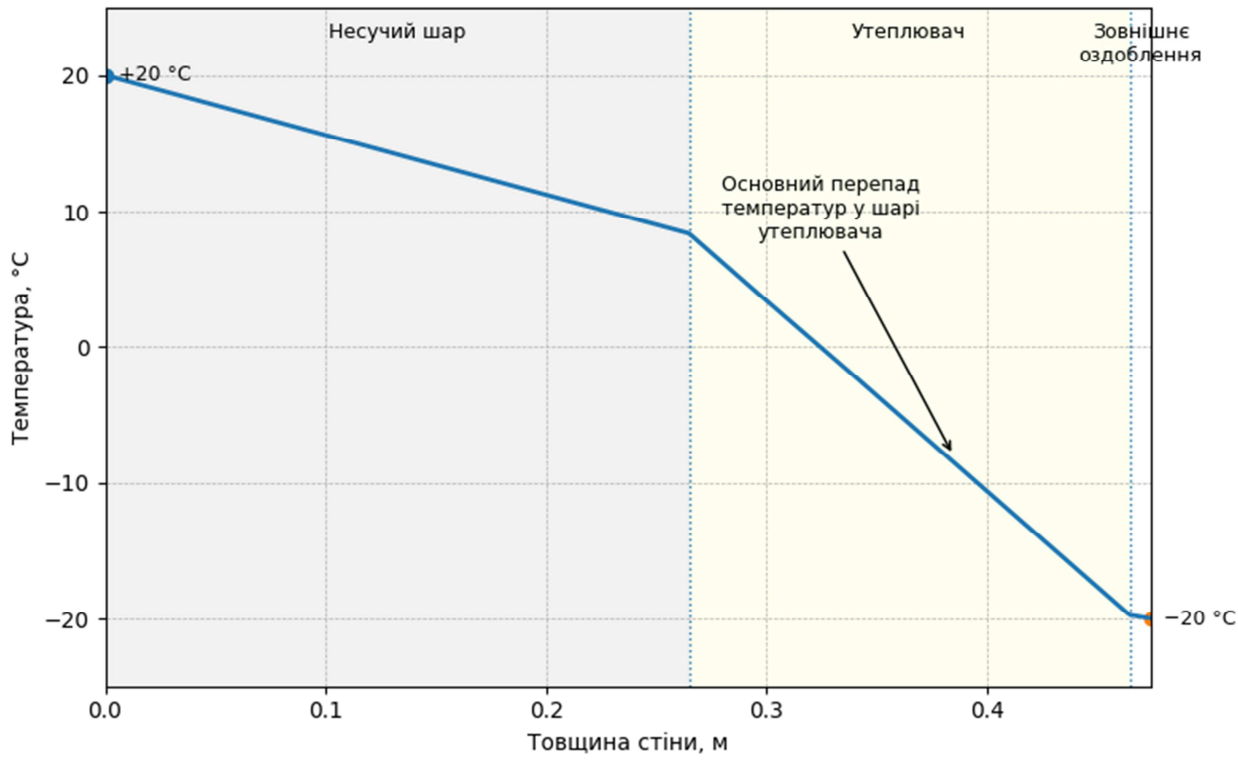

Рис. 3.3. Розподіл температури по товщині стіни взимку.

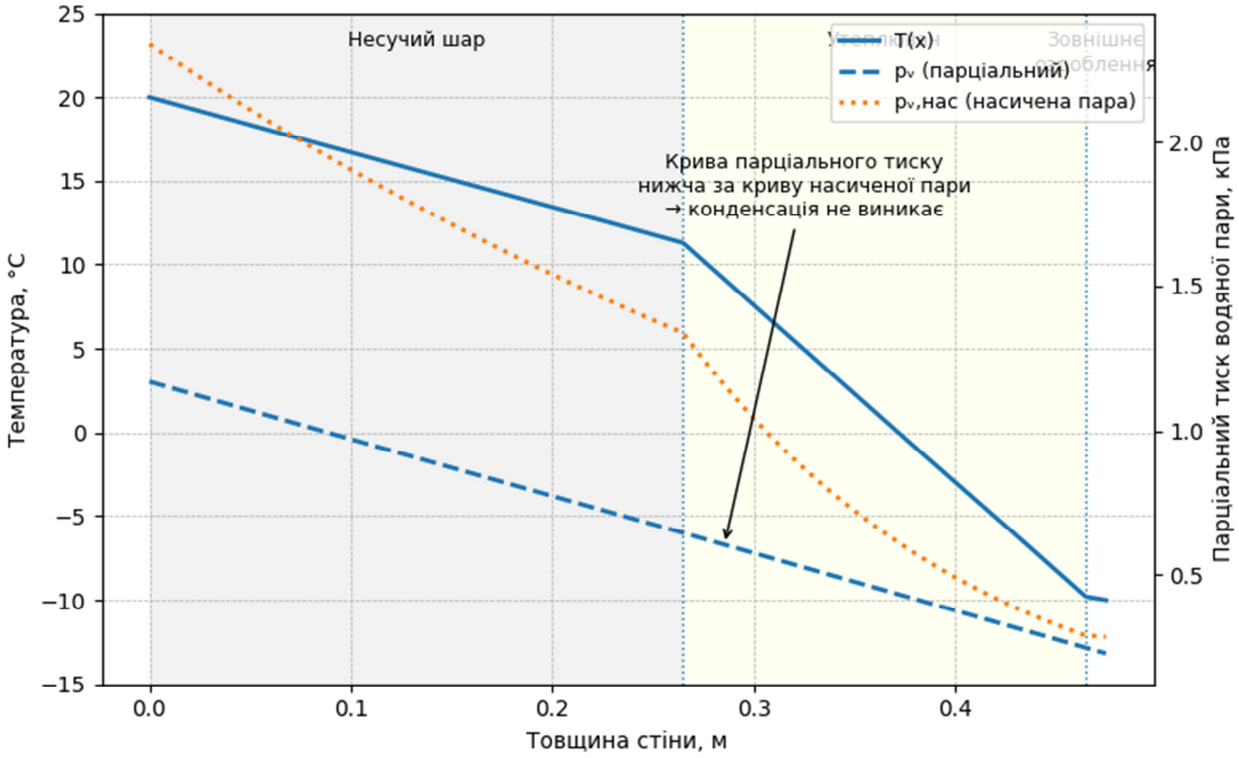

Рис. 3.4. Розподіл температури та парціального тиску водяної пари по товщині стіни.

У разі неправильного підбору шарів (наприклад, паронепроникний утеплювач зовні та «відкритий» всередині) можливе накопичення вологи з наступним:

- зниженням теплоізоляційних властивостей;
- появою плісняви;
- руйнуванням матеріалів.

Теплові містки та конструктивні вузли

Навіть ідеально розрахований за плоскою схемою «шаруватий пиріг» може втрачати ефективність через *лінійні та точкові теплові містки:*

- місця примикання стін до перекриттів;
- кути будівлі;
- зони опирання балконних плит;
- стики каркасних елементів;
- вузли монтажу вікон, дверей, кріплення навісних конструкцій.

Їх вплив враховують через *лінійні коефіцієнти теплопередачі* ψ, Вт/(м·К) та *точкові* χ, Вт/К.

Сумарні тепловтрати з урахуванням теплових містків:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{j} U_j A_j \Delta T + \sum_{k} \psi_k L_k \Delta T + \sum_{m} \chi_m \Delta T , \qquad (3.12)$$

де L_k – довжина k-го теплового містка,

ΔT – розрахункова різниця температур.

3.4. Теплоізоляційні матеріали та багатошарові огороджувальні конструкції

Герметичність оболонки будівлі, правильна організація пароізоляції та застосування механічної вентиляції з рекуперацією тепла є критично важливими складовими концепції будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB). Навіть за високих теплоізоляційних характеристик огороджувальних конструкцій неконтрольована інфільтрація повітря, некоректний вологісний режим у шарах конструкцій та відсутність ефективного повітрообміну призводять до значних тепловтрат, конденсації вологи, погіршення мікроклімату та зниження довговічності будівлі.

Роль герметичності оболонки будівлі

Герметичність огороджувальних конструкцій визначає величину неконтрольованого повітрообміну через щілини, стики, нещільності монтажу вікон, дверей, проходів інженерних комунікацій тощо. Цей неконтрольований повітрообмін (інфільтрація/екфільтрація):

- збільшує *тепловтрати* в опалювальний період;
- погіршує *керованість мікроклімату*;
- може спричиняти *конденсацію вологи* у конструкціях (при перенесенні теплого вологого повітря у холодні зони).

Рівень герметичності зазвичай характеризується *кратністю повітрообміну при різниці тиску 50 Па:*

$$n_{50} = V_{50}/V_{оп};$$

де V_{50} – об’ємний витрата повітря при випробуванні (м³/год),

$V_{оп}$ – опалюваний об’єм будівлі (м³).

Для будівель NZEB орієнтовні цільові значення n_{50}:

- ≤ 0,6 1/год – рівень пасивного будинку;
- ≤ 1,0–1,5 1/год – високоефективні будівлі.

Таблиця 3.8. Орієнтовна класифікація герметичності будівель за n_{50}

Клас будівлі	n_{50}, 1/год	Оцінка герметичності
Традиційна забудова	3,0–7,0	Низька
Покращена енергоефективність	1,5–3,0	Середня
Високоефективні будівлі	1,0–1,5	Висока
Пасивні/NZEB	≤ 0,6–1,0	Дуже висока

Втрати тепла через інфільтрацію повітря

Тепловтрати через неконтрольований повітрообмін можна оцінити:

$$Q_{інф} = V \cdot \rho \cdot c_р \cdot \Delta T \cdot t, \qquad (3.13)$$

де V – об’ємна витрата повітря (м³/с),

ρ – густина повітря (кг/м³, орієнтовно 1,2),

$c_р$ – питома теплоємність повітря (~1000 Дж/(кг·К)),

ΔT – різниця температур (внутрішнє–зовнішнє повітря),

t – час (с).

Наближено можна записати питомі втрати потужності:

$$Q_{інф} \approx 0{,}34 \cdot V\, \Delta T, \qquad (3.14)$$

де $Q_{інф}$ у Вт, V у м³/год, ΔT у К.

Зменшення V шляхом підвищення герметичності оболонки прямо знижує ці втрати.

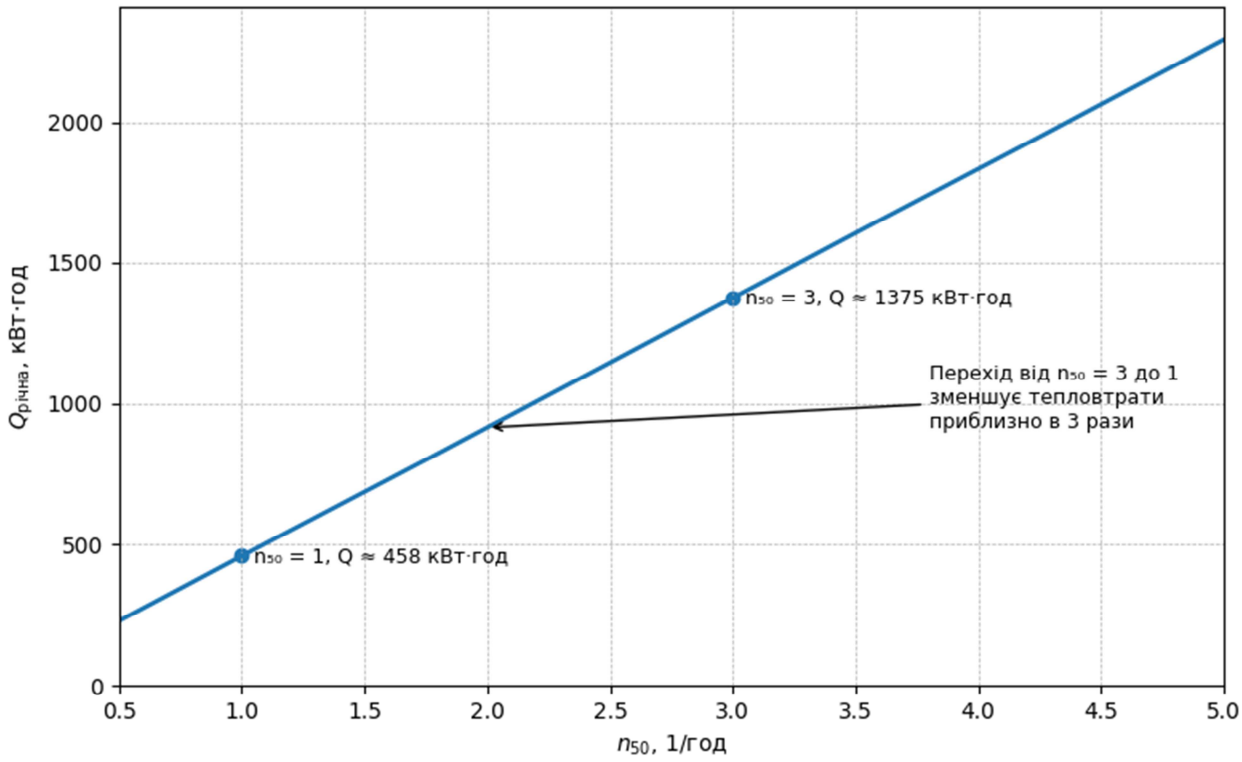

Рис. 3.5. Залежність річних тепловтрат через інфільтрацію від n_{50} для будівлі з опалюваним об’ємом 300 м³:

Пароізоляція та вологісний режим огороджувальних конструкцій

Пароізоляція – це система матеріалів і шарів, що обмежують дифузію водяної пари з внутрішнього повітря в товщу огороджувальної конструкції. У герметичних будівлях NZEB, де інфільтрація мінімальна, *роль дифузійного перенесення вологи зростає*, і помилки в організації пароізоляції можуть призвести до:

- конденсації вологи в товщі конструкції;
- зниження теплоізоляційних властивостей;
- утворення плісняви, грибка;
- деградації матеріалів.

Кількісно опір дифузії описується:

$$S_{d,i} = \mu_i \cdot d_i,$$

де $S_{d,i}$ – еквівалентна товщина повітряного шару (м),

μ_i – коефіцієнт опору дифузії водяної пари,

d_i – товщина шару.

Загальне правило: *з боку приміщення* – шари з більшим S_d (сильніший паробар'єр), *зовні* – шари з меншим S_d (більша паропроникність).

Таблиця 3.9. Орієнтовні значення μ для типових матеріалів

Матеріал	μ, *– (відносно повітря)*
Гіпсова штукатурка	5–10
Газобетон	5–10
Мінеральна вата	1–3
Плівка пароізоляційна	50000–100000
OSB-плита	50–200
Вітрозахисна мембрана	5–20
Фасадна штукатурка	10–20

У сучасних NZEB часто розрізняють:

- *повітряно-герметичний контур* – шар/система шарів, що забезпечує відсутність неконтрольованих повітряних протікань;
- *паровий контур* – шар/система шарів, що регулює дифузію водяної пари.

В окремих рішеннях ці функції може виконувати *один і той самий шар* (наприклад, поліетиленова пароізоляція, паробар'єрні мембрани), але в інших – вони рознесені (герметизація штукатуркою, стрічками, герметиками + окрема дифузійно-активна пароізоляція).

Ключові положення:

- повітряний контур має бути *замкненим і безперервним* (без розривів по стиках, отворах);
- усі *проходи інженерних мереж* через огороджувальні конструкції повинні бути герметизовані;
- бажано уникати *складних геометричних рішень*, що ускладнюють формування суцільного контуру.

Необхідність механічної вентиляції з рекуперацією в герметичних будівлях

У високо герметичних будівлях природна інфільтрація стає недостатньою для забезпечення нормативного повітрообміну. Без належної вентиляції виникають:

- підвищена вологість повітря, конденсат на вікнах;
- погіршення якості повітря (CO_2, леткі органічні сполуки, запахи);
- ризики для здоров’я мешканців та будівельних конструкцій.

Тому у NZEB *механічна вентиляція з рекуперацією тепла* є *обов’язковою умовою*. Типова система включає:

- припливно-витяжні повітропроводи;
- центральний вентиляційний агрегат з рекуператором (пластинчастим, роторним, протитечійним);
- фільтри, вентилятори, автоматику регулювання.

Ефективність рекуперації тепла характеризується коефіцієнтом:

$$\eta_t = (T_{\text{пр,вих}} - T_{\text{зовн}})/(T_{\text{вид,вх}} - T_{\text{зовн}}), \quad (3.15)$$

де $T_{\text{пр,вих}}$ – температура повітря після рекуператора (приплив),

$T_{\text{зовн}}$ – температура зовнішнього повітря,

$T_{\text{вид,вх}}$ – температура витяжного повітря з приміщень.

Для NZEB доцільно застосовувати рекуператори з $\eta_t > 80$ %.

Таблиця 3.10. Орієнтовні характеристики систем вентиляції

Тип системи	η_t, %	Потреба в теплі на підігрів припливу	Доцільність для NZEB
Природна вентиляція (без рекуперації)	0	Дуже висока	Недоцільна
Механічна без рекуперації	0–10	Висока	Обмежено
Механічна з простим рекуператором	50–70	Помірна	Можливо
Механічна з високоефективним рекуператором	80–90	Низька	Рекомендовано

Вплив рекуперації на енергетичний баланс будівлі

Тепловтрати на вентиляцію без рекуперації можна визначити за спрощеною формулою (3.14).

За наявності рекуператора з ефективністю η_t реальні втрати становлять:

$$Q_{вент} = Q_{вент,0} (1 - \eta_t). \quad (3.16)$$

Наприклад, при $\eta_t = 80\%$ тепловтрати через вентиляцію зменшуються у 5 разів.

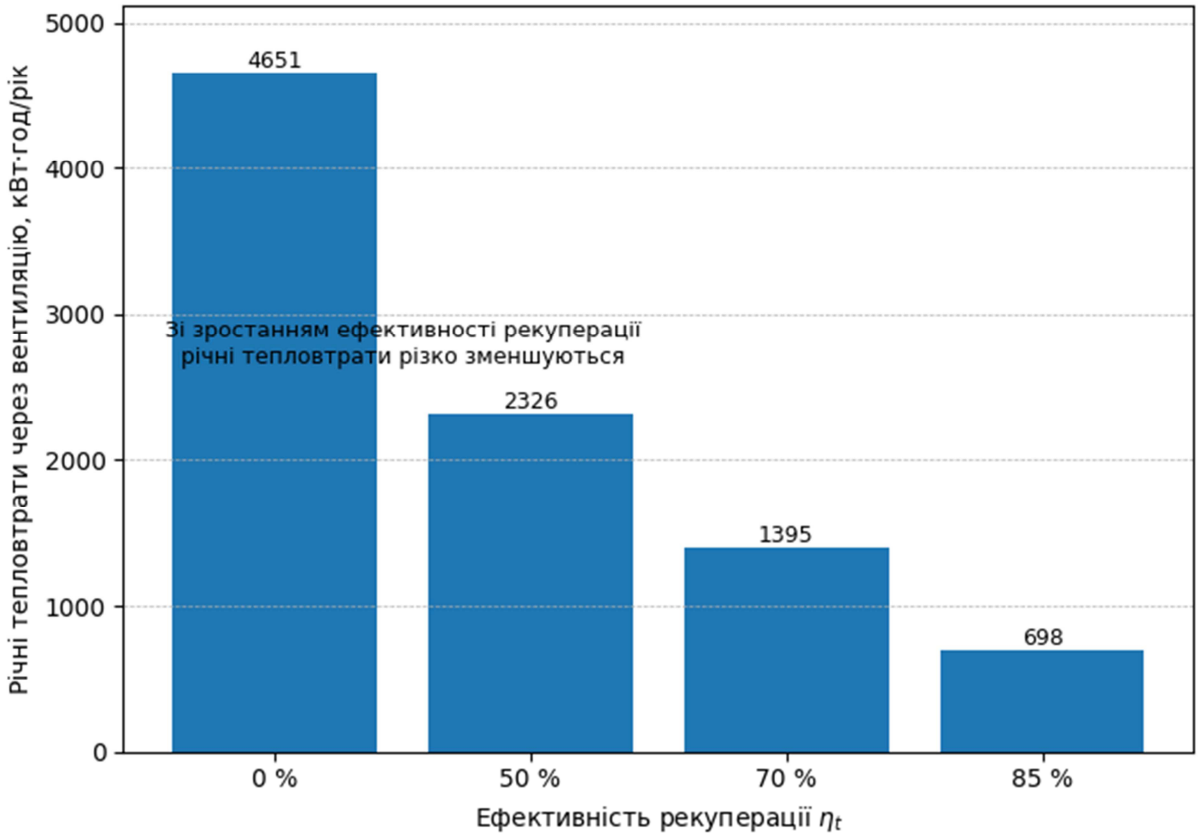

Рис. 3.6. Порівняння річних тепловтрат через вентиляцію для будівлі з витратою повітря 150 м³/год при різних η_t.

Інтеграція герметичності, пароізоляції та вентиляції в концепцію NZEB

Висока герметичність оболонки будівлі, коректна пароізоляція та система вентиляції з рекуперацією – це взаємопов’язані елементи:

- герметична оболонка *зменшує неконтрольовані втрати* та робить повітрообмін керованим;
- пароізоляція та дифузійно збалансована структура конструкцій *захищають від накопичення вологи*;
- вентиляція з рекуперацією забезпечує *свіже повітря з мінімальними тепловтратами*.

Таблиця 3.11. Узагальнення ролі систем у NZEB.

Система	Основна функція	Наслідок для NZEB
Герметичність	Мінімізація інфільтрації	Зменшення тепловтрат
Пароізоляція	Керування дифузією вологи	Довговічність конструкцій
Вентиляція з рекуперацією	Забезпечення нормативного повітрообміну з мінімальними втратами тепла	Комфорт і енергоефективність

Отже, слід зазначити наступне:

1. Герметичність оболонки будівлі є одним із ключових факторів енергоефективності NZEB, оскільки дозволяє істотно знизити неконтрольовані втрати через інфільтрацію та забезпечити керований повітрообмін.

2. Правильно організована пароізоляція та дифузійно збалансована структура багатошарових огороджувальних конструкцій запобігають накопиченню вологи, конденсації та деградації матеріалів, що є критично важливим у герметичних будівлях.

3. Механічна вентиляція з високоефективною рекуперацією тепла є обов’язковим елементом NZEB, який дозволяє забезпечити нормативну якість повітря при мінімально можливих тепловтратах.

4. Комплексний підхід до проєктування герметичності, пароізоляції та вентиляції з рекуперацією створює основу для досягнення нульового або майже нульового річного енергоспоживання будівлі при високому рівні комфорту та довговічності конструкцій.

3.5. Висновки до розділу

1. Компактна форма будівлі, раціональна орієнтація за сторонами світу, функціональне зонування приміщень та безперервний теплоізоляційний контур огороджувальних конструкцій визначають базовий рівень енергоефективності NZEB ще на архітектурно-планувальній стадії, суттєво зменшуючи тепловтрати та ризики перегріву.

2. Пасивні методи енергозбереження (орієнтація будівлі, оптимальне використання інсоляції та енергоефективні віконні системи із зовнішнім сонцезахистом) дозволяють істотно знизити потребу в опаленні, охолодженні та штучному освітленні, формуючи основу для досягнення нульового або майже нульового енергоспоживання.

3. Застосування теплоізоляційних матеріалів з низькою теплопровідністю, достатньою товщиною та правильним формуванням багатошарових огороджувальних конструкцій з мінімізацією теплових містків забезпечує низькі значення коефіцієнтів теплопередачі і стабільний тепловий та вологісний режим, необхідний для NZEB.

4. Висока герметичність оболонки будівлі, грамотно організована пароізоляція та механічна вентиляція з рекуперацією тепла є взаємопов’язаними елементами, які дозволяють різко знизити втрати через інфільтрацію, запобігти накопиченню вологи в конструкціях і забезпечити нормативну якість повітря при мінімальних енерговитратах.

РОЗДІЛ 4
ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА: ПРОЄКТ БУДИНКУ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

У практичній частині магістерської роботи розглядається умовний проєкт житлового будинку з нульовим споживанням енергії (NZEB), що запроєктований для експлуатації в кліматичних умовах центральної частини України (умовно – район м. Києва).

4.1. Характеристика об’єкта та вихідних даних

Об’єктом дослідження є двоповерховий житловий будинок індивідуальної забудови, призначений для постійного проживання сім’ї з 3–4 осіб.

Основні архітектурно-планувальні параметри:

- тип будівлі – окремо розташований житловий будинок;
- поверховість – 2 надземних поверхи;
- орієнтація – довга сторона будинку орієнтована на південь;
- форма плану – прямокутник 10×8 м;
- конструктивна схема – стінова (несучі зовнішні стіни + внутрішні несучі/самонесучі перегородки);
- покрівля – плоска (умовно) або малопохила, утеплена;
- фундамент – стрічковий/монолітний з утепленням по контуру.

Прийнята внутрішня висота поверху – 2,8 м.

1. Розрахункові геометричні характеристики:

- габарити в плані – 10 м (південь–північ) × 8 м (схід–захід);
- опалювана площа будівлі

$$A_{оп} = 10 \cdot 8 \cdot 2 = 160 м^2;$$

- опалюваний об’єм будівлі

$$Vоп = 10 \cdot 8 \cdot 2{,}8 \cdot 2 = 448 м^3;$$

- периметр будівлі в плані

$$P = 2(10 + 8) = 36 \text{ м};$$

- площа зовнішніх стін (без урахування отворів)

$$A_{\text{стін}} = P \cdot 2{,}8 \cdot 2 \approx 201{,}6 \text{ м}^2;$$

- площа покрівлі

$$A_{\text{покр}} = 10 \cdot 8 = 80 \text{ м}^2.$$

2. Функціонально-планувальна структура

Функціональне зонування будинку виконується з урахуванням принципів енергоефективного розподілу приміщень:

- *південна частина будівлі* – вітальня, їдальня, спальні з підвищеним рівнем природної освітленості та пасивними сонячними надходженнями;
- *центральна частина* – кухня, санвузли, комори;
- *північна частина* – сходова клітка, гардероб, технічне приміщення, тамбур.

Таке зонування дозволяє *зменшити тепловтрати* через огороджувальні конструкції у зонах з менш критичними вимогами до температури та максимально використати інсоляцію в житлових приміщеннях.

3. Кліматичні та експлуатаційні умови

Для розрахунків приймаються кліматичні умови, характерні для центральної частини України (умовно – район м. Києва):

- розрахункова температура зовнішнього повітря взимку (за опалювальний період)

$$t_{\text{зовн, розр}} = -22°\text{C};$$

- середня розрахункова внутрішня температура в житлових приміщеннях

$$t_{\text{вн}} = +20°\text{C};$$

- розрахункова різниця температур

$$\Delta T_{\text{р}} = t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн, розр}} = 42 \text{ К};$$

- тривалість опалювального періоду – $t_{\text{оп}} \approx 180$–$200$ діб (залежно від подальших прийнятих допущень);
- середня швидкість вітру в опалювальний період – 3–4 м/с (для оцінки інфільтраційних процесів).

Умови експлуатації:

- кількість постійних мешканців – *3–4 особи*;

- режим проживання – *цілорічний;*

- внутрішні надходження тепла – від побутових приладів, освітлення, людей (будуть уточнені в енергетичному балансі);

- режим вентиляції – механічна припливно-витяжна вентиляція з рекуперацією.

Таблиця 4.1. Основні кліматичні та експлуатаційні параметри для розрахунків

Параметр	Позначення	Значення	Од.
Розрахункова зовнішня температура взимку	$t_{\text{зовн, розр}}$	–22	°С
Розрахункова внутрішня температура	$t_{\text{вн}}$	+20	°С
Різниця температур	$\Delta T_{\text{р}}$	42	К
Тривалість опалювального періоду	$t_{\text{оп}}$	180–200	діб
Кількість мешканців	–	3–4	осіб
Тип вентиляції	–	Механічна з рекуперацією	–

4. Геометричні параметри та площі огороджувальних конструкцій

Для подальших теплотехнічних та енергетичних розрахунків необхідно задати площі основних елементів огороджувального контуру будинку.

Розподіл площ фасадів (без урахування отворів):

- південний фасад:

$$A_{\text{S}} = 10 \cdot 2{,}8 \cdot 2 = 56\,\text{м}^2;$$

- північний фасад:

$$A_{\text{N}} = 56\ \text{м}^2;$$

- східний фасад:

$$A_{\text{E}} = 8 \cdot 2{,}8 \cdot 2 = 44{,}8\,\text{м}^2;$$

- західний фасад:

$$A_{\text{W}} = 44{,}8\ \text{м}^2.$$

Прийняті площі засклення за орієнтацією (відповідно до рекомендацій з попередніх розділів):

- південний фасад – коефіцієнт засклення $\mu_{скл,S} \approx 0{,}35$:

$$A_{вік,S} \approx 0{,}35 \cdot 56 \approx 19{,}6 \text{ м}^2;$$

- північний фасад – $\mu_{скл,N} \approx 0{,}10$:

$$A_{вік,N} \approx 5{,}6 \text{ м}^2;$$

- східний фасад – $\mu_{скл,E} \approx 0{,}20$:

$$A_{вік,E} \approx 8{,}96 \text{ м}^2;$$

- західний фасад – $\mu_{скл,W} \approx 0{,}20$:

$$A_{вік,W} \approx 8{,}96 \text{ м}^2.$$

Сумарна площа вікон:

$$A_{вік,\Sigma} = 19{,}6 + 5{,}6 + 8{,}96 + 8{,}96 \approx 43{,}1 \text{ м}^2.$$

Тоді орієнтовна площа *непрозорих стін:*

$$A_{стін,непр} = A_{стін} - A_{вік,\Sigma} \approx 201{,}6 - 43{,}1 \approx 158{,}5 \text{ м}^2.$$

Таблиця 4.2. Площі огороджувальних конструкцій

Елемент	Позначення	Площа, м²
Зовнішні стіни (загальна)	$A_{стін}$	201,6
Непрозорі стіни	$A_{стін,непр}$	≈ 158,5
Вікна, південний фасад	$A_{вік,S}$	≈ 19,6
Вікна, північний фасад	$A_{вік,N}$	≈ 5,6
Вікна, східний фасад	$A_{вік,E}$	≈ 9,0
Вікна, західний фасад	$A_{вік,W}$	≈ 9,0
Покрівля	$A_{покр}$	80
Підлога по ґрунту/над холодним простором	$A_{підл}$	80

(Уточнення площ дверей та інших отворів буде виконано на наступних етапах розрахунків.)

5. Теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій (прийняті значення)

Відповідно до вимог NZEB та попереднього теоретичного обґрунтування приймаються такі цільові коефіцієнти теплопередачі:

- зовнішні стіни:

$$U_{стін} = 0{,}13 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

- покрівля:

$$U_{\text{покр}} = 0{,}10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)};$$

- підлога по ґрунту:

$$U_{\text{підл}} = 0{,}15 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)};$$

- вікна (енергоефективні склопакети з низькоемісійним покриттям):

$$U_{\text{вік}} = 0{,}8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)};$$

- вхідні двері:

$$U_{\text{двер}} = 1{,}0 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Таблиця 4.3. Прийняті *U*-значення огороджувальних елементів

Елемент	Позначення	*U*, Вт/(м²·К)
Зовнішні стіни	$U_{\text{стін}}$	0,13
Покрівля	$U_{\text{покр}}$	0,10
Підлога	$U_{\text{підл}}$	0,15
Вікна	$U_{\text{вік}}$	0,80
Двері зовнішні	$U_{\text{двер}}$	1,00

Ці значення будуть використані в наступних підрозділах для розрахунку тепловтрат через огороджувальні конструкції та визначення річних енергетичних потреб будинку.

6. Вихідні дані для інженерних систем та енергетичних розрахунків

Для проєктування енергетичної системи NZEB приймаються такі *концептуальні рішення* (які в подальших підрозділах будуть деталізовані й розраховані):

- система опалення та частково охолодження – *тепловий насос типу «ґрунт–вода» або «повітря–вода»* з низькотемпературною системою теплої підлоги;
- система вентиляції – *механічна припливно-витяжна вентиляція з рекуперацією тепла* (ефективність $\eta_t \geq 80\%$));
- система гарячого водопостачання – на базі теплового насоса з акумуляційним баком;
- система електропостачання – *мережева фотоелектрична установка* з можливістю роботи в гібридному режимі (з акумуляцією електроенергії);

- цільові параметри повітрообміну:

- кратність повітрообміну при нормальній експлуатації $n \approx 0{,}4–0{,}5$ 1/год;

- показник герметичності будівлі: $n_{50} \leq 1{,}0$ 1/год.

4.2. Обґрунтування архітектурних рішень

Архітектурні рішення в проєкті будинку з нульовим енергоспоживанням визначають початковий рівень енергоефективності й суттєво впливають на подальші результати теплотехнічних та енергетичних розрахунків.

1. Вибір об'ємно-планувальної структури та коефіцієнта компактності

Як було прийнято у п. 4.1, будинок має прямокутний план 10×8 м та два надземні поверхи. Таке рішення відповідає принципу *компактності форми*, що є одним із ключових у проєктуванні NZEB.

За даними п. 4.1:

$$A_{\text{стін}} = 201{,}6 \text{ м}^2;$$

$$A_{\text{покр}} = 80 \text{ м}^2;$$

$$A_{\text{підл}} = 80 \text{ м}^2;$$

$$A_{\text{огр}} = 201{,}6 + 80 + 80 = 361{,}6 \text{ м}^2;$$

$$V_{\text{оп}} = 448 \text{ м}^2.$$

Тоді коефіцієнт компактності за (3.2):

$$k_{\text{с}} = 361{,}6/448 \approx 0{,}81 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Значення $k_{\text{с}} \approx 0{,}8$ відповідає *компактній формі* будівлі та знаходиться в рекомендованому для NZEB діапазоні (орієнтовно 0,7–0,9).

2. Орієнтація будинку та використання сонячної енергії

Орієнтація будинку прийнята таким чином, що *довша сторона (10 м) розташована по осі схід–захід*, а головний фасад з найбільшою площею засклення виходить на *південь*. Це відповідає принципам пасивної сонячної архітектури: максимізація корисних теплоприпливів узимку через південне

засклення; мінімізація тепловтрат через північні вікна; зменшення ризику перегріву влітку за рахунок сонцезахисту на східному та західному фасадах.

Фактичні *коефіцієнти засклення фасадів:*

- південний фасад: $A_S = 56$ м^2, $A_{вік,S} \approx 19{,}6$ м^2,

$$\mu_{скл,S} \approx 19{,}6/56 \approx 0{,}35\ (35\%);$$

- північний фасад: $A_N = 56$ м^2, $A_{вік,N} \approx 5{,}6$ м^2,

$$\mu_{скл,N} \approx 0{,}10\ (10\%);$$

- східний і західний фасади: $A_E = A_W = 44{,}8$ м^2, $A_{вік,E} \approx A_{вік,W} \approx 8{,}96$ м^2,

$$\mu_{скл,E} \approx \mu_{скл,W} \approx 0{,}20\ (20\%).$$

Таблиця 4.4. Коефіцієнти засклення фасадів для проєктованого будинку

Орієнтація фасаду	Площа фасаду, м²	Площа вікон, м²	$\mu_{скл}$, %	Коментар
Південний	56	19,6	35	Основні пасивні теплоприпливи
Північний	56	5,6	10	Мінімізація тепловтрат
Східний	44,8	9,0	20	Помірне засклення + захист
Західний	44,8	9,0	20	Помірне засклення + захист

Прийняті значення *узгоджуються з рекомендаціями* для NZEB (більше засклення на півдні, мінімальне – на півночі), а також забезпечують достатній рівень природного освітлення.

3. Функціональне зонування приміщень

Функціонально-планувальні рішення синхронізовані з енергетичними вимогами:

- *з південного боку* розташовані вітальня, їдальня, спальні – приміщення з найбільшою тривалістю перебування людей та потребою в природному освітленні;
- *у центральній частині* – кухня, санвузли, комори, що мають стабільний тепловий режим і менші вимоги до інсоляції;
- *з північного боку* – сходова клітка, гардероб, технічне приміщення, тамбур, що виконують роль *буферної зони* між зовнішнім холодним повітрям та «теплим ядром» будівлі.

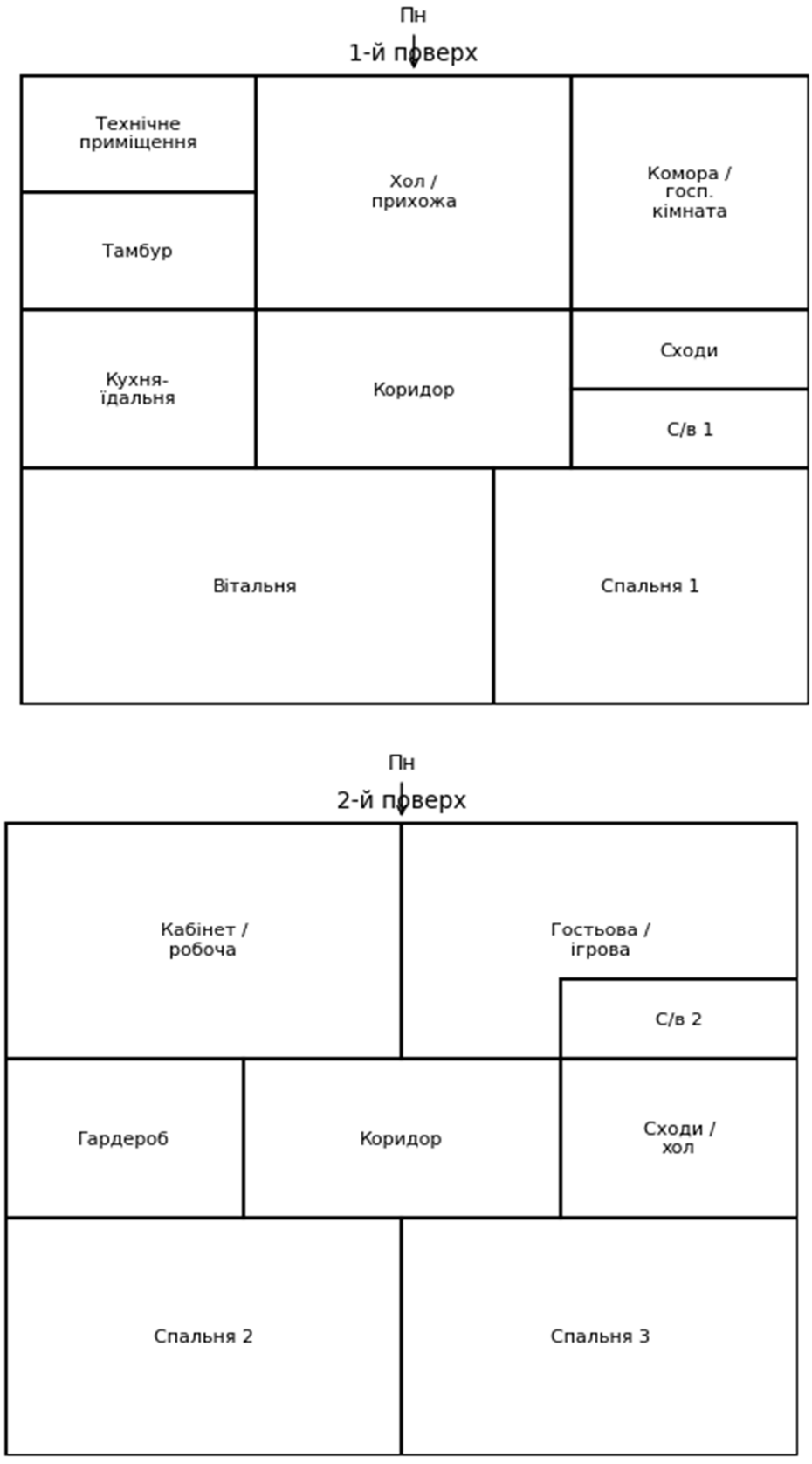

Рис. 4.1. План будинку з виділенням «теплої» житлової зони (південь), «буферної» зони (північ) та нейтральних приміщень у центрі будівлі.

4. Вибір конструктивної схеми та типу огороджувальних конструкцій

Конструктивна схема – стінова з несучими зовнішніми стінами та внутрішніми несучими/самонесучими перегородками.

Як основний матеріал несучих стін прийнято *газобетонні блоки* з *зовнішнім шаром теплоізоляції* (мінеральна вата) за системою «тепла фасадна оболонка». Таке рішення обґрунтовується:

- можливістю формування *безперервного теплоізоляційного контуру* без розривів на рівні перекриттів;
- *зменшенням теплових містків* у вузлах стику «стіна–перекриття–покрівля»;
- сприятливими *теплоакумулюючими властивостями* газобетону в поєднанні з зовнішнім утепленням (внутрішній масив стіни працює як теплоакумулятор);
- технологічністю та широкою практикою застосування у малоповерховому будівництві.

Покрівля – утеплена, по суцільній плиті перекриття (монолітній чи збірній) із теплоізоляційним шаром згори, що дозволяє *винести зону промерзання назовні* та забезпечити відсутність конденсації всередині конструкції.

Підлога по ґрунту – з утепленням по плиті/стяжці, з утепленням фундаменту по зовнішньому контуру, що зменшує *периметральні теплові містки* в зоні контакту стіна–ґрунт.

5. Природне освітлення та співвідношення «вікно–підлога»

Для забезпечення візуального та гігієнічного комфорту інтер’єру прийнято, що *сумарна площа світлопрозорих конструкцій* становить близько:

$$A_{\text{вік},\Sigma} \approx 43{,}1 \text{ м}^2.$$

Відношення площі вікон до опалюваної площі будівлі:

$$\mu_{\text{вік/пл}} = A_{\text{вік},\Sigma}/A_{\text{оп}} = 43{,}1/160 \approx 0{,}27 \ (27\%).$$

Це значення знаходиться у *раціональному діапазоні 20–30 %*, який дозволяє:

- забезпечити достатнє *природне освітлення* житлових приміщень;
- уникнути надмірних тепловтрат через надто велику площу засклення;
- реалізувати ефективні системи *сонцезахисту* (особливо на південному, східному та західному фасадах).

4.3. Розрахунок оптимальної товщини утеплення

Мета цього підрозділу – не просто «підбирати з каталогу» товщину утеплювача, а *обґрунтувати її розрахунково*, поєднуючи теплотехнічні та економічні критерії.

1. Методичні підходи до вибору оптимальної товщини утеплення

Для NZEB товщина утеплення визначається з урахуванням:

1. *Теплотехнічних вимог* – забезпечення необхідного опору теплопередачі R_Σ та цільового коефіцієнта теплопередачі U.

2. *Економічної доцільності* – мінімум приведених витрат за життєвий цикл конструкції (инвестиції + вартість енергії).

Опір теплопередачі багатошарової конструкції:

$$R_\Sigma = R_{si} + \Sigma d_i/\lambda_i + R_{se},$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$U = 1/R_\Sigma.$$

Річні тепловтрати через елемент огородження площею 1 м²:

$$Q_{рік} = U \cdot DD \cdot 24/1000, \text{ [кВт·год/(м}^2\text{·рік)]},$$

де DD – число градусо-доб опалювального періоду, доба·К. Для району умовно приймаємо DD = 3800 доб·К.

Вартість теплоти (з урахуванням джерела теплопостачання, ККД, тарифів тощо) задається як приведена вартість 1 кВт·год тепла, грн/кВт·год. Для розрахункових оцінок приймемо: $C_{тепла}$ = 3,0 грн/кВт·год. (умовна величина з урахуванням можливого зростання тарифів та використання теплового насоса).

Приведені річні витрати на тепло через 1 м² конструкції:

$$Z_{\text{ен}}(d) = Q_{\text{рік}}(d) \cdot C_{\text{тепла}},$$

де d – товщина утеплювача.

Капітальні витрати на утеплення 1 м²:

$$C_{\text{утеп}}(d) = c_V \cdot d,$$

де c_V – вартість 1 м³ утеплювача (матеріал + робота), грн/м³. Приймемо орієнтовно:

$$c_V = 2000 \text{ грн/м}^3.$$

Щоб порівняти капітальні та експлуатаційні витрати, капітальні витрати приводяться до річних за допомогою коефіцієнта приведення

$$\alpha = i/(1 - (1 + i)^{-n}),$$

де i – ставка дисконту (приймемо 5 %), n – розрахунковий строк служби конструкції (приймемо 30 років). Для цих параметрів:

$$\alpha \approx 0{,}065.$$

Тоді річні приведені витрати на утеплення:

$$Z_{\text{утеп}}(d) = C_{\text{утеп}}(d) \cdot \alpha.$$

Сумарні річні приведені витрати на 1 м² огородження:

$$Z_{\Sigma}(d) = Z_{\text{ен}}(d) + Z_{\text{утеп}}(d).$$

Оптимальна товщина утеплення $d_{\text{опт}}$ – та, за якої $Z_{\Sigma}(d)$ мінімальні (з урахуванням обмеження «не менше цільового U для NZEB»).

2. Теплотехнічна модель зовнішньої стіни

Прийнята конструкція зовнішньої стіни (зі сторони приміщення назовні):

1. Гіпсова штукатурка – 15 мм, $\lambda = 0{,}70$ Вт/(м·К);

2. Несучий газобетонний блок – 250 мм, $\lambda = 0{,}12$ Вт/(м·К);

3. Теплоізоляція (мінеральна вата) – товщина d (змінний параметр), $\lambda = 0{,}037$ Вт/(м·К);

4. Зовнішня штукатурка – 10 мм, $\lambda = 0{,}87$ Вт/(м·К).

Поверхневі опори теплопередачі:

$$R_{si} = 0{,}13 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}, \; R_{se} = 0{,}04 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}.$$

Розрахунок теплового опору шарів, крім утеплювача:

- штукатурка внутрішня:

$$R_1 = 0{,}015/0{,}70 \approx 0{,}021 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт},$$

- газобетон:

$$R_2 = 0{,}25/0{,}12 \approx 2{,}083 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт},$$

- штукатурка зовнішня:

$$R_3 = 0{,}01/0{,}87 \approx 0{,}011 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}.$$

Сумарний опір «жорстких» шарів і поверхонь без урахування утеплювача:

$$R_{\text{ін}} = R_{\text{si}} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{se}} = 0{,}13 + 0{,}021 + 2{,}083 + 0{,}011 + 0{,}04 =$$
$$= 2{,}285 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}.$$

Опір шару утеплювача:

$$R_{\text{утеп}}(d) = d/\lambda_{\text{утеп}} = d/0{,}037.$$

Отже, загальний опір стіни:

$$R_\Sigma(d) = R_{\text{ін}} + R_{\text{утеп}}(d) = 2{,}285 + d/0{,}037,$$

а коефіцієнт теплопередачі:

$$U(d) = 1/R_\Sigma(d) = 1/(2{,}285 + d/0{,}037).$$

Для досягнення рівня NZEB приймаємо цільовий діапазон для зовнішніх стін:

$$U_{\text{цільове}} \approx 0{,}10\ldots0{,}15 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

3. Залежність тепловтрат та витрат на енергію від товщини утеплення стіни

Розглянемо кілька варіантів товщини утеплювача:

d = 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 м.

Річні питомі тепловтрати через 1 м^2 стіни:

$$Q_{\text{рік}}(d) = U(d)\cdot DD\cdot 24/1000, DD = 3800 \text{ доб}\cdot\text{К}.$$

Питомі річні витрати на тепло:

$$Z_{\text{ен}}(d) = Q_{\text{рік}}(d)\cdot C_{\text{тепла}},\ C_{\text{тепла}} = 3 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}.$$

Результати зведено до табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Вплив товщини утеплювача стіни на тепловтрати та витрати на енергію (на 1 м^2)

d, см	$U(d)$, Вт/(м^2·К)	$Q_{рік}(d)$, кВт·год/(м^2·рік)	$Z_{ен}(d)$, грн/(м^2·рік)
10	0,200	18,3	54,9
15	0,158	14,4	43,2
20	0,130	11,9	35,6
25	0,111	10,1	30,3
30	0,096	8,8	26,3

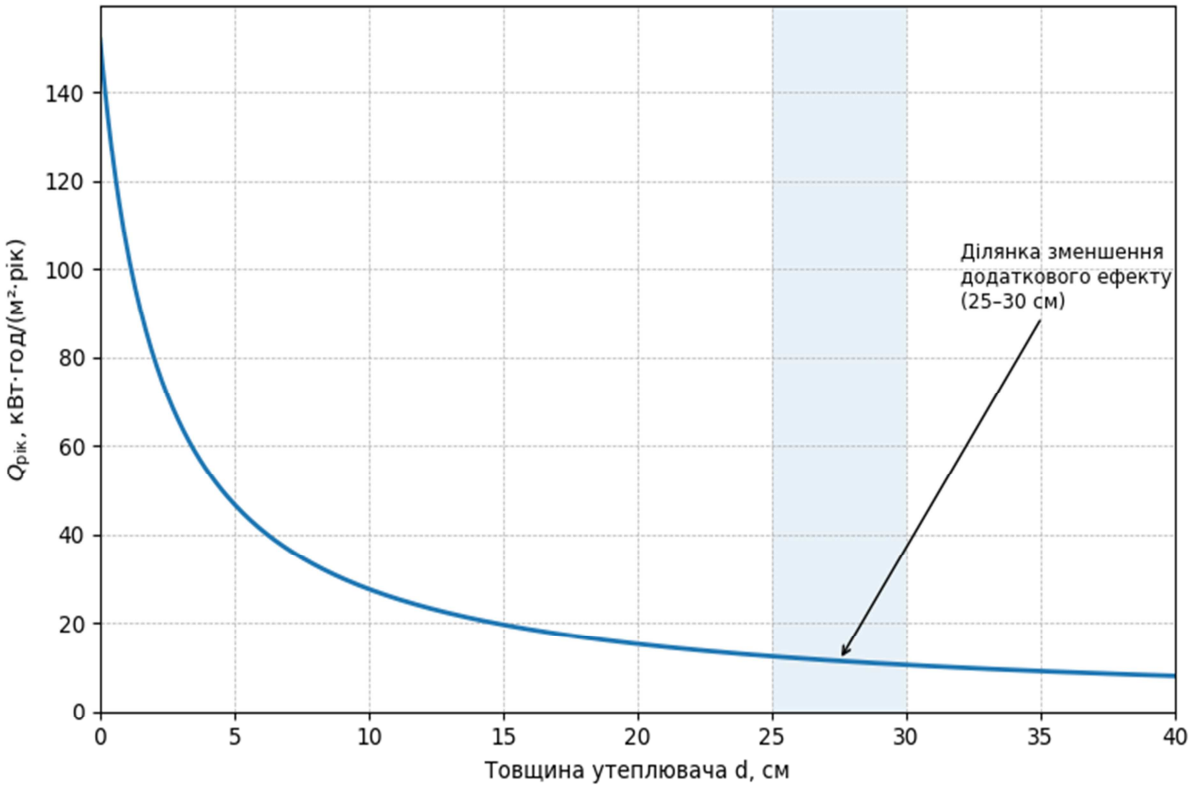

Рис. 4.2. Залежність річних тепловтрат через стіну від товщини утеплювача.

4. Економічна оптимізація товщини утеплення стіни

Капітальні витрати на 1 м² утепленої стіни:

$$C_{утеп}(d) = c_V \cdot d = 2000 \cdot d, \ [грн/м^2].$$

Річні приведені витрати на утеплення:

$$Z_{утеп}(d) = C_{утеп}(d) \cdot \alpha, \ \alpha \approx 0{,}065.$$

Сумарні річні приведені витрати:

$$Z_{\Sigma}(d) = Z_{ен}(d) + Z_{утеп}(d).$$

Розраховані значення наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6. Економічна оцінка товщини утеплювача зовнішньої стіни (на 1 м²)

d, см	U, Вт/(м²·К)	$Q_{рік}$, кВт·год/(м²·рік)	$Z_{ен}$, грн/рік	$C_{утеп}$, грн	$Z_{утеп}$, грн/рік	Z_{Σ}, грн/рік
10	0,200	18,3	54,9	200	13,0	67,9
15	0,158	14,4	43,2	300	19,5	62,7
20	0,130	11,9	35,6	400	26,0	***61,6***
25	0,111	10,1	30,3	500	32,5	62,8
30	0,096	8,8	26,3	600	39,0	65,4

З аналізу табл. 4.6 видно, що: збільшення товщини утеплювача *зменшує витрати на енергію*, але *збільшує річні приведені капітальні витрати*; сумарні витрати Z_{Σ} мають мінімум при $d \approx 0{,}20$ м.

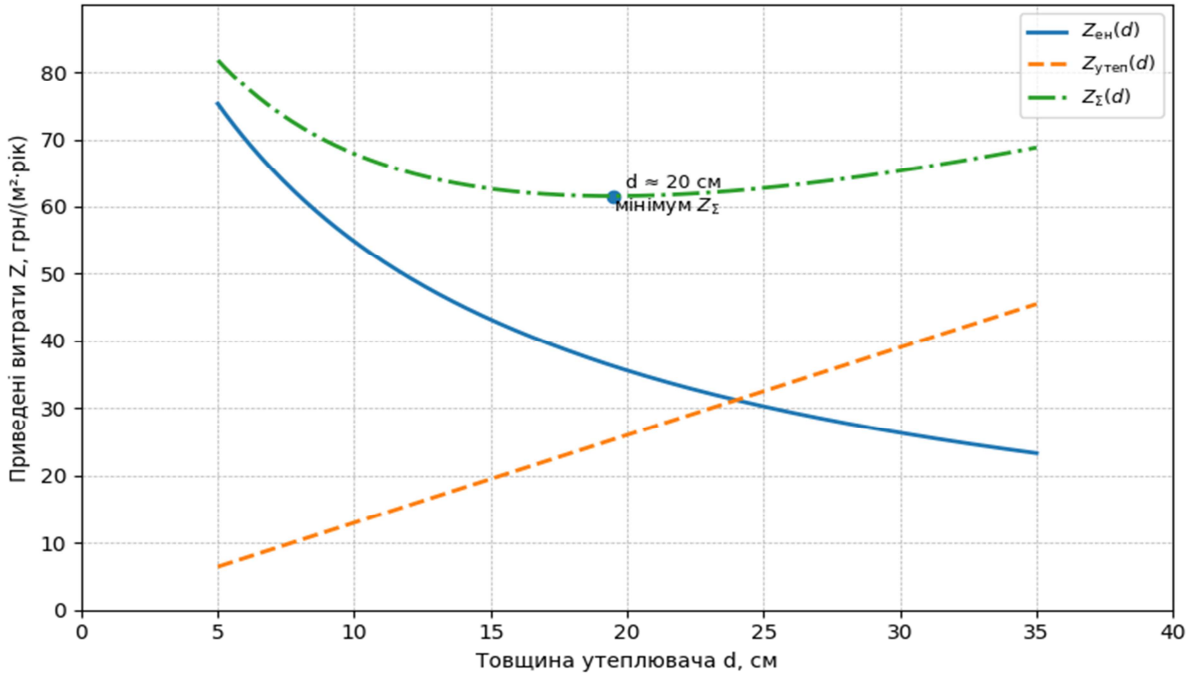

Рис. 4.3. Схема зміни компонент витрат при зростанні d.

Тому *економічно оптимальна товщина утеплювача зовнішніх стін* за прийнятих вихідних даних становить: $d_{опт,\ стіна} \approx 200$ мм.

При цій товщині $U \approx 0{,}13$ Вт/(м^2·К) – що відповідає цільовому діапазону для NZEB; річні сумарні приведені витрати мінімальні серед розглянутих варіантів.

5. Розрахунок товщини утеплення покрівлі

Для покрівлі вимоги до теплозахисту, як правило, *жорсткіші*, ніж до стін, оскільки втрати через покрівлю суттєві.

Приймемо конструкцію:

- залізобетонна плита перекриття – 200 мм, $\lambda \approx 2{,}0$ Вт/(м·К);
- стяжка, оздоблення, гідроізоляція – сумарно $R_{\text{ін, покр}} \approx 0{,}20$ м^2·К/Вт;
- теплоізоляція (мінеральна вата) – товщина $d_{\text{покр}}$, $\lambda = 0{,}037$ Вт/(м·К);
- поверхневі опори як для горизонтальних огороджень.

Орієнтовний цільовий опір теплопередачі для NZEB:

$$R_{\Sigma,\ \text{покр, ціль}} \approx 8{,}0\ \text{м}^2\cdot\text{К/Вт},$$

що відповідає

$$U_{\text{покр, ціль}} \approx 0{,}125\ \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Розрахунковий опір без утеплювача:

$$R_{\text{ін, покр}} \approx 0{,}20 + R_{\text{si}} + R_{\text{se}} \approx 0{,}20 + 0{,}10 + 0{,}04 \approx 0{,}34\ \text{м}^2\cdot\text{К/Вт}$$

(для горизонтальної конструкції R_{si} можна прийняти дещо іншим, але для попереднього розрахунку такої точності достатньо).

Необхідний додатковий опір за рахунок утеплювача:

$$R_{\text{утеп, покр}} = R_{\Sigma,\ \text{покр, ціль}} - R_{\text{ін, покр}} = 8{,}0 - 0{,}34 = 7{,}66\ \text{м}^2\cdot\text{К/Вт}.$$

Звідси розрахункова товщина утеплювача покрівлі:

$$d_{\text{покр, розр}} = R_{\text{утеп, покр}}\cdot\lambda = 7{,}66\cdot 0{,}037 = 0{,}28\ \text{м}.$$

З урахуванням: запасу на відхилення фактичних характеристик матеріалів; можливого зростання вартості енергії; відносної дешевизни додаткових сантиметрів утеплювача на покрівлі, *приймаємо товщину утеплення покрівлі:*

$$d_{\text{покр, прийняте}} = 300\ \text{мм}.$$

Це забезпечує $U_{\text{покр}} \approx 0{,}10$ Вт/(м^2·К), що відповідає високим вимогам NZEB.

6. Розрахунок товщини утеплення підлоги по ґрунту

Для підлоги по ґрунту враховуються: втрати через контакт із ґрунтом; периметральні теплові містки уздовж зовнішніх стін; температурний режим ґрунту (вища температура, ніж зовнішнє повітря).

Спрощено для NZEB часто орієнтуються на:

$$U_{\text{підл, ціль}} = 0{,}15\ \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Приймаємо конструкцію:

- бетонна плита/стяжка, чорнова підлога – сумарно $R_{ін,\ підл} = 0{,}25$ м^2·К/Вт;
- під нею – теплоізоляція (XPS або мінеральна вата високої щільності), $\lambda = 0{,}035$ Вт/(м·К).

Необхідний опір утеплювача:

$$R_{утеп,підл} = 1/U_{підл,ціль} – R_{ін,\ підл} = 1/0{,}15 – 0{,}25 = 6{,}67 – 0{,}25 = 6{,}42 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}.$$

Розрахункова товщина:

$$d_{підл,\ розр} = R_{утеп,\ підл}\cdot\lambda = 6{,}42\cdot 0{,}035 = 0{,}22 \text{ м}.$$

З урахуванням конструктивних обмежень (висота приміщень, рівень чистої підлоги) та доцільності невеликого запасу приймаємо:

$$d_{підл,\ прийняте} = 200 \text{ мм}.$$

Це дає $U_{підл}$ трохи вище цільового, але з урахуванням більш м’якого температурного режиму ґрунту та можливого локального посиленого утеплення по периметру (в зоні цоколю) забезпечує прийнятний рівень тепловтрат для NZEB.

7. Узагальнення результатів та прийняті товщини утеплення

На основі проведених теплотехнічних та економічних розрахунків для проектованого будинку з нульовим енергоспоживанням прийнято такі товщини теплоізоляційних шарів:

Таблиця 4.7. Підсумкові товщини утеплення огороджувальних конструкцій

Конструкція	Цільовий U, Вт/(м²·К)	Розрахункова товщина, м	Прийнята товщина, м
Зовнішні стіни	≈ 0,13	≈ 0,20 (економічний мінімум)	0,20
Покрівля	≈ 0,10	≈ 0,28	0,30
Підлога по ґрунту	≈ 0,15	≈ 0,22	0,20

Отже:

– для зовнішніх стін товщина утеплювача 200 мм є економічно оптимальною за прийнятих вихідних даних і забезпечує низький коефіцієнт теплопередачі;

– для покрівлі застосовано дещо більший запас 300 мм з огляду на її значну роль у тепловому балансі будівлі та невисоку відносну вартість додаткового шару утеплення;

– для підлоги по ґрунту прийнято 200 мм утеплення, як компроміс між теплотехнічними, економічними та конструктивними міркуваннями.

4.4. Вибір та розрахунок системи опалення, вентиляції і кондиціонування

У цьому підрозділі виконується послідовний розрахунок теплового та повітряного режиму будинку, вибір типу систем опалення, вентиляції й кондиціонування, а також їх орієнтовна розмірність для забезпечення вимог NZEB. Розрахунки проводяться на основі геометричних, теплотехнічних та кліматичних даних, прийнятих у п. 4.1–4.3.

1. Тепловтрати через огороджувальні конструкції

Тепловтрати через окремий елемент огородження:

$$Q_j = U_j \cdot A_j \cdot \Delta T_р,$$

де U_j – коефіцієнт теплопередачі елемента,

A_j – його площа.

1. Непрозорі стіни:

$$U_{стін} = 0{,}13\ Вт/(м^2 \cdot К),\ A_{стін,\ непр} = 158{,}5\ м^2.$$

$$Q_{стін} = 0{,}13 \cdot 158{,}5 \cdot 42 = 865\,Вт.$$

2. Вікна:

$$U_{вік} = 0{,}8\ Вт/(м^2 \cdot К),\ A_{вік,\ \Sigma} = 43{,}1\ м^2.$$

$$Q_{вік} = 0{,}8 \cdot 43{,}1 \cdot 42 = 1448\,Вт.$$

3. Покрівля:

$$U_{покр} = 0{,}10\ Вт/(м^2 \cdot К),\ A_{покр} = 80\ м^2.$$

$$Q_{покр} = 0{,}10 \cdot 80 \cdot 42 = 336\,Вт.$$

4. Підлога по ґрунту:

$$U_{підл} = 0{,}15\ Вт/(м^2 \cdot К),\ A_{підл} = 80\ м^2.$$

$$Q_{підл} = 0{,}15 \cdot 80 \cdot 42 = 504\,Вт.$$

Зведена таблиця тепловтрат через огородження (розрахунковий режим)

Елемент	U, Вт/(м²·К)	Площа, м²	Q, Вт
Непрозорі стіни	0,13	158,5	≈ 865
Вікна	0,80	43,1	≈ 1448
Покрівля	0,10	80	336
Підлога по ґрунту	0,15	80	504
Разом	–	–	**≈ 3154**

Отже, *розрахункові тепловтрати через огороджувальні конструкції:*

$$Q_{\text{огр}} = 3{,}15 \text{ кВт}.$$

2. Тепловтрати на вентиляцію з урахуванням рекуперації

Втрати теплоти на нагрів вентиляційного повітря без рекуперації:

$$Q_{\text{вент},0} = 0{,}34 \cdot V_{\text{вент}} \cdot \Delta T_{\text{р}},$$

де 0,34 – коефіцієнт, що враховує $\rho \cdot c_{\text{р}}$ повітря (кВт·год/(м³·К) у перерахунку).

$$V_{\text{вент}} = 224 \text{ м}^3/\text{год}, \ \Delta T_{\text{р}} = 42 \text{ К}.$$

$$Q_{\text{вент},0} = 0{,}34 \cdot 224 \cdot 42 = 3200 \text{ Вт}.$$

З урахуванням рекуператора з ефективністю $\eta_t = 0{,}85$:

$$Q_{\text{вент}} = Q_{\text{вент},0} \cdot (1 - \eta_t) = 3200 \cdot 0{,}15 = 480 \text{ Вт}.$$

3. Сумарне розрахункове теплове навантаження будинку

$$Q_{\Sigma,\text{розр}} = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{вент}} = 3150 + 480 = 3630 \text{ Вт}.$$

З урахуванням резерву (інфільтрація, нерівномірність температур, старіння матеріалів, можливі похибки розрахунків) приймається коефіцієнт запасу 1,25:

$$Q_{\text{опал, розр}} = 1{,}25 \cdot Q_{\Sigma,\text{ розр}} = 1{,}25 \cdot 3{,}63 = 4{,}5 \text{ кВт}.$$

Отже, розрахункова потужність системи опалення – на рівні 4,5 кВт.

Вибір та розрахунок системи опалення

1. Вибір джерела теплоти

З огляду на концепцію NZEB та низькотемпературний характер теплового навантаження доцільно застосувати:

- тепловий насос типу «повітря–вода», що працює на систему водяної теплої підлоги;

- низькотемпературний графік (орієнтовно 35/30 °C).

Переваги: високий сезонний коефіцієнт перетворення (SCOP) на рівні 3,0–3,5; можливість роботи у реверсивному режимі для літнього охолодження; сумісність з низькотемпературними системами опалення (тепла підлога, фанкойли).

З урахуванням розрахункової теплової потужності 4,5 кВт приймається тепловий насос номінальною потужністю 5 кВт при умовах A-7/W35 (зовнішнє повітря –7 °C, вода 35 °C).

2. Розрахунок річної потреби в теплі та споживання електроенергії тепловим насосом

Річні тепловтрати через огородження:

$$Q_{\text{огр, рік}} = U_{\text{екв}} \cdot DD \cdot 24/1000,$$

де $U_{\text{екв}} = \Sigma U_j A_j / \Sigma A_j$.

Однак зручніше працювати через сумарний коефіцієнт $\Sigma U_j A_j$:

$$\Sigma U_j A_j = 75{,}1 \text{ Вт/К (розраховано вище).}$$

Тоді:

$$Q_{\text{огр, рік}} = 75{,}1 \cdot 3800 \cdot 24/1000 = 6848 \text{ кВт·год/рік.}$$

Втрати на вентиляцію (з урахуванням рекуперації):

$$Q_{\text{вент,0,рік}} = 0{,}34 \cdot V_{\text{вент}} \cdot DD \cdot 24/1000,$$

$$Q_{\text{вент,0, рік}} = 6946 \text{ кВт·год/рік,}$$

$$Q_{\text{вент, рік}} = Q_{\text{вент,0, рік}} \cdot (1 - \eta_t) = 0{,}15 \cdot 6946 = 1042 \text{ кВт·год/рік.}$$

Сумарна річна потреба в теплі на опалення:

$$Q_{\text{опал, рік}} = Q_{\text{огр, рік}} + Q_{\text{вент, рік}} = 6848 + 1042 = 7890 \text{ кВт·год/рік.}$$

Питома потреба в теплі:

$$q_{\text{опал}} = Q_{\text{опал, рік}} / A_{\text{оп}} = 7890/160 = 49 \text{ кВт·год/(м}^2\text{·рік).}$$

При сезонному коефіцієнті перетворення теплового насоса (SCOP = 3,5):

$$W_{\text{ел, опал}} = Q_{\text{опал, рік}} / \text{SCOP} = 7890/3{,}5 = 2250 \text{ кВт·год/рік.}$$

3. Вибір системи теплопередачі (тепла підлога)

Для забезпечення низькотемпературного режиму та високого комфорту обирається водяна тепла підлога на обох поверхах. Приймаємо:

- активна площа теплої підлоги (без меблів, техніки) – орієнтовно

$$A_{ТП} \approx 130 \text{ м}^2;$$

- розрахункове теплове навантаження системи – 4,5 кВт.

Необхідна *питома тепловіддача* теплої підлоги:

$$q_{ТП} = Q_{опал,\ розр}/A_{ТП} = 4500/130 = 35 \text{ Вт/м}^2.$$

Типові допустимі значення для комфортної теплої підлоги – 50–70 Вт/м², отже прийняте навантаження значно нижче допустимого, що підтверджує доцільність низькотемпературного режиму (орієнтовно 35/30 °С, температура поверхні підлоги ~26–28 °С).

Розрахунок витрати теплоносія для системи теплої підлоги:

$$Q = m \cdot c_р \cdot \Delta T,$$

де m – масова витрата води,

$c_р \approx 4200$ Дж/(кг·К),

ΔT – розрахунковий перепад температур теплоносія (приймемо 5 К).

$$m = Q/(c_р \cdot \Delta T) = 4500/(4200 \cdot 5) = 0{,}214 \text{ кг/с}.$$

Об’ємна витрата:

$$V_{вода} = 0{,}214 \cdot 3600 = 770 \text{ л/год} = 0{,}77 \text{ м}^3\text{/год}.$$

Ця витрата розподіляється між кількома контурами теплої підлоги (орієнтовно 8–12 контурів по 60–90 м довжиною кожен), з балансуванням по витраті на колекторі.

Розрахунок та вибір системи вентиляції

1. Нормативні витрати повітря по приміщеннях (орієнтовно)

Приймемо такі витрати повітря:

- вітальня – 60 м^3/год (приплив);
- кожна спальня – 30 м^3/год (приплив, 3 спальні → 90);
- кухня – 60 м^3/год (витяжка);
- санвузол/ванна – 50 м^3/год (витяжка);
- окремий туалет – 25 м^3/год (витяжка);

- технічне приміщення – 25 м^3/год (витяжка/приплив за потреби).

Орієнтовний баланс:

- сумарний приплив: 60 + 90 = 150 м^3/год;
- сумарна витяжка: 60 + 50 + 25 + 25 = 160 м^3/год.

Для вирівнювання приймається проектна витрата:

$$V_{\text{вент, проект}} = 200 \text{ м}^3/\text{год},$$

що відповідає кратності повітрообміну:

$$n = 200/448 = 0{,}45 \text{ 1/год},$$

що узгоджується з прийнятим раніше значенням 0,5 1/год.

2. Вибір вентиляційної установки

З огляду на те, що необхідна витрата повітря 200–250 м^3/год; бажана ефективність рекуперації $\eta_t \geq 80\%$; низький рівень шуму й енергоспоживання.

Обирається центральна припливно-витяжна вентиляційна установка з:

- номінальною витратою повітря 250–300 м^3/год;
- протитечійним або пластинчастим рекуператором з $\eta_t \approx 85\%$;
- електричними/водяними калориферами догріву (мінімальної потужності);
- фільтрами класу не нижче F7 на припливі.

3. Оцінка споживання електроенергії вентиляційними вентиляторами

Приймемо питому потужність вентиляторів SFP = 1,0 кВт·с/м^3 (або 1 кВт на 1 м^3/с витрати). Витрата:

$$V_{\text{вент}} = 224 \text{ м}^3/\text{год} = 224/3600 = 0{,}062 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Потужність вентиляторів:

$$P_{\text{вент}} = \text{SFP} \cdot V_{\text{вент}} = 1{,}0 \cdot 0{,}062 = 0{,}062 \text{ кВт}.$$

Річне енергоспоживання при безперервній роботі:

$$W_{\text{ел, вент}} = P_{\text{вент}} \cdot 8760 = 0{,}062 \cdot 8760 = 545 \text{ кВт·год/рік}.$$

Вибір та розрахунок системи кондиціонування

1. Оцінка охолоджувального навантаження

Для високоефективного будинку з якісним утепленням, герметичністю та сонцезахистом охолоджувальне навантаження істотно

нижче, ніж у традиційних будівлях. Для попередньої оцінки застосуємо питомий показник:

$$q_{\text{хол, пит.}} = 30 \text{ Вт/м}^2,$$

(за наявності зовнішнього сонцезахисту, енергоефективних вікон та правильної орієнтації).

Розрахункове пікове охолоджувальне навантаження:

$$Q_{\text{хол, розр}} = q_{\text{хол, пит.}} \cdot A_{\text{оп}} = 30 \cdot 160 = 4800 \text{ Вт} = 4{,}8 \text{ кВт}.$$

Ця величина порівнянна з розрахунковим навантаженням на опалення (~4,5 кВт).

2. Вибір системи кондиціонування

Використання *реверсивного теплового насоса «повітря–вода»* в режимі охолодження з подачею холодоносія на: фанкойли (настінні/підлогові); поверхневі системи охолодження (стіни/стелі/частково підлога) з контролем точки роси.

Використання *мультиспліт-системи «повітря–повітря»* (кілька внутрішніх блоків) при збереженні теплового насоса «повітря–вода» лише для опалення та ГВП.

У рамках даного проєкту приймається *перший варіант* – реверсивний тепловий насос «повітря–вода» потужністю 5–6 кВт, який забезпечує:

- опалення через систему теплої підлоги;
- охолодження через 2–3 фанкойли (наприклад, у вітальні та на другому поверсі в спільній зоні/холі).

Перевага такого рішення – єдине джерело холодо- і теплогенерації, інтегроване в загальну енергетичну концепцію NZEB.

3. Річне енергоспоживання на охолодження (орієнтовна оцінка)

Приймемо питому потребу в холоді для NZEB:

$$q_{\text{хол, рік}} = 10 \text{ кВт·год/(м}^2\text{·рік)}.$$

Річна потреба в холоді:

$$Q_{\text{хол, рік}} = q_{\text{хол, рік}} \cdot A_{\text{оп}} = 10 \cdot 160 = 1600 \text{ кВт·год/рік}.$$

За сезонного EER (питомий коефіцієнт енергоефективності в охолодженні) SEER = 3,0:

$$W_{ел,\ хол} = Q_{хол,\ рік}/SEER = 1600/3 = 530\ кВт·год/рік.$$

Зведена оцінка енергоспоживання систем ОВіК

Таблиця 4.8. Орієнтовне річне енергоспоживання систем будинку.

Система	Потреба в теплі/холоді, кВт·год/рік	SCOP/SEER	Електроспоживання, кВт·год/рік
Опалення (тепловий насос)	7890	SCOP ≈ 3,5	2250
Охолодження (реверсивний ТН)	1600	SEER ≈ 3,0	530
Вентиляція (вентилятори)	–	–	545
Разом системи ОВіК	–	–	3325

(Без урахування додаткових споживачів – циркуляційних насосів, автоматики тощо, чий внесок є відносно невеликим.)

На основі теплотехнічних параметрів огороджувальних конструкцій та прийнятих режимів вентиляції розраховано сумарне розрахункове теплове навантаження будинку на рівні ≈4,5 кВт, що відповідає можливості застосування компактної низькотемпературної системи опалення.

Як джерело теплоти обґрунтовано вибір теплового насоса «повітря–вода» потужністю 5 кВт, що забезпечує високу енергоефективність (SCOP ≈ 3,5) та сумісний з системою водяної теплої підлоги.

Розрахункова питома тепловіддача теплої підлоги становить ≈35 Вт/м², що є значно нижчим за допустимі межі й підтверджує комфортний низькотемпературний режим роботи системи.

Система механічної припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла $\eta_t \approx 85\%$ і витратою 200–224 $м^3$/год забезпечує нормативний повітрообмін і істотно знижує тепловтрати.

Оцінка охолоджувального навантаження (~4,8 кВт) та річної потреби в холоді (~1600 кВт·год/рік) показує доцільність застосування реверсивного теплового насоса в поєднанні з фанкойлами як універсальної системи опалення/охолодження.

Орієнтовне річне споживання електроенергії системами опалення, вентиляції та кондиціонування складає близько 3,3 МВт·год/рік, що є прийнятним для подальшого компенсаційного балансу за рахунок фотоелектричної установки та інших відновлюваних джерел енергії в концепції будинку з нульовим енергоспоживанням.

4.5. Розрахунок фотоелектричної станції і акумуляції

Мета цього підрозділу – обґрунтувати потужність та конфігурацію фотоелектричної станції (ФЕС) і ємність системи акумуляції, необхідних для досягнення річного нульового або майже нульового енергетичного балансу будинку й високої частки самоспоживання електроенергії.

1. Цілі проєктування ФЕС для NZEB

Для будинку з нульовим споживанням енергії електрична система має забезпечити:

1. *Покриття річного електроспоживання* будинку (опалення, вентиляція, кондиціонування, ГВП, побутові прилади).

2. *Високу частку самоспоживання* – максимальне використання власної генерації без надмірної залежності від мережі.

3. *Розумний рівень акумуляції* – достатній для покриття нічних навантажень і підвищення автономності, але без економічно невиправданого збільшення вартості системи.

Приймається, що станція буде *мережевою (on-grid) гібридною ФЕС* з можливістю роботи з акумуляторною батареєю та (обмеженим) резервним живленням у разі відключень мережі.

2. Баланс електроспоживання будинку

За результатами п. 4.4 річне електроспоживання систем ОВіК:

- опалення (тепловий насос) – ≈ 2250 кВт·год/рік;
- охолодження – ≈ 530 кВт·год/рік;
- вентиляція (вентилятори) – ≈ 545 кВт·год/рік.

Разом системи ОВіК:

$$W_{\text{ОВіК}} = 2250 + 530 + 545 = 3325 \text{ кВт·год/рік.}$$

Додатково врахуємо:

– *Гаряче водопостачання (ГВП)* від того ж теплового насоса.

4 особи, 50 л/добу на особу, $\Delta T \approx 35$ К (з 10 до 45 °C).

Добова теплова енергія:

$$Q_{\text{ГВП,доба}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 200 \cdot 4180 \cdot 35 = 29260 \text{ кДж} \approx 8{,}13 \text{ кВт·год.}$$

Річна теплова енергія:

$$Q_{\text{ГВП,рік}} = 8{,}13 \cdot 365 \approx 2970 \text{ кВт·год/рік.}$$

За COP ГВП ≈ 2,5:

$$W_{\text{ел,ГВП}} = Q_{\text{ГВП,рік}}/\text{COP} = 2970/2{,}5 = 1180 \text{ кВт·год/рік.}$$

– *Побутові електроприлади та освітлення.*

Для добре утепленого будинку 160 м² приймемо орієнтовно:

$$q_{\text{побут}} = 18 \div 20 \text{ кВт·год/(м}^2\text{·рік),}$$

що дає:

$$W_{\text{побут}} = 160 \cdot (18 \div 20) = 2880 \div 3200 \text{ кВт·год/рік/}$$

Для подальших розрахунків приймемо усереднене значення:

$$W_{\text{побут}} \approx 3000 \text{ кВт·год/рік.}$$

– *Підсумкове річне електроспоживання будинку:*

$$W_{\Sigma,\text{рік}} = W_{\text{ОВіК}} + W_{\text{ел,ГВП}} + W_{\text{побут}} = 3325 + 1180 + 3000 \approx 7500 \text{ кВт·год/рік}$$

(≈7,5 МВт·год/рік.)

Середнє добове споживання:

$$W_{\text{доба}} = W_{\Sigma,\text{рік}}/365 = 7500/365 = 20{,}6 \text{ кВт·год/добу.}$$

3. Розрахунок встановленої потужності фотоелектричної станції

Для центральної частини України (умовно район Києва), орієнтації модулів на південь з кутом нахилу 30–35° та з урахуванням системних втрат (інвертор, кабелі, температура) приймемо *питомий річний виробіток:*

$$Y_{сп} = 1200 \text{ кВт·год/кВт/рік.}$$

Тоді річна генерація ФЕС:

$$Q_{ФЕС,рік} = P_{ФЕС} \cdot Y_{сп},$$

де $P_{ФЕС}$ – встановлена пікова потужність, кВт.

Для досягнення «нульового» річного електричного балансу (без урахування мережевих втрат, обмежень, тощо):

$$Q_{ФЕС,рік} = W_{Σ,рік}.$$

Звідси:

$$P_{ФЕС} = W_{Σ,рік}/Y_{сп} = 7500/1200 = 6{,}25 \text{ кВт.}$$

З урахуванням запасу (неоптимальна орієнтація окремих модулів, можливе забруднення, старіння, часткове затінення):

Приймаємо встановлену потужність ФЕС:

$$P_{ФЕС,\ прийнята} = 6{,}5 \text{ кВт.}$$

Приймемо сучасні кремнієві модулі потужністю ≈ 400–410 Вт кожен.

- номінальна потужність одного модуля: $P_{мод} = 405$ Вт;
- орієнтовна площа модуля: $A_{мод} = 1{,}9$ м^2.

Необхідна кількість модулів:

$$N = P_{ФЕС,\ прийнята}/P_{мод} = 6{,}5/0{,}405 = 16 \text{ шт.}$$

Фактично 16 модулів×405 Вт = 6,48 кВт.

Загальна площа ФЕС:

$$A_{ФЕС} = N \cdot A_{мод} = 16 \cdot 1{,}9 = 30{,}4 \text{ м}^2.$$

Площа даху будинку:

$$A_{покр} = 80 \text{ м}^2$$

тобто розмістити 30–35 м² модулів технічно можливо, як в одній площині (південна частина плоского даху), так і частково з орієнтацією на південний-схід/південний-захід.

Оцінка середньодобової генерації:

$$Q_{ФЕС,доба} = P_{ФЕС} \cdot Y_{сп}/365 = 6{,}48 \cdot 1200/365 = 21{,}3 \text{ кВт·год/добу.}$$

Середньодобова генерація (~21,3 кВт·год/добу) дещо перевищує середньодобове споживання (~20,6 кВт·год) – це створює передумови для річного нульового балансу з невеликим запасом.

5. Розрахунок системи акумуляції електроенергії

Система буде гібридною:

- ФЕС працює в першу чергу на покриття поточного споживання будинку;
- надлишок електроенергії вдень заряджає акумулятор;
- у вечірні та нічні години навантаження частково або повністю живиться від акумулятора;
- електромережа виконує роль резерву й балансування.

Цільовий критерій: забезпечити покриття більшої частини нічного споживання будинку за рахунок власної генерації, з резервом на 1 «типову» ніч. Приймаємо:

- тип накопичувача – LiFePO4 (літій-залізо-фосфат);
- допустима глибина розряду (DoD) – DoD = 0,8 (80%);
- к.к.д. заряд–розряд: $\eta_{бат} = 0,9$ (90%).

Припустимо, що близько 60 % електроспоживання припадає на вечірньо-нічний період (18:00–8:00), коли сонячної генерації немає:

$$W_{ніч} = 0,6 \cdot W_{доба} = 0,6 \cdot 20,6 = 12,3 \text{ кВт·год/ніч.}$$

Якщо ставимо за мету приблизно одну ніч повної автономної роботи від акумулятора (за типових умов), то необхідна корисна ємність батареї:

$$C_{кор} = W_{ніч} = 12,3 \text{ кВт·год.}$$

З урахуванням к.к.д. і допустимої глибини розряду номінальна ємність:

$$C_{ном} = W_{ніч}/(\eta_{бат} \cdot \text{DoD}) = 12,3/(0,9 \cdot 0,8) = 17,1 \text{ кВт·год.}$$

Отже, оптимальна номінальна ємність акумуляторної батареї для покриття типової однієї ночі ≈ 17 кВт·год.

Для наочності розглянемо також варіант із двома ночами автономності:

$$W_{ніч,2} = 2 \cdot W_{ніч} = 24,6 \text{ кВт·год}, \; C_{ном,2} = 24,6/0,72 = 34,3 \text{ кВт·год.}$$

Таблиця 4.9. Орієнтовна необхідна ємність батареї для різної автономності

Критерій	Енергія, кВт·год	Номінальна ємність, кВт·год
1 ніч (типова)	12,3	17
2 ночі (типові)	24,6	34

З огляду на вартість акумуляторів та наявність мережі, варіант із повною 2-денною автономністю економічно надмірний. Для NZEB буде доцільно зупинитися на ємності порядку 15–20 кВт·год, яка реалізуватиметься, наприклад, у вигляді модульної батареї 4×4–5 кВт·год.

Практичне прийняте значення:

$$C_{\text{бат, прийнята}} \approx 16 \div 18 \text{ кВт·год (номінально).}$$

6. Вибір інверторного обладнання та конфігурації системи

Для роботи з ФЕС потужністю 6,5 кВт та акумулятором 16–18 кВт·год необхідний гібридний трифазний (або однофазний, залежно від приєднання) інвертор номінальною активною потужністю 6–7 кВт, який має щонайменше 2 MPPT-входи з можливістю роботи:

- у режимі on-grid – робота паралельно з мережею;
- у режимі backup – живлення критичних навантажень при зникненні мережі;
- заряд/розряд акумулятора з керуванням за пріоритетами (споживання будинку / заряд батареї / видача в мережу).

7. Перевірка річного енергетичного балансу

Річна генерація ФЕС:

$$Q_{\text{ФЕС,рік}} = P_{\text{ФЕС}} \cdot Y_{\text{сп}}, = 6{,}48 \cdot 1200 = 7776 \text{ кВт·год/рік.}$$

Порівняння з річним електроспоживанням будинку:

- споживання:

$$W_{\Sigma,\text{ рік}} = 7500 \text{ кВт·год/рік;}$$

- генерація:

$$Q_{\text{ФЕС, рік}} = 7775 \text{ кВт·год/рік.}$$

Річне сальдо (без урахування мережевих обмежень, втрат у лічильнику тощо):

$$\Delta W_{\text{рік}} = Q_{\text{ФЕС, рік}} - W_{\Sigma,\text{ рік}} = 7775 - 7500 = 275 \text{ кВт·год/рік.}$$

Таким чином, за рік генерація ФЕС дещо перевищує споживання будинку (орієнтовно на 3–5 %), що компенсує можливі додаткові втрати й похибки розрахунків; забезпечує необхідний резерв для варіацій погодних умов. Система акумуляції ємністю 16–18 кВт·год:

- дозволяє суттєво збільшити частку власного споживання (особливо у періодах із помірною інсоляцією);
- забезпечує нічне покриття навантажень, зменшуючи потребу в енергії з мережі;
- частково виконує функцію резервного живлення при короткочасних відключеннях.

4.6. Баланс енергії будинку протягом року

1. Методика складання річного енергетичного балансу

Баланс складається в кількох вимірах:

1. Корисна енергія (навантаження) складається з: теплової енергії на опалення будинку; теплової енергії на гаряче водопостачання (ГВП); холоду (теплове відведення) на кондиціонування; електроенергія на побутові прилади та освітлення.
2. Кінцева (електрична) енергія, що постачається в будинок: електроенергія з мережі; електроенергія від фотоелектричної станції.
3. Відновлювана енергія: електрична енергія, згенерована ФЕС; теплота навколишнього середовища (повітря), відібрана тепловим насосом для опалення та ГВП.

Усі розрахунки виконуються в кВт·год/рік та нормуються до опалюваної площі будинку $A_{оп}$ = 160 м^2.

2. Річні теплові навантаження будинку

З попередніх розрахунків:

- річні тепловтрати через огородження:

$$Q_{огр,\ рік} = 6848\ кВт·год/рік,$$

- втрати на вентиляцію з урахуванням рекуперації:

$$Q_{\text{вент, рік}} = 1042 \text{ кВт·год/рік.}$$

Сумарне теплове навантаження на опалення:

$$Q_{\text{опал, рік}} = Q_{\text{огр, рік}} + Q_{\text{вент, рік}} = 7890 \text{ кВт·год/рік.}$$

Питома річна потреба в теплі на опалення:

$$q_{\text{опал}} = Q_{\text{опал, рік}}/A_{\text{оп}} = 7890/160 = 49 \text{ кВт·год/(м}^2\text{рік).}$$

На гаряче водопостачання (ГВП):

$$Q_{\text{ГВП, рік}} = 2970 \text{ кВт·год/рік.}$$

Для охолодження прийнято, що питома річна потреба в холоді:

$$q_{\text{хол, рік}} = 10 \text{ кВт·год/(м}^2\text{рік),}$$

тоді:

$$Q_{\text{хол, рік}} = q_{\text{хол, рік}}/A_{\text{оп}} = 1600 \text{ кВт·год/рік.}$$

Зведений баланс корисної теплоти/холоду:

Стаття навантаження	Позначення	Значення, кВт·год/рік	Питома величина, кВт·год/(м²·рік)
Опалення	$Q_{\text{опал, рік}}$	7890	49
Гаряче водопостачання (ГВП)	$Q_{\text{ГВП, рік}}$	2970	19
Охолодження (холод)	$Q_{\text{хол, рік}}$	1600	10

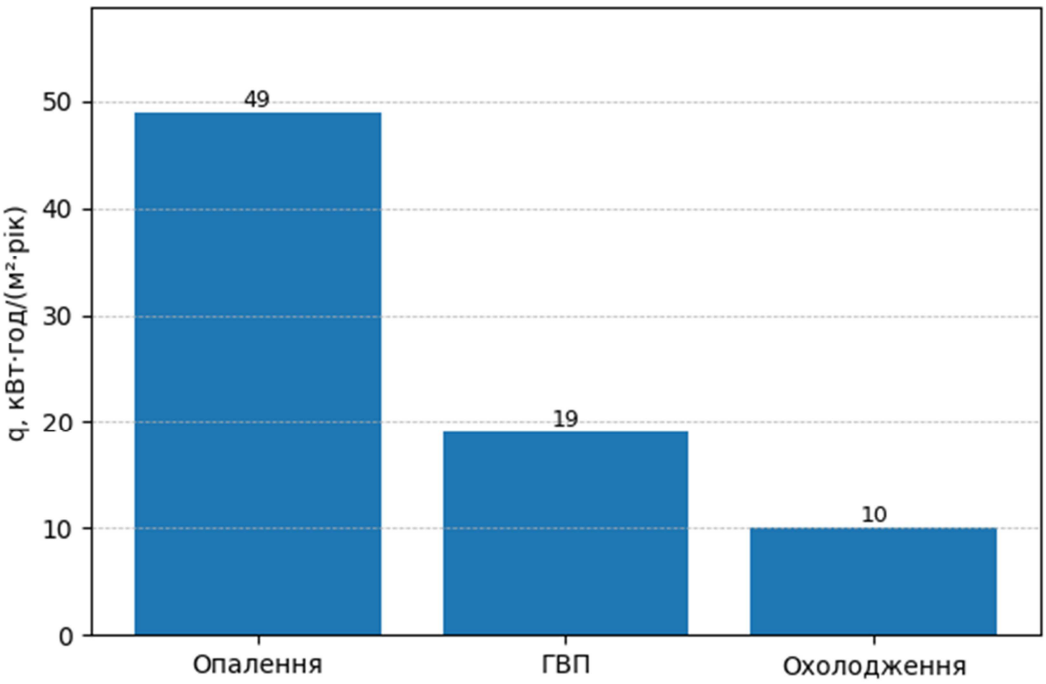

Рис. 4.4. Стовпчикова діаграма річних корисних навантажень.

3. Річне споживання електроенергії будинком

За результатами вибору та розрахунку систем ОВіК п. 4.4 та ФЕС п. 4.5:

- *Опалення* – теплова енергія $Q_{\text{опал, рік}}$ забезпечується тепловим насосом із сезонним COP (SCOP) ≈ 3,5:

$$W_{\text{ел, опал}} = Q_{\text{опал, рік}}/\text{SCOP} = 7890/3{,}5 = 2250 \text{ кВт·год/рік.}$$

- *Гаряче водопостачання* – COP ≈ 2,5:

$$W_{\text{ел, ГВП}} = Q_{\text{ГВП, рік}}/\text{COP} = 2970/2{,}5 = 1180 \text{ кВт·год/рік.}$$

- *Охолодження* – SEER ≈ 3,0:

$$W_{\text{ел, хол}} = Q_{\text{хол, рік}}/\text{SEER} = 1600/3 = 530 \text{ кВт·год/рік.}$$

- *Вентиляція (вентилятори)* – за оцінкою:

$$W_{\text{ел, вент}} = 545 \text{ кВт·год/рік.}$$

- *Побутові прилади та освітлення* – прийнято:

$$W_{\text{побут}} = 3000 \text{ кВт·год/рік.}$$

Зведений баланс кінцевої електроенергії:

Стаття споживання	Позначення	Значення, кВт·год/рік
Опалення (тепловий насос)	$W_{\text{ел, опал}}$	2250
ГВП (тепловий насос)	$W_{\text{ел, ГВП}}$	1180
Охолодження (реверсивний ТН)	$W_{\text{ел, хол}}$	530
Вентиляція (вентилятори)	$W_{\text{ел, вент}}$	545
Побутові прилади й освітлення	$W_{\text{побут}}$	3000
Разом	$W_{\Sigma\text{, рік}}$	7500

Питоме річне електроспоживання:

$$w_{\Sigma} = W_{\Sigma\text{, рік}}/A_{\text{оп}} = 7500/160 = 47 \text{ кВт·год/(м}^2\text{рік).}$$

4. Генерація фотоелектричної станції та взаємодія з мережею

З п. 4.5 встановлена потужність ФЕС $P_{\text{ФЕС}}$ = 6,48 кВт, а питомий річний виробіток $Y_{\text{сп}}$ = 1200 кВт·год/кВт/рік.

Річна генерація:

$$Q_{\text{ФЕС, рік}} = P_{\text{ФЕС}} \cdot Y_{\text{сп}} = 6{,}48 \cdot 1200 = 7776 \text{ кВт·год/рік.}$$

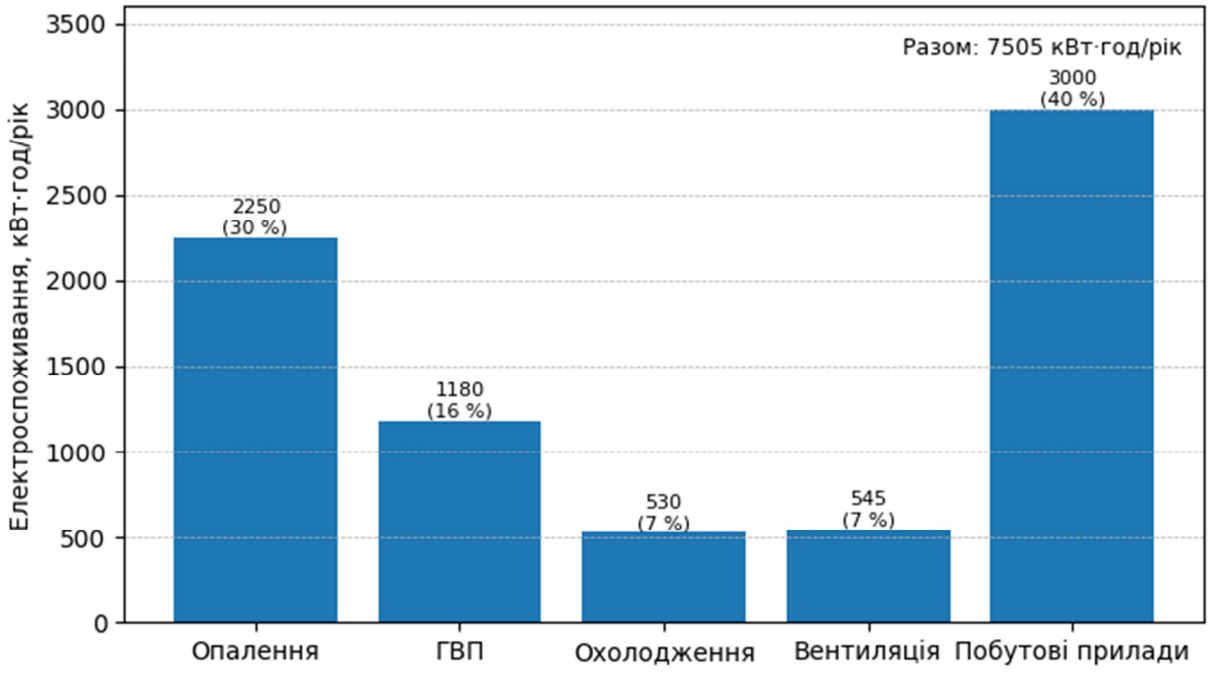

Рис. 4.5. Стовпчикова діаграма структури електроспоживання.

Порівняння:

- споживання будинку:

$$W_{\Sigma,\ рік} = 7500\ кВт·год/рік;$$

- генерація ФЕС:

$$Q_{ФЕС,\ рік} = 7776\ кВт·год/рік.$$

Річне нетто-сальдо:

$$\Delta W_{рік} = Q_{ФЕС,\ рік} - W_{\Sigma,\ рік} = 7776 - 7500 = 276\ кВт·год/рік.$$

Тобто за рік ФЕС генерує трохи більше електроенергії, ніж споживає будинок (≈ +3…4 %).

Середньодобові величини:

- середньодобове споживання:

$$W_{доба} = 7500/365 = 20{,}6\ кВт·год/рік;$$

- середньодобова генерація:

$$Q_{ФЕС,\ доба} = 7776/365 = 21{,}3\ кВт·год/рік.$$

5. Внесок акумуляції та відновлюваних джерел

Прийнята ємність акумуляторної батареї:

$$C_{бат,\ ном} = 16 \div 18\ кВт·год.$$

Дана ємність забезпечує покриття більшої частини нічного споживання будинку (орієнтовно 12–13 кВт·год/ніч) за типової доби; підвищення частки власного споживання сонячної генерації (менше віддачі надлишків у мережу вдень, більше використання вночі); часткову автономність у разі короткочасних відключень мережі.

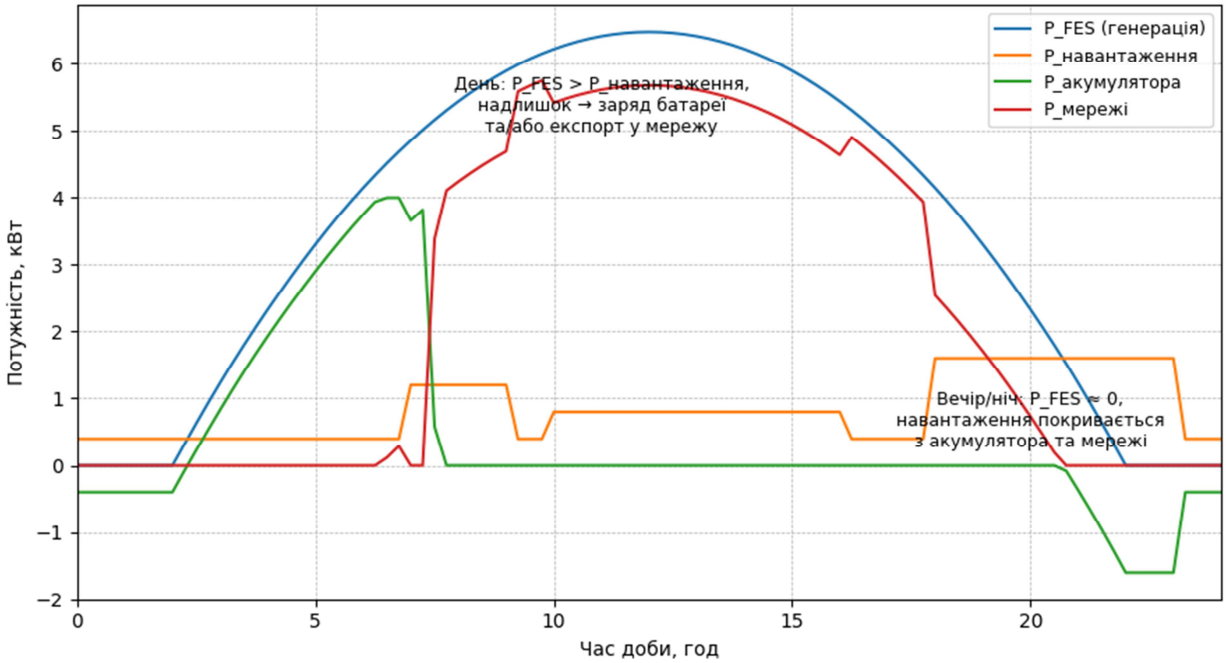

Рис. 4.6. Добовий графік розподілу електричної потужності.

Тепловий насос відбирає теплоту від навколишнього повітря.

Для опалення:

- теплота на опалення: $Q_{\text{опал, рік}}$ = 7890 кВт·год/рік;
- електроенергія: $W_{\text{ел, опал}}$ = 2250 кВт·год/рік;
- «відновлювана» теплота з навколишнього середовища:

$$Q_{\text{відн, опал}} = Q_{\text{опал, рік}} - W_{\text{ел, опал}} = 7890 - 2250 = 5640 \text{ кВт·год/рік.}$$

Для ГВП:

- теплова енергія: $Q_{\text{ГВП, рік}}$ = 2970 кВт·год/рік;
- електроенергія: $W_{\text{ел, ГВП}}$ = 1180 кВт·год/рік;
- «відновлювана» теплота з навколишнього середовища:

$$Q_{\text{відн, ГВП}} = 2970 - 1180 = 1790 \text{ кВт·год/рік.}$$

Сумарна відновлювана теплота, відібрана тепловим насосом:

$$Q_{\text{відн, }\Sigma} = 5640 + 1790 = 7430 \text{ кВт·год/рік.}$$

Отже, будинок використовує не лише сонячну електроенергію, а й близько 7,4 МВт·год/рік тепла навколишнього середовища, що є відновлюваною складовою балансу.

6. Узагальнена схема енергетичного балансу

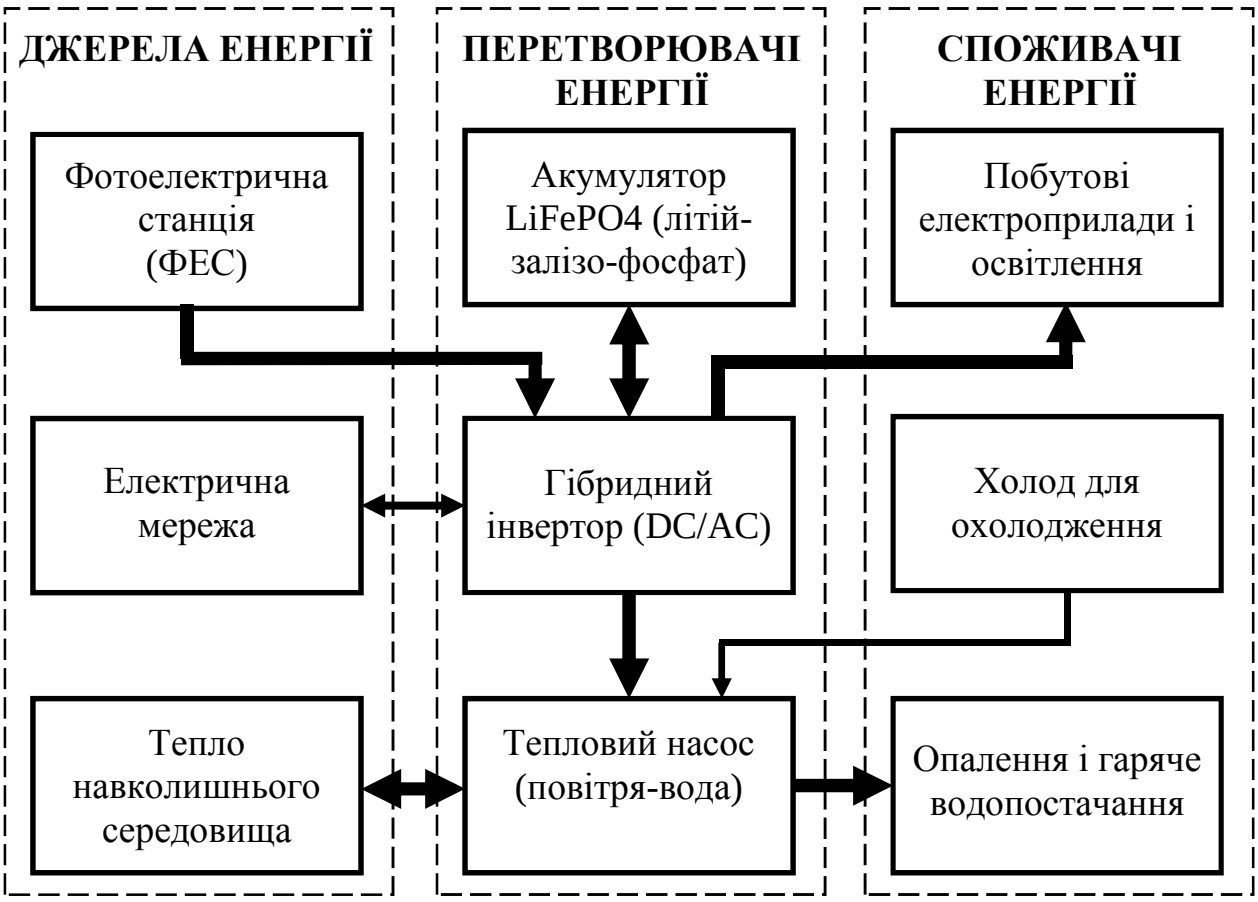

Рис. 4.7. Схема потоків енергії в NZEB
(товщина стрілок пропорційна річним витратам енергії)

4.7. Висновки до розділу

1. Обрана компактна об’ємно-планувальна схема, раціональна орієнтація фасадів, диференційоване засклення за сторонами світу та функціональне зонування приміщень забезпечують зменшення питомих тепловтрат, ефективне використання пасивних сонячних надходжень і комфортний світловий режим, що відповідає вимогам NZEB.

2. Розрахункова та економічна оптимізація теплоізоляції показала, що для зовнішніх стін доцільно прийняти утеплювач товщиною близько 200 мм, для покрівлі – 300 мм, для підлоги по ґрунту – 200 мм, що забезпечує цільові значення коефіцієнтів теплопередачі й мінімум приведених річних витрат протягом життєвого циклу огороджувальних конструкцій.

3. На основі розрахованих тепловтрат прийнято низькотемпературну систему опалення на базі теплового насоса «повітря–вода» потужністю близько 5 кВт, механічну припливно-витяжну вентиляцію з рекуперацією $\eta_t \approx 85$ % та реверсивний режим охолодження, що дозволяє обмежити розрахункове теплове навантаження рівнем ≈4,5 кВт і знизити річне електроспоживання систем ОВіК до ~3,3 МВт·год.

4. Розрахунок показав, що фотоелектрична станція потужністю близько 6,5 кВт (16 модулів сумарною піковою потужністю 6,48 кВт) у поєднанні з акумуляторною батареєю ємністю орієнтовно 16–18 кВт·год забезпечує річну генерацію, співставну з сумарним споживанням будинку (~7,5 МВт·год/рік), формуючи майже нульовий електроенергетичний баланс і високу частку самоспоживання.

5. Зведений річний баланс енергії показує, що питомі корисні навантаження на опалення (~49 кВт·год/(м²·рік)), ГВП (~19 кВт·год/(м²·рік)) та охолодження (~10 кВт·год/(м²·рік)), у поєднанні з роботою теплового насоса, ФЕС і акумуляції, забезпечують майже нульовий річний баланс кінцевої електроенергії та високий внесок відновлюваних джерел, що відповідає критеріям будинку з нульовим споживанням енергії.

РОЗДІЛ 5
ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальна характеристика робіт з монтажу ФЕС і АКБ у NZEB

Монтаж фотоелектричних систем (ФЕС) та акумуляторних батарей (АКБ) у будинках з нульовим енергоспоживанням (NZEB) відноситься до робіт підвищеної небезпеки. Він поєднує:

- електротехнічні роботи (робота з постійним і змінним струмом, інверторами, щитами);
- роботи на висоті (монтаж модулів на покрівлі, фасадах, навісних конструкціях);
- вантажно-розвантажувальні операції (переміщення модулів, інверторів, АКБ);
- роботу з потенційно небезпечними матеріалами (акумулятори, ізоляційні матеріали, кабельні системи).

Це зумовлює одночасну дію на працівників комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які необхідно ідентифікувати, класифікувати та враховувати при проєктуванні заходів з охорони праці.

Класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Відповідно до загальноприйнятої класифікації, небезпечні та шкідливі фактори під час монтажу ФЕС і АКБ можна згрупувати за такими ознаками:

1. Механічні фактори:

- падіння з висоти під час робіт на покрівлі або драбинах;
- падіння предметів (інструменту, модулів, елементів кріплень);
- удари, защемлення, порізи при монтажі конструкцій та кабельних трас;
- перевантаження опорно-рухового апарату при ручному перенесенні важких АКБ та обладнання.

2. Електричні фактори:

- ураження електричним струмом при роботі з постійною напругою ФЕС (ланцюги постійного струму до/понад 1000 В залежно від системи);

- ураження струмом у змінних ланцюгах (АС-частина, інвертор, вводний щит, внутрішні мережі);

- виникнення електричної дуги та коротких замикань, локальні термічні ураження.

3. Фізичні фактори навколишнього середовища:

- несприятливий мікроклімат (висока/низька температура, вітер, опади під час робіт на відкритому повітрі);

- підвищена інсоляція, сліпуча дія сонячного випромінювання, відблиски від поверхні модулів;

- шум від електроінструменту, вентиляційних агрегатів, компресорів;

- вібрація ручного інструменту.

4. Хімічні та пожежо-/вибухонебезпечні фактори:

- можливий контакт з електролітом (для свинцево-кислотних АКБ) чи іншими хімічними компонентами батарей;

- виділення вибухонебезпечних газів (водень при зарядженні деяких типів АКБ у недостатньо вентильованих приміщеннях);

- ризик загоряння кабельних ліній, інверторів, АКБ при перевантаженні, КЗ, неправильному монтажі.

5. Ергономічні та психофізіологічні фактори:

- вимушені робочі пози, робота у незручних місцях (край покрівлі, простір під покрівлею, технічні приміщення);

- зорове напруження при роботі з дрібними елементами, маркуванням, схемами;

- інформаційне перевантаження, пов’язане з необхідністю контролювати одночасно декілька параметрів (схеми, полярність, налаштування).

5.2. Небезпечні фактори при роботах на висоті та монтажі модулів ФЕС

Найхарактерніші небезпечні фактори для монтажу ФЕС пов’язані з розміщенням модулів на:

- скатних або плоских покрівлях;
- фасадних системах;
- навісних конструкціях (карпорти, павільйони тощо).

Основні ризики:

1. Падіння з висоти:
- робота поблизу краю покрівлі без огороджень;
- використання драбин та нестабільних опор;
- пересування по поверхні покрівлі з ризиком послизнутись (волога, сніг, лід, сипучі матеріали).

2. Падіння предметів:
- падіння інструменту, кріплень, модулів на людей, що працюють нижче;
- руйнування тимчасових кріплень при пориві вітру.

3. Механічні травми:
- порізи склом модулів або гострими металевими кромками профілів;
- защемлення пальців і кистей при фіксації модулів у кронштейнах;
- перенесення та підйом модулів з перевищенням допустимих мас для однієї особи.

В умовах NZEB, де кількість модулів може бути суттєвою (6–8 кВт встановленої потужності), ці фактори мають системний характер і повинні враховуватися вже на стадії організації робіт: планування зон робіт, шляхів підйому, місць складування та використання засобів колективного захисту.

5.3. Електротехнічні небезпеки при монтажі ФЕС та АКБ

1. Ланцюги постійного струму (DC) ФЕС

Особливість фотомодулів полягає в тому, що:

- вони генерують напругу завжди, коли освітлені;

- відсутній «вимикач» на рівні окремого модуля;

- навіть при від’єднанні від мережі ланцюги DC залишаються під напругою при денному світлі.

Основні небезпечні фактори:

- ураження електричним струмом при дотику до оголених провідників, неправильному підключенні конекторів, пошкодженій ізоляції;

- утворення електричної дуги при роз’єднанні навантаженого ланцюга постійного струму;

- перегрів кабелів і контактів при неправильно підібраному перерізі або поганих контактах, ризик загоряння.

2. Ланцюги змінного струму (AC) та інверторне обладнання

На AC-стороні (інвертор, щиток введення, розподільчі щитки) існують типові небезпеки:

- ураження струмом при відсутності/невикористанні блокувань, помилках підключення, роботі «під напругою»;

- небезпека дугового пробою та КЗ при неправильному підключенні фаз, нейтралі, заземлення;

- локальний нагрів і займання в місцях поганих контактів, перенавантаження ліній, неправильного вибору захисної апаратури (автомати, УЗО).

3. Акумуляторні батареї

Монтаж АКБ (особливо значної ємності) супроводжується специфічними ризиками:

- електротравмонебезпека при роботі з шинами й клемами з великою струмовіддачею (коротке замикання інструментом, кабелем, прикрашеннями тощо);

- термічний розгін і пожежа (для літієвих АКБ) у разі механічного пошкодження, неправильної конфігурації системи захисту, порушення режимів заряду/розряду;

- виділення газів (водень у свинцево-кислотних АКБ) у погано вентильованих приміщеннях, утворення вибухонебезпечних сумішей;

- необхідність антистатичних і діелектричних засобів захисту, спеціального інструменту з ізольованими ручками.

5.4. Фізичні, хімічні та ергономічні шкідливі фактори

1. Мікроклімат та інсоляція

При монтажі ФЕС на покрівлі:

- працівники працюють на відкритому повітрі за підвищеної інсоляції, що спричиняє перегрів, ризик сонячних опіків, теплового удару;

- вітрове навантаження підвищує ризик падіння, особливо при перенесенні модулів як «парусів»;

- за низьких температур можливі обмороження, зниження чутливості рук (ризик неточних рухів, падінь, ушкоджень).

2. Хімічні фактори при роботі з АКБ

Для різних типів батарей можливі:

- контакт з електролітом, який має корозійну та подразнювальну дію на шкіру, очі, дихальні шляхи;

- виділення аерозолів, парів або газів при зарядженні, пошкодженні корпусу;

- необхідність правильної організації вентиляції та використання ЗІЗ (рукавиці, окуляри, захист обличчя).

3. Ергономіка, маси та робочі пози

- модулі ФЕС, інвертори та АКБ мають значну масу та габарити – при ручному переміщенні можливі надмірні статичні та динамічні навантаження на опорно-руховий апарат;

- робота у вимушених позах (на колінах, зігнувшись, із сильним нахилом) спричиняє м’язову втому, підвищує ризик некоординованих рухів і травм;

- робота з великою кількістю дрібних кабельних підключень і елементів призводить до зорового та нервово-емоційного напруження.

Узагальнена таблиця небезпечних та шкідливих факторів

Для структурованого аналізу у таблиці наведено основні фактори та їх можливі наслідки:

Таблиця 5.1. Узагальнена таблиця небезпечних та шкідливих факторів

Група факторів	Приклад ситуації	Можливі наслідки
Падіння з висоти	Монтаж модулів на краю покрівлі	Переломи, черепно-мозкові травми, летальні випадки
Падіння предметів	Падіння інструмента/модуля з покрівлі	Травми голови, ушкодження кінцівок
Електротравма (DC/AC)	Дотик до струмопровідних частин, КЗ	Опіки, фібриляція серця, смерть
Дугові розряди	Роз’єднання навантажених DC-ланцюгів	Термічні опіки, пошкодження обладнання
Пожежа/загоряння	Перегрів кабелів, АКБ, інвертора	Пошкодження будівлі, загроза життю
Хімічний вплив	Витік електроліту з АКБ	Хімічні опіки, отруєння
Мікроклімат, інсоляція	Робота на покрівлі в спеку/мороз	Тепловий удар, обмороження, перевтома
Важкі вантажі	Перенесення АКБ, модулів вручну	Ушкодження спини, суглобів
Вимушені пози, втома	Монтаж у незручних місцях	Зниження уваги, зростання ризику травм

5.5. Висновки до розділу

1. Монтаж ФЕС та АКБ у NZEB характеризується комплексною дією небезпечних та шкідливих виробничих факторів, серед яких домінують роботи на висоті, електротехнічні ризики, шкідливі фізичні та ергономічні умови.

2. Електротехнічні небезпеки мають принципово відмінні риси для ланцюгів постійного та змінного струму, що обумовлює необхідність

спеціальної підготовки персоналу, застосування спеціалізованих засобів захисту та технологій безпечного відключення/блокування.

3. Акумуляторні батареї поєднують в собі електричні, хімічні та пожежо-/вибухонебезпечні фактори, що вимагає суворого дотримання вимог до приміщень, вентиляції, систем захисту, а також обов’язкового використання відповідних ЗІЗ.

4. Фізичні та ергономічні умови робіт (мікроклімат, інсоляція, маса обладнання, робочі пози) істотно впливають на рівень виробничого ризику та повинні враховуватись при плануванні робочих змін, організації робочих місць та виборі засобів колективного й індивідуального захисту.

5. Проведений аналіз є основою для розробки комплексу організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інженерних заходів з охорони праці.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено науково-практичне завдання розроблення методики будівництва та енергозабезпечення житлових будинків з нульовим (або майже нульовим) споживанням енергії для умов клімату центральної частини України на прикладі індивідуального двоповерхового будинку. На основі проведених теоретичних досліджень, інженерних розрахунків та аналізу практичної реалізації отримано такі узагальнені висновки.

1. Проаналізовано сучасну концепцію будинків з нульовим споживанням енергії (NZEB) та наведено їх класифікацію за енергетичним балансом (net zero, nearly zero, plus energy), джерелами відновлюваної енергії, ступенем автономності та конструктивною концепцією (пасивні, активні, біопозитивні будинки). Показано, що NZEB формують нову парадигму будівництва, орієнтовану на мінімізацію споживання первинної енергії й максимальне залучення місцевих ВДЕ, а також на перехід від «енергетичного нуля» до «вуглецевого нуля» протягом життєвого циклу будівлі.

2. Досліджено міжнародні стандарти та нормативні підходи (EU NZEB, Passivhaus, LEED, BREEAM), що регламентують вимоги до енергоефективності, вмісту ВДЕ та екологічності будівель. Показано, що стандарти ЄС задають обов’язкові мінімальні показники первинного енергоспоживання та теплотехнічних характеристик огороджувальних конструкцій, тоді як Passivhaus фокусується на граничному зниженні тепловтрат і герметичності оболонки, а LEED і BREEAM забезпечують комплексну оцінку сталості забудови. Узагальнення цих підходів дозволило сформувати адаптовану до українських умов методику проєктування NZEB.

3. Сформульовано фізичні основи енергоефективності будівель, що охоплюють процеси теплопередачі, повітропроникності, утворення теплових мостів, сонячних теплонадходжень та вентиляційних втрат. Показано, що досягнення класу NZEB вимагає одночасної оптимізації теплового опору

огороджувальних конструкцій, високої герметичності оболонки ($n_{50} \leq 0{,}6–1{,}0$ год$^{-1}$), раціональної організації сонячних надходжень і застосування вентиляції з рекуперацією тепла з ККД 75–95 %.

4. Обґрунтовано теплотехнічні вимоги до огороджувальних конструкцій NZEB та показано, що досягнення низьких коефіцієнтів теплопередачі ($U_{\text{стін}} \approx 0{,}13–0{,}18$ Вт/(м²·К), $U_{\text{покрівлі}} \approx 0{,}10–0{,}15$ Вт/(м²·К)) можливе завдяки застосуванню товстих шарів теплоізоляції (200–350 мм для стін, 250–400 мм для покрівлі), використанню матеріалів з низькою теплопровідністю ($\lambda \approx 0{,}03–0{,}04$ Вт/(м·К)) та усуненню теплових містків.

5. Доведено, що пасивні методи енергозбереження – оптимальна орієнтація будівлі, забезпечення достатньої інсоляції «теплих» приміщень, застосування енергоефективних віконних систем із зовнішнім сонцезахистом, компактна форма будинку та раціональне функціональне зонування – дозволяють істотно знизити потреби в опаленні, охолодженні та штучному освітленні, формуючи базу для досягнення нульового або майже нульового енергобалансу.

6. Розроблено комплексну методику енергозабезпечення NZEB, що ґрунтується на послідовності «зменшення – оптимізація – генерація». На етапі «зменшення» мінімізуються тепловтрати й внутрішні теплоприпливи; на етапі «оптимізації» застосовуються високоефективні системи опалення, вентиляції, кондиціонування та інтелектуальне керування; на етапі «генерації» проєктується комплекс відновлюваних джерел (ФЕС, теплові насоси, за потреби – вітрові та геотермальні системи) із системами акумуляції та пріоритетом власної генерації.

7. У практичній частині виконано повний цикл проєктування умовного двоповерхового житлового будинку NZEB ($A_{\text{оп}} \approx 160$ м², $V_{\text{оп}} \approx 448$ м³) для кліматичних умов центральної частини України. На основі теплотехнічних і економічних розрахунків обґрунтовано оптимальні товщини утеплення зовнішніх стін, покрівлі та підлоги (≈200, 300 та 200 мм

відповідно), що забезпечують виконання вимог до коефіцієнтів теплопередачі при мінімумі наведених витрат за життєвий цикл.

8. Виконано розрахунок систем опалення, вентиляції та кондиціонування з використанням теплового насоса «повітря–вода», низькотемпературних систем теплопостачання та вентиляції з рекуперацією тепла. Показано, що питоме корисне навантаження на опалення може бути знижено до рівня ≈ 40–50 кВт·год/(м²·рік), а сумарні питомі потреби на опалення, ГВП і охолодження – до значень, характерних для стандартів NZEB. Структура електроспоживання демонструє домінування побутових навантажень і електроспоживання теплового насоса, що підкреслює важливість подальшої оптимізації режимів роботи обладнання та побутових споживачів.

9. Розраховано параметри фотоелектричної станції та системи акумуляції, а також побудовано річний та добовий енергетичний баланс будинку. Показано, що за раціонального підбору потужності ФЕС та ємності АКБ, а також за умови двонапрямного обміну з мережею може бути досягнутий річний чистий електроенергетичний баланс, близький до нуля, з істотним зменшенням пікових відборів з мережі. Узагальнена схема потоків енергії підтверджує, що значна частка теплових навантажень (опалення та ГВП) забезпечується за рахунок теплового насоса, який перетворює електроенергію та теплоту навколишнього середовища, тоді як ФЕС і АКБ підвищують ступінь автономності будинку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22 черв. 2017 р. № 2118-VIII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19 (дата звернення: 13.12.2025).

2. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та затвердження Національного плану збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 січ. 2020 р. № 88-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-%D1%80 (дата звернення: 13.12.2025).

3. Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівня споживання енергії : дод. до розпорядження КМУ від 29.01.2020 № 88-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.minregion.gov.ua (дата звернення: 13.12.2025).

4. Про затвердження Національного плану дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 груд. 2021 р. № 1803-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80 (дата звернення: 13.12.2025).

5. Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року [Електронний ресурс]. – Київ : Кабінет Міністрів України, 2021. – Режим доступу: https://saee.gov.ua (дата звернення: 13.12.2025).

6. ДБН В.1.2-11:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. – Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.

7. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.

8. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2019.

9. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України від 11 лип. 2018 р. № 169 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0960-18 (дата звернення: 13.12.2025).

10. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України від 11 лип. 2018 р. № 172 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0962-18 (дата звернення: 13.12.2025).

11. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель : Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27 жовт. 2020 р. № 260 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1293-20 (дата звернення: 13.12.2025).

12. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 06 лют. 2025 р. № 168 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: офіц. сайт Мінвідновлення (https://www.minregion.gov.ua) (дата звернення: 13.12.2025).

13. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. – Київ : Мінрегіон України, 2016.

14. ДСТУ EN 15232-1:2017. Енергоефективність будівель. Вплив функцій автоматизації, керування та управління будівлями. Ч. 1 : Загальні положення та методи розрахунку. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

15. Кюнцлі Р., Мазурак О., Степанюк А. Основи проєктування екологічних житлових будинків та поселень : навч. посіб. – Львів : Сполом, 2020. – 180 с.

16. ISO 52000-1:2017. Energy performance of buildings – Overarching EPB assessment – Part 1 : General framework and procedures. – Geneva : International Organization for Standardization, 2017. – 1 ed.

17. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency [Electronic resource]. – Official Journal of the European Union, L 156, 19.06.2018. – Mode of access: https://eur-lex.europa.eu (date of access: 13.12.2025).

18. Passive House Institute. Passive House Planning Package 10 (PHPP 10) : The energy balance and planning tool for efficient buildings. – Darmstadt : Passivhaus Institut, 2021.

19. U.S. Green Building Council. LEED v4.1 for Building Design and Construction. – Washington, DC : USGBC, 2021. – 360 p.

20. BRE Global. BREEAM International New Construction. Version 7. Technical Manual. – Watford : BRE, 2022–2023.