

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

О. В. Гвоздецький, Р. Б. Ткаченко, Ю. О. Бурда

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СИСТЕМАХ
ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія, галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво, освітня програма «Промислове та цивільне будівництво», «Цивільна інженерія»)

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026

УДК 624:697.3:621.31]:004](076.6)

Гвоздецький О. В. Інтелектуальні системи енергоспоживання в системах життєзабезпечення будівель і споруд : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія, галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво, освітня програма «Промислове та цивільне будівництво», «Цивільна інженерія» / О. В. Гвоздецький, Р. Б. Ткаченко, Ю. О. Бурда ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 199 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. О. В. Гвоздецький,
канд. техн. наук, доц. Р. Б. Ткаченко,
канд. техн. наук, доц. Ю. О. Бурда

Рецензент

С. В. Павловський, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою теплогазопостачання і вентиляції,
протокол № 4 від 15.09.2025.*

© О. В. Гвоздецький, Р. Б. Ткаченко, Ю. О. Бурда, 2026
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ	8
1.1 Енергетичні ресурси	8
1.2 Поняття системи та системного аналізу в енергоспоживанні	9
1.3 Основні принципи енергоефективності будівлі	10
1.4 Основні складові енергоефективності будівлі	11
1.5 Визначальні напрямки з підвищення енергоефективності будівель	12
Питання для самоконтролю	14
2 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС БУДІВЛІ	15
2.1 Джерела тепловтрат і теплонадходжень	15
2.2 Теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій	18
2.3 Методики розрахунку енергетичного балансу	23
Питання для самоконтролю	25
3 ПАСИВНІ ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	26
3.1 Теплоізоляція та енергоефективні будівельні матеріали	26
3.1.1 Технології та методи утеплення зовнішніх стін	29
3.1.2 Послідовність проєктування теплозахисту	30
3.2 Архітектурно-планувальні рішення. Орієнтація будівлі та забезпечення нормативної інсоляції	31
3.3 Сучасні віконні та дверні конструкції	33
Питання для самоконтролю	37
4 АКТИВНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ	38
4.1 Опалення, вентиляція та кондиціонування (HVAC-системи)	38
4.1.1 Системи опалення	38
4.1.2 Системи вентиляції та кондиціювання	46
4.2 Інтелектуальні лічильники та моніторинг споживання. Контроль витоків. Розумні системи водо- та електроспоживання	49
4.2.1 Інтелектуальні лічильники	49
4.2.2 Контроль витоків	50
4.2.3 Розумні системи водоспоживання	51
4.2.4 Розумні системи електроспоживання	56
Питання для самоконтролю	57

5 ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	58
5.1 Сонячна енергетика теплопостачання	58
5.2 Сонячна фотоенергетика	61
5.3 Вітрова та геотермальна енергія для будівель	65
5.3.1 Вітрова енергія.....	65
5.3.2 Теплові насоси	68
5.4 Гібридні енергосистеми.....	71
Питання для самоконтролю	74
6 АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ТА ЙОГО ФУНКЦІЇ	75
6.1 Системи автоматичного керування	75
6.2 Функції систем автоматичного керування	86
Питання для самоконтролю	90
7 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	91
7.1 Поняття сигналу та зворотного зв'язку	91
7.2 Математичне моделювання систем.....	95
7.3 Динамічні характеристики систем	99
Питання для самоконтролю	104
8 АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	105
8.1 Принципи побудови алгоритмів САК.....	105
8.2 Порівняння дискретних і безперервних алгоритмів.....	111
8.3 Логічне, адаптивне та оптимальне керування.....	116
Питання для самоконтролю	120
9 КЛАСИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ	121
9.1 Пропорційні, інтегральні та диференційні регулятори.....	121
9.2 PID-алгоритм: налаштування та застосування.....	124
9.3 Практичні приклади застосування регуляторів у промислових і побутових системах	127
Питання для самоконтролю	128
10 КОНЦЕПЦІЇ БУДІВЕЛЬ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ	129
10.1 Поняття Net Zero Energy Building.....	129
10.2 Світові стандарти та нормативна база (ЄС, США, Україна).....	133
10.3 Переваги та виклики реалізації NZEB	136
Питання для самоконтролю	140

11 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (BMS) У NZEB	141
11.1 Призначення та функціональність Building Management Systems	141
11.2 Автоматизація опалення, вентиляції, освітлення, ГВП	146
11.3 Взаємодія з датчиками температури, CO ₂ , присутності.....	154
Питання для самоконтролю	161
12 ІНТЕГРАЦІЯ BMS З АКТИВНИМИ ТА ПАСИВНИМИ СИСТЕМАМИ...	162
12.1 Зв'язок з рекуперацією, тепловими насосами, сонячними колекторами	162
12.1.1 Рекуперація тепла: принципи та інтеграція з BMS.....	162
12.1.2 Теплові насоси: принцип роботи та інтеграція з BMS	163
12.1.3 Сонячні колектори: BMS-керування та моніторинг	165
12.2 Керування жалюзі, вентиляційними клапанами, освітленням залежно від зовнішніх умов	167
12.2.1 Керування жалюзі та сонцезахистом	167
12.2.2 Керування вентиляційними клапанами через BMS.....	168
12.2.3 Керування освітленням через BMS	171
12.3 Сценарії енергозбереження: нічний режим, відсутність користувачів, пікове навантаження	172
12.3.1 Нічний режим у BMS.....	172
12.3.2 Режим «Відсутність користувачів»	174
12.3.3 Керування піковим навантаженням (Peak Shaving).....	175
Питання для самоконтролю	176
13 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ І АНАЛІТИКА.....	177
13.1 Збір даних з усіх систем будівлі та побудова енергетичного профілю..	177
13.2 Виявлення втрат, неефективних зон, аномалій.....	178
13.3 Звітність для сертифікації NZEB	180
Питання для самоконтролю	182
14 ВЗАЄМОДІЯ З ЗОВНІШНІМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ТА МЕРЕЖЕЮ ...	183
14.1 Керування фотовольтаїкою, акумуляторами, біомасою	183
14.2 Балансування між споживанням і генерацією	184
14.3 Виведення надлишкової енергії в мережу (Smart Grid)	186
14.4 Прогнозування енергоспоживання на основі погодних даних	188
Питання для самоконтролю	190
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	191

ВСТУП

Інтелектуальні системи забезпечують оптимізацію використання енергоресурсів шляхом зменшення їх втрат. Вони здатні автоматично відключати непотрібні прилади, регулювати мікроклімат у приміщеннях та враховувати зовнішні чинники, зокрема погодні умови. У результаті досягається високий рівень енергоефективності при мінімальних затратах з боку користувача. В умовах сучасного розвитку суспільства проблема енергозбереження набуває особливого значення. Зростає зацікавленість споживачів у зниженні витрат на енергоресурси та підвищенні екологічності житлових будівель. Використання інноваційних технологій дозволяє істотно підвищити ефективність енергоспоживання, а впровадження автоматизованих рішень робить цей процес більш зручним та контрольованим.

Разом з тим, досягнення високого рівня енергозбереження потребує не лише застосування технічних засобів, але й комплексного планування та інтеграції відповідних рішень у структуру будівлі. Зокрема, встановлення сонячних панелей дає можливість значно скоротити витрати на електроенергію, а використання енергоефективних віконних і дверних конструкцій забезпечує збереження тепла в холодний період та прохолоди влітку.

Автоматизація є ключовим елементом у впровадженні технологій енергозбереження. Завдяки використанню сенсорів і контролерів, системи можуть самостійно регулювати споживання енергії. Наприклад, датчики руху можуть автоматично вимикати світло в кімнатах, де ніхто не перебуває, що значно знижує витрати на електроенергію. Це не лише зручно, але й ефективно з точки зору економії ресурсів.

Таким чином, сучасні технології створюють передумови для формування енергоефективного та екологічно безпечного житлового простору. Автоматизація управління будинком сприяє зниженню енергоспоживання, оптимізації витрат і підвищенню рівня комфорту мешканців.

Інтелектуальні технології дозволяють системам аналізувати дані та приймати рішення на основі отриманої інформації. Це можуть бути як прості алгоритми, так і складні моделі машинного навчання. Наприклад, термостати з функцією самонавчання можуть вивчати ваші звички та автоматично підлаштовувати температуру в приміщенні, забезпечуючи комфорт та знижуючи енергоспоживання.

У результаті вивчення курсу здобувач повинен:

- ЗНАТИ: принципи функціонування інтелектуальних систем керування енергоспоживанням у будівлях, включаючи архітектуру Smart Building, системи BMS (Building Management System) та EMS (Energy Management System),

сучасні технології автоматизації та диспетчеризації інженерних мереж (опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення, водопостачання тощо), основні протоколи обміну даними (BACnet, KNX, Modbus, LonWorks), а також методи енергетичного аудиту та нормативну базу (ДБН, ISO 50001, директиви ЄС);

- ВМІТИ: аналізувати структуру та енергоспоживання систем життєзабезпечення будівель, проєктувати інтелектуальні системи енергоспоживання (BMS, EMS), використовувати програмне забезпечення для моніторингу та оптимізації енергоспоживання, інтерпретувати дані з сенсорів і SCADA-систем, розробляти рішення з інтеграції відновлюваних джерел енергії, оцінювати ефективність енергоощадних заходів, застосовувати нормативну базу (ДБН, ISO, директиви ЄС), враховувати вимоги кібербезпеки, працювати в команді над проєктами автоматизації та енергоефективності, а також самостійно оновлювати знання у сфері Smart Building і сталого розвитку.

Вивчення курсу «Інтелектуальні системи енергоспоживання в системах життєзабезпечення будівель і споруд» забезпечує набуття базового рівня знань щодо принципів побудови, функціонування та інтеграції інтелектуальних систем керування енергоспоживанням у будівлях. Курс формує розуміння ролі Smart Building у забезпеченні сталого розвитку, енергозбереження та цифровізації будівельного середовища.

1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

1.1 Енергетичні ресурси

Суспільство в цілому і кожна людина зокрема не може обходитися без споживання енергії.

Енергія – здатність виробляти роботу чи якась інша дія, що змінює стан діючого суб'єкта. У широкому розумінні це – загальна міра різних форм руху матерії.

Теплова енергія – це форма внутрішньої енергії, яка виникає внаслідок хаотичного руху частинок (атомів, молекул) у тілі. Вона прямо пов'язана з температурою та термодинамічним станом речовини. Використовується для забезпечення необхідних умов існування, для отримання електричної енергії на теплових електростанціях, для технологічних потреб виробництва, для опалення та гарячого водопостачання.

Енергетичні ресурси – це будь-які джерела механічної, хімічної і фізичної енергії.

Енергетичні ресурси можна поділити на:

- первинні, джерело яких є природні ресурси і природні явища;
- вторинні, куди відносяться проміжні продукти збагачення і сортування вугілля; мазути та інші залишкові продукти переробки нафти; тріски, пні, сучки при заготівлі деревини; горючі гази; тепло відхідних газів; горюча вода з систем охолодження; відпрацьований пар силових промислових установок.

Первинні енергетичні ресурси поділяють на:

- непоновлювані або виснажені (вугілля, нафта, сланці, природний газ, пальне);
- поновлювані (деревина, гідроенергія, енергія вітру, геотермальна енергія, торф, термоядерна енергія);

Вторинні енергоресурси – це носії енергії, що утворюються в ході виробництва, які можуть бути повторно використані для отримання енергії поза основного технологічного процесу.

Близько 90 % використовуваних зараз енергоресурсів становлять непоновлювані (вугілля, нафта, природний газ, уран тощо) завдяки їх високому енергетичному потенціалу, відносної доступності та доцільності вилучення.

Ефективність використання енергоресурсів визначається ступенем перетворення їх енергетичного потенціалу в кінцеву використовувану продукцію чи споживані кінцеві види енергії (механічна енергія руху, теплота для систем опалення або технологічних потреб тощо).

1.2 Поняття системи та системного аналізу в енергоспоживанні

У контексті енергоефективності будівель система – це сукупність взаємопов'язаних елементів, що спільно забезпечують процес виробництва, передачі, розподілу, споживання та управління енергією.

До складу системи енергоспоживання входять:

- енергетичні підсистеми (опалення, вентиляція, кондиціонування, освітлення, гаряче водопостачання);
- будівельна оболонка (огороджувальні конструкції, вікна, двері, утеплення);
- джерела енергії (централізовані, децентралізовані, відновлювані);
- користувачі (люди, побутові прилади, офісне обладнання);
- система управління (автоматизація, моніторинг, облік, енергоменеджмент).

Кожен елемент системи має власні вхідні та вихідні параметри (потoki енергії, тепла, інформації), які взаємодіють між собою. Така структура забезпечує можливість комплексного аналізу енергоспоживання на рівні будівлі або групи будівель.

Системний підхід полягає у розгляді енергоспоживання будівлі як єдиного цілого – взаємопов'язаної структури з підсистемами, елементами і процесами, що впливають один на одного. Це означає, що ефективність будівлі оцінюється не за окремими технічними рішеннями, а за їхньою сукупною взаємодією.

Наприклад, поліпшення теплоізоляції без урахування вентиляційних режимів може призвести до порушення мікроклімату. Тому системний підхід вимагає одночасного аналізу огороджувальних конструкцій, інженерних систем і поведінки користувачів.

Системний аналіз – це методологія, що дозволяє досліджувати енергетичні процеси будівлі з урахуванням взаємодії всіх елементів системи, їх параметрів і зовнішніх умов. Основна мета системного аналізу – оптимізація енергоспоживання шляхом виявлення закономірностей, слабких місць та потенціалу енергозбереження.

Основні етапи системного аналізу:

- формулювання мети (зменшення енерговитрат, підвищення комфорту, зниження викидів CO₂ тощо);
- визначення меж системи (окрема будівля, кампус, мікрорайон);
- збір вихідних даних (енергетичні показники, кліматичні умови, тарифи, характеристики обладнання);

- побудова енергетичної моделі (баланс тепловтрат і теплонадходжень, моделювання потоків енергії);
- аналіз взаємодії підсистем (вплив ізоляції, вентиляції, опалення на загальний баланс);
- розроблення сценаріїв підвищення ефективності (пасивні, активні, відновлювані заходи);
- оцінювання ефективності та рекомендації (енергетичні, економічні, екологічні критерії).

Застосування системного аналізу дозволяє:

- визначити оптимальні комбінації технічних і організаційних заходів енергозбереження;
- уникнути конфлікту рішень між підсистемами;
- підвищити надійність і ефективність експлуатації будівлі;
- обґрунтувати інвестиційні рішення у сфері модернізації.

Таким чином, системний аналіз забезпечує наукове підґрунтя для ухвалення рішень у проектуванні, реконструкції та управлінні енергоспоживанням будівель.

1.3 Основні принципи енергоефективності будівлі

Енергоефективність будівлі – це здатність споруди забезпечувати комфортні умови для перебування людей (температурний, світловий, акустичний комфорт) при мінімальному споживанні енергії на опалення, охолодження, вентиляцію, освітлення та інші потреби. Енергоефективність є ключовим елементом сучасного будівництва, який дозволяє зменшити витрати на енергоресурси, скоротити викиди парникових газів та підвищити екологічність.

Енергоефективність будівель в Україні регулюється низкою законодавчих актів і будівельних норм [1–5] та інші.

Закон України [1] визначає основні принципи енергозбереження, встановлює вимоги щодо раціонального використання енергоресурсів, запроваджує механізми стимулювання енергоефективних заходів у будівництві та експлуатації будівель.

Закон України [2] направлений на підвищення енергоефективності житлових та нежитлових будівель. Закон встановлює обов'язкові вимоги до проектування, реконструкції та експлуатації будівель з урахуванням енергоефективності, а також визначає методи оцінки енергетичного сертифікату будівель.

Державні будівельні норми [3] визначають категорії енергоефективності будівель, встановлює нормативні показники енергоспоживання, способи контролю та сертифікації. Забезпечує комплексний підхід до енергоефективності: від вибору матеріалів до систем опалення, вентиляції та кондиціонування.

Державні будівельні норми [4] встановлюють вимоги до теплоізоляції зовнішніх конструкцій, опалювальних систем та систем вентиляції. Основна мета – зменшення тепловтрат і підвищення енергоефективності будівель.

Державний стандарт України [5] розглядає методологію вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель і встановлює вимоги до технічного обґрунтування, енергоефективності та безпеки таких рішень.

1.4 Основні складові енергоефективності будівлі

1. Теплова ізоляція – стіни, дах, підлога, вікна та двері, що мінімізують втрати тепла.

2. Енергоефективні системи опалення та охолодження – котли високого ККД, теплові насоси, кондиціонери з низьким енергоспоживанням.

3. Вентиляція та рекуперація – системи, що забезпечують повітрообмін з мінімальними енерговитратами.

4. Освітлення – використання LED-ламп та датчиків присутності.

5. Відновлювані джерела енергії – сонячні панелі, теплові насоси, вітрові турбіни.

6. Енергетичний менеджмент – контроль споживання енергії та автоматизація систем для зменшення витрат.

Структурна схема нормативів до енергоефективності будівель в Україні наведена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Структурна схема нормативів до енергоефективності будівель в Україні

Рівень регулювання	Документ	Основний зміст / Вимоги	Практичні заходи
1	2	3	4
Законодавчий	«Про енергозбереження»	Принципи енергозбереження, стимулювання раціонального використання енергії	Використання енергоефективних матеріалів, систем обліку енергоспоживання

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
Законода- вчий	«Про енергетичну ефективність будівель»	Обов'язкові вимоги до проєктування, реконструкції та сертифікації будівель	Сертифікація енергоефективності, вибір високоєфективних систем опалення / охолодження
ДБН (констру- ктивний рівень)	ДБН В.1.2- 11:2021 «Теплова ізоляція будівель»	Вимоги до теплоізоляції стін, даху, підлоги, вікон та дверей	Використання теплоізоляційних матеріалів, герметизація вікон та дверей
ДБН (енергети- чний контроль)	ДБН В.2.6- 31:2021 «Будинки житлові. Енергетична ефективність»	Категорії енергоефективності, нормативні показники енергоспоживання, контроль і сертифікація	Впровадження енергоменеджменту, автоматизація систем опалення / вентиляції, використання відновлюваних джерел енергії

Енергоефективність – це не лише технології, а й комплексне проєктне мислення. Впровадження принципів енергоефективності – обов'язкова вимога сучасного будівництва. Важливо враховувати кліматичні умови, функціональне призначення та економічну доцільність.

1.5 Визначальні напрямки з підвищення енергоефективності будівель

У контексті сучасного розвитку технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання енергоносіїв, ключовим аспектом енергозбереження в будівлях виступає забезпечення високого рівня утримання теплової енергії. Це зумовлено тим, що витрати матеріальних та фінансових ресурсів на теплопостачання значно перевищують аналогічні витрати на освітлення, електропостачання та вентиляційні системи. Збереження тепла є пріоритетним завданням, реалізація якого визначає ефективність функціонування інших взаємопов'язаних енергетичних систем будівлі.

Для досягнення раціонального використання енергоносіїв у будівельному секторі застосовується широкий спектр інженерних рішень, конструкційних матеріалів та технологій. У зв'язку з цим доцільним є опрацювання теоретичних основ, які становлять інформаційну базу для самостійного вибору

оптимальних методів енергозбереження у процесі проектування та експлуатації будівель.

Системи теплопостачання належать до найбільш енергоємних інженерних мереж у будівлях. У зв'язку з цим дедалі активніше впроваджуються програми енергозбереження, реалізуються інноваційні проекти та застосовуються сучасні технології, спрямовані на зниження енергоспоживання в житловому секторі.

Основною метою таких заходів є підвищення енергоефективності теплопостачальних систем шляхом оптимізації їх роботи та впровадження ресурсозберігаючих рішень.

До основних заходів, спрямованих на скорочення витрат теплової енергії в будівлях, належать:

- теплоізоляція огорожувальних конструкцій, включаючи перекриття дахів і підвальних приміщень;
- модернізація світлопрозорих елементів – заміна або ущільнення вікон і дверей з метою зменшення тепловтрат;
- оптимізація площі скління зовнішніх конструкцій для зниження теплопередачі;
- встановлення тепловідбивних екранів за опалювальними приладами для підвищення ефективності тепловіддачі;
- впровадження систем регулювання температурного режиму в нічний та неробочий час, що дозволяє зменшити споживання теплової енергії на 5–10 %;
- оснащення тепловитратних високоефективним теплотехнічним обладнанням, що забезпечує раціональне використання теплових ресурсів;
- запровадження системи моніторингу теплоспоживання, яка дозволяє здійснювати контроль, аналіз та оптимізацію витрат енергії.

За статистичними даними, найбільша частка теплової енергії в житлово-будівельному секторі витрачається на опалення приміщень, тоді як решта енергії використовується на виробництво будівельних матеріалів та виконання будівельних робіт. З метою зниження надмірного енергоспоживання державними органами запроваджено оновлені нормативні вимоги до теплозахисту, які передбачають поступове зменшення енерговитрат шляхом удвічі збільшеного опору теплопередачі стінових конструкцій та зменшення тепловтрат через інші елементи будівлі.

Вирішення цієї проблеми охоплює не лише нове будівництво, а й модернізацію існуючого житлового та громадського фонду, технічні характеристики якого часто не відповідають сучасним стандартам енергозбереження. Зниження енергоспоживання в будівлях, які експлуатуються можливе завдяки підвищенню вимог до теплотехнічних властивостей

матеріалів огорожувальних конструкцій, а також впровадженню опалювальних систем із регульованими тепловими режимами.

У процесі модернізації будівель важливу роль відіграють архітектурні рішення, зокрема щодо оновлення фасадів, які мають забезпечити не лише естетичну привабливість, а й відповідність сучасним вимогам теплозахисту. Підвищення теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій потребує значних фінансових, матеріальних та трудових ресурсів, тому такі роботи мають здійснюватися виключно на основі ретельно розробленого проєкту.

У міжнародній практиці модернізація будівель, особливо в частині покращення теплозахисних властивостей, є широко поширеним напрямом. Це зумовлено постійним оновленням нормативних вимог у бік їхнього посилення та оперативним впровадженням нових стандартів. Сучасні технології орієнтовані на відновлення теплоізоляційних властивостей, втрачених у процесі експлуатації, а також на вдосконалення методів підвищення теплозахисту конструктивних елементів і вузлів, які були реалізовані відповідно до застарілих проєктних рішень.

Питання для самоконтролю

1. Що таке «система» в контексті енергоспоживання будівлі (або підприємства), і які її основні елементи?

2. У чому полягає сутність «системного аналізу» енергоспоживання, і як він допомагає ідентифікувати найбільш критичні точки для підвищення енергоефективності?

3. Які три ключові стратегії є фундаментальними для досягнення високої енергоефективності в будівництві?

4. Чому досягнення енергоефективності вимагає комплексного, системного підходу, а не лише застосування окремих технологій (наприклад, тільки заміни лампочок)?

5. Поясніть важливість модернізації інженерних систем (опалення, вентиляції, кондиціонування) порівняно з термомодернізацією зовнішньої оболонки. Чи існує оптимальна послідовність цих робіт?

6. Які три основні групи заходів формують ключові напрямки підвищення енергоефективності будівель?

7. Який нетехнічний напрямок (пов'язаний із поведінкою та управлінням) є критично важливим для реалізації досягнутої енергоефективності будівлі, навіть після впровадження усіх технічних рішень?

2 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС БУДІВЛІ

2.1 Джерела тепловтрат і теплонадходжень

Внутрішнє середовище приміщень формується під впливом сукупності природних, фізичних і хімічних чинників, які визначають мікроклімат і рівень безпеки для людини. До природно-кліматичних елементів належать температура, вологість, швидкість руху повітря, сонячне випромінювання та електромагнітні поля, що можуть виникати як природним шляхом, так і внаслідок роботи електронного обладнання. Водночас значну роль відіграють фактори, пов'язані з виробничою та побутовою діяльністю людини, серед яких – теплове випромінювання від технічних пристроїв, шумове навантаження, вібрації, а також наявність у повітрі токсичних речовин, таких як пари, гази та аерозолі. Ці компоненти класифікуються як шкідливі або небезпечні, оскільки можуть негативно впливати на здоров'я, працездатність і загальне самопочуття. Ефективне управління параметрами внутрішнього середовища відповідно до санітарних норм і технічних регламентів є необхідною умовою створення безпечного та комфортного простору для життєдіяльності.

Для забезпечення комфортної та безпечної життєдіяльності людини в межах будівель та споруд необхідно створювати і стабільно підтримувати оптимальні мікрокліматичні параметри внутрішнього середовища. Ці умови мають відповідати встановленим санітарно-гігієнічним нормам і виробничим регламентам, які визначаються функціональним призначенням приміщення, характером технологічних процесів, що там здійснюються, та особливостями трудової діяльності. Рациональне регулювання температурного режиму, вологості, повітрообміну, освітлення та інших факторів мікроклімату є ключовим чинником збереження здоров'я, підвищення продуктивності праці та дотримання вимог охорони праці відповідно до національних і міжнародних стандартів.

Мікроклімат внутрішнього середовища приміщень є результатом постійної взаємодії змінних зовнішніх чинників та антропогенних впливів, що виникають у процесі життєдіяльності людини. До таких впливів належать виділення тепла, вологи, пилових частинок, газів та інших речовин, які змінюють фізико-хімічні параметри повітряного середовища. Зовнішні кліматичні умови – температура, атмосферний тиск, вологість, сонячна радіація також безпосередньо впливають на формування мікроклімату, особливо в умовах недостатньої теплоізоляції або вентиляції. Відповідність мікрокліматичних показників нормативним вимогам є критичною для

забезпечення комфортного перебування людини, адже комфорт – це суб’єктивне відчуття, що виникає внаслідок сенсорного сприйняття зовнішніх подразників.

Найбільш керованими параметрами, що впливають на тепловий комфорт людини та ефективність енергоспоживання в будівлях, є температура повітря, його відносна вологість і швидкість руху. Саме ці показники формують базові мікрокліматичні умови, які підлягають регулюванню за допомогою інженерних систем опалення, вентиляції та кондиціонування, і безпосередньо визначають рівень енергетичних витрат на забезпечення комфортного середовища. Додатковими регульованими чинниками виступають температура поверхонь предметів у приміщенні, інтенсивність тепловіддачі людського тіла та його здатність до терморегуляції, що значною мірою залежить від теплоізоляційних властивостей одягу, його здатності пропускати пару та повітря. У той час як основні мікрокліматичні параметри є предметом технічного контролю, інші фактори пов’язані з індивідуальними фізіологічними особливостями людини, її адаптацією до навколишнього середовища та здатністю підтримувати тепловий баланс. Комплексне управління цими умовами дозволяє досягти оптимального поєднання енергетичної ефективності та комфортності життєвого простору відповідно до сучасних нормативних вимог.

Рівень енергоспоживання в будівлях значною мірою залежить від фізичних параметрів внутрішнього середовища, які визначають ефективність мікрокліматичних систем і комфортність умов перебування. До ключових показників належать середня температура повітря в приміщенні та її динаміка протягом певного періоду, усереднена температура внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій, а також рівень вологості та санітарно-гігієнічний стан повітря. Ці характеристики впливають не лише на тепловий баланс, а й на загальну енергоефективність будівлі. Оскільки основна життєдіяльність людини відбувається в межах обслуговувальної (робочої) зони – тобто простору, де здійснюється праця, навчання або відпочинок. Усі інженерні системи мікроклімату, включно з засобами теплозахисту огорожувальних елементів, повинні бути спрямовані на забезпечення нормативного рівня комфорту саме в цій зоні. При цьому важливо досягати оптимального балансу між якістю мікроклімату та мінімізацією енергетичних витрат, що відповідає сучасним вимогам сталого будівництва та енергоощадних технологій.

Комфортні мікрокліматичні умови в приміщеннях визначаються такими параметрами, за яких людина, перебуваючи в межах обслуговувальної або робочої зони, не відчуває теплового дискомфорту – тобто не зазнає перегрівання чи переохолодження.

Забезпечення таких умов є ключовим завданням сучасних інженерних систем, які регулюють мікроклімат у будівлях. До них належать системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, що функціонують у комплексі для підтримання оптимальних температурних і гігієнічних показників. Відповідно до класифікації за рівнем тепловиділення, більшість приміщень цивільного призначення: житлові, адміністративні, навчальні тощо – належать до категорії з низькою інтенсивністю тепловиділення. Такі приміщення потребують додаткового теплопостачання в холодний період року, при цьому для зниження енергетичних витрат доцільно застосовувати природну вентиляцію, яка забезпечує необхідний повітрообмін без використання енергоємного обладнання. У холодний період року в приміщеннях із низьким рівнем тепловиділення часто спостерігається нерівномірний розподіл температури по об'єму, що може призводити до локального дискомфорту в робочій зоні. Одним із ефективних способів часткового вирівнювання температурного поля є раціональне розміщення припливних і витяжних вентиляційних отворів.

Правильно організований повітрообмін сприяє більш рівномірному перемішуванню повітряних мас, зменшенню температурних градієнтів між різними зонами приміщення та забезпеченню стабільних мікрокліматичних умов. Такий підхід дозволяє не лише покращити тепловий комфорт, а й оптимізувати роботу систем опалення та вентиляції, знижуючи загальне енергоспоживання.

Енергетичний баланс приміщення визначається взаємодією між тепловтратами та теплонадходженнями, які впливають на мікроклімат і рівень енергоспоживання. До основних джерел тепловтрат належать недостатньо ізольовані огорожувальні конструкції, інфільтрація холодного повітря, вентиляція без рекуперації та теплове випромінювання назовні. Натомість теплонадходження забезпечуються сонячною радіацією, побутовими приладами, присутністю людей та внутрішніми технологічними процесами. Раціональне управління цими чинниками дозволяє створити комфортні умови в обслуговувальній зоні приміщення з мінімальними енерговитратами.

Перелік основних джерел тепловтрат і теплонадходжень у приміщеннях наведені на рисунку 2.1.

Основні джерела тепловтрат у приміщеннях:

- огорожувальні конструкції: стіни, дах, підлога, вікна та двері з недостатньою теплоізоляцією;
- інфільтрація повітря: неконтрольоване проникнення холодного повітря через щілини, нещільності, вентиляційні отвори;

- тепловтрати через вентиляцію: особливо при відсутності рекуперації тепла;
- теплове випромінювання назовні: через прозорі конструкції (вікна) та неізольовані поверхні;
- теплопровідність матеріалів: низький опір теплопередачі будівельних матеріалів.

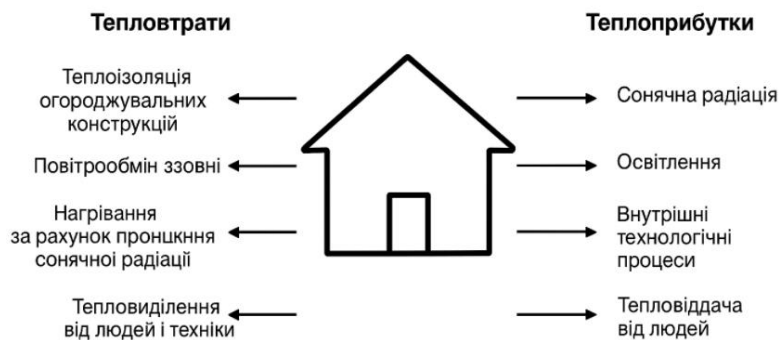


Рисунок 2.1 – Основні джерела тепловтрат і теплонадходжень у будівлі

Основні джерела теплонадходжень у приміщеннях:

- сонячна радіація: надходження тепла через вікна та прозорі фасади;
- побутові та офісні прилади: комп'ютери, освітлення, холодильники, плити тощо;
- люди: тепловиділення внаслідок метаболізму;
- технологічні процеси: обладнання, що генерує тепло (в офісах, лабораторіях, виробництві);
- освітлення: особливо лампи розжарювання та інші джерела з високим тепловим виходом.

2.2 Теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій

На тлі загострення глобальної енергетичної кризи, що спостерігається протягом останніх років, питання підвищення теплозахисту та енергоефективності житлового фонду набуло критичної важливості. Основна причина полягає у значних обсягах споживання енергоресурсів для опалення будівель, що в багатьох країнах є найбільшою статтею загальних енерговитрат. Ця ситуація спричинила суттєве переосмислення будівельних норм у більшості розвинених держав, де вимоги до теплозахисних характеристик огорожувальних конструкцій (зокрема, до мінімально необхідного опору теплопередачі) були підвищені в середньому у 2–3,5 рази, залежно від типу та

призначення будівлі. Таке посилення нормативів є прямим і необхідним заходом, спрямованим на скорочення теплових втрат, зменшення залежності від імпорту енергоносіїв та мінімізацію операційних витрат на обігрів будівель.

Наприклад, у 2010 році нормативне значення опору теплопередачі зовнішніх стін для житлових і громадських будівель в Україні становило $2,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ для І кліматичної зони. Цей показник був встановлений згідно з ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель». У 2018 році, відповідно до ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель», це значення для І кліматичної зони вже складало $3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. На цей час діє вже ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель», а значення складає $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

Чим більше значення опору теплопередачі (R) для огорожувальних конструкцій, тим значення теплових втрат будуть меншими, тобто: опір теплопередачі (R), вимірюється в $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, – це міра здатності огорожувальної конструкції (стіни, даху, вікна тощо) перешкоджати проходженню тепла. Це обернена величина до коефіцієнта теплопередачі (U). Чим більше значення R , тим кращими є теплоізоляційні властивості конструкції. Теплові втрати (або тепловий потік, Q) через конструкцію зворотно пропорційні опору теплопередачі. Це впливає із закону Фур'є (або в цьому контексті, його застосування до теплопередачі через стіну):

$$(Q) \propto \frac{\Delta T}{R}. \quad (2.1)$$

Якщо перетворити відношення пропорційності на повну формулу (рівність), вона виглядатиме так:

$$Q = \frac{A \cdot \Delta T}{R}; \quad (2.2)$$

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T, \quad (2.3)$$

де Q – тепловий потік (теплові втрати), Вт;

A – площа огорожувальної конструкції, м^2 ;

ΔT – різниця температур, К;

U – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Огорожувальні конструкції – це елементи будівлі, які відокремлюють внутрішнє середовище від зовнішнього: стіни, покрівля, підлога, вікна, двері. Їхні теплотехнічні властивості визначаються такими показниками, як коефіцієнт теплопровідності матеріалів (λ), опір теплопередачі (R), тепловтрати через конструкцію, а також теплова інерція та теплостійкість. Ці параметри впливають на здатність конструкції зберігати тепло взимку та запобігати перегріванню влітку.

Згідно з [3], мінімально допустимі значення опору теплопередачі для різних типів конструкцій залежать від кліматичної зони, призначення будівлі та її енергетичного класу. Наприклад, для зовнішніх стін житлових будинків у Харкові (І кліматична зона) нормативне значення R має бути не менше $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. У [3] також наведено формули для розрахунку приведенного опору теплопередачі з урахуванням лінійних тепловтрат.

Вимоги до теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій наведені у нормативних документах:

- Мінімальні вимоги до опору теплопередачі для різних типів конструкцій наведені у [3];
- Методика вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель розглянута у [5].

Підвищення енергоефективності будівель значною мірою залежить від удосконалення теплозахисних властивостей стінових огорожувальних конструкцій, що передбачає збільшення їх опору теплопередачі. Цей показник визначає здатність конструкції протидіяти втратам тепла, і його оптимізація досягається шляхом застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів. Важливо, щоб ізоляційний шар був надійно захищений від атмосферних впливів за допомогою оздоблювального покриття, яке не лише виконує захисну функцію, а й сприяє збереженню або покращенню архітектурного вигляду фасаду. Вимоги до конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією наведені у [8].

Комплекс заходів з термомодернізації включає утеплення зовнішніх і внутрішніх перегородок, герметизацію швів, заміну віконних і дверних блоків, а також оптимізацію вентиляційних систем. Однак такі втручання повинні базуватися на попередньому аналізі функціонального призначення приміщень, їх тепловологісного режиму та конструктивних особливостей. Ігнорування цих аспектів може призвести до порушення внутрішнього мікроклімату, зокрема до надмірного накопичення вологи, конденсації на поверхнях, зниження рівня комфорту або навіть до створення умов, непридатних для постійного проживання. Тому термомодернізація має здійснюватися з урахуванням будівельної фізики, санітарно-гігієнічних норм та енергетичних стандартів, що забезпечують довготривалий ефект і безпечну експлуатацію об'єкта.

Промерзання стінових перегородок є наслідком порушення теплотехнічної рівноваги конструкцій і може виникати з різних причин. Однією з найпоширеніших є помилки на етапі проектування, зокрема неправильне розміщення або недостатня ефективність теплоізоляції в конструкційних

вузлах, де часто утворюються так звані «мости холоду»¹. Додатковим чинником є заміна передбаченого проектом теплоізоляційного матеріалу на інший із гіршими теплотехнічними властивостями або часткове, неповне заповнення порожнин утеплювачем, що призводить до локальних зон тепловтрат. Важливу роль відіграє також стан вентиляції: за відсутності належного повітрообміну, особливо в герметизованих приміщеннях із закритими витяжними каналами, підвищується вологість, що сприяє конденсації вологи на внутрішніх поверхнях і подальшому промерзанню. Крім того, недотримання умов експлуатації приміщень – наприклад, використання їх не за призначенням або з порушенням режимів опалення та провітрювання також може спричинити зниження температури поверхонь нижче точки роси.

Для запобігання таким явищам застосовують додаткове утеплення стін, яке може розміщуватися як із зовнішнього, так і з внутрішнього боку огорожувальної конструкції. Зовнішнє утеплення є більш ефективним з точки зору збереження теплової інерції стіни та запобігання утворенню конденсату всередині конструкції. Внутрішнє утеплення застосовується в умовах, коли зовнішнє втручання неможливе (наприклад, у пам'ятках архітектури або при реконструкції фасадів). У деяких випадках, за наявності технічного обґрунтування, використовують комбінований підхід – поєднання зовнішнього та внутрішнього утеплення, що дозволяє досягти підвищеного рівня теплозахисту, але потребує ретельного розрахунку для уникнення зсуву точки роси всередину конструкції.

Нанесення теплоізоляційного матеріалу на внутрішній поверхні стіни має такі позитивні якості:

- теплоізоляційний матеріал, який не має достатньої здатності до опору впливам зовнішнього середовища, перебуває в сприятливих умовах і не потребує додаткового захисту із застосуванням дорогих засобів підмащування;
- здійснення робіт з улаштування теплозахисту може здійснюватися в будь-яку пору року незалежно від способу кріплення.

Недоліки нанесення теплозахисту на внутрішній поверхні стіни з боку приміщення такі:

- зменшення площі приміщення шляхом збільшення товщини стіни;
- необхідність улаштування (з метою виключення випадання конденсату) додаткового теплозахисту в кутових місцях прилягання плит і перекриттів до зовнішніх стін;

¹ Міст холоду або місток холоду – це локальна зона в огорожувальній конструкції, де тепло передається швидше, ніж у сусідніх ділянках. Виникає через перерву або зменшення теплоізоляції, контакт різних матеріалів, або геометричні особливості конструкції (наприклад, кути, стики, перемички).

- необхідність улаштування пароізоляційного шару перед теплоізоляційним матеріалом із боку приміщення з метою захисту стіни від зволоження;
- перебування матеріалу стінової конструкції в зоні низьких температур, що знижує теплову інерцію огороження;
- неможливість захистити конструктивні стінові стики будинків від протікань;
- неможливість змінювати архітектурно-художній вигляд фасаду;
- необхідність відселення мешканців;
- складність установлення теплоізоляції в місцях розміщення приладів опалення, а також у межах товщини підлоги.

Розміщення теплоізоляційного шару на зовнішній поверхні стінових конструкцій є найбільш ефективним способом підвищення теплозахисту будівлі, що підтверджується як практикою, так і нормативними вимогами. Такий підхід дозволяє сформувати суцільну термічну оболонку, яка мінімізує ризик утворення містків холоду. Завдяки зовнішньому утепленню відпадає потреба в облаштуванні пароізоляційного шару, оскільки точка роси зміщується ближче до зовнішнього краю конструкції, що знижує ризик конденсації вологи всередині стіни. Особливо актуальним є цей метод для великопанельних будівель, де існує потреба в додатковому захисті стиків від проникнення вологи. Крім того, зовнішнє утеплення дає змогу не лише покращити теплотехнічні характеристики, а й оновити архітектурний вигляд фасаду, застосовуючи декоративні оздоблювальні системи. Під час монтажу теплоізоляції можна одночасно усунути дефекти стін, що підвищує загальну якість конструкції.

Важливо й те, що матеріал стіни перебуває в зоні позитивних температур, що сприяє його довговічності та стабільності. Зовнішнє розміщення утеплювача також не впливає на корисну площу приміщень, що є додатковою перевагою в умовах обмеженого простору.

Враховуючи всі ці переваги, чинні будівельні норми, зокрема [3], однозначно рекомендують виконувати теплоізоляцію саме з зовнішнього боку огорожувальних конструкцій. Внутрішнє утеплення допускається лише у виняткових випадках, коли зовнішнє втручання неможливе – наприклад, у будівлях, що мають статус архітектурно-історичних пам'яток, де збереження фасаду є пріоритетом. У таких ситуаціях внутрішнє утеплення потребує особливо ретельного проєктування з урахуванням вологісного режиму, паропроникності матеріалів і ризику зміщення точки роси.

2.3 Методики розрахунку енергетичного балансу

Енергетичний баланс будівлі та її інженерних систем – це кількісне співвідношення між усіма видами енергії, що надходять до будівлі, споживаються в ній та втрачаються через огорожувальні конструкції, вентиляцію, інфільтрацію та інші процеси. Він є основою для оцінки енергоефективності будівлі, визначення її енергетичного класу та розробки заходів з енергозбереження.

У найзагальнішому вигляді енергетичний баланс описує, скільки енергії потрібно для забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях (опалення, охолодження, вентиляція, гаряче водопостачання, освітлення), скільки енергії надходить із зовнішніх джерел (електроенергія, газ, теплова енергія тощо), скільки генерується всередині (наприклад, від людей, приладів, сонячної радіації), і скільки втрачається через конструкції або системи.

Розрахунок енергетичного балансу базується на таких складових:

- тепловтрати: через зовнішні стіни, вікна, дах, підлогу, вентиляцію, інфільтрацію повітря;
- теплонадходження: від сонячної радіації, побутових приладів, освітлення, людей, технологічного обладнання;
- споживання енергії: для опалення, охолодження, вентиляції, ГВП, освітлення;
- втрати в системах: теплові втрати в трубопроводах, неефективна робота обладнання, втрати при зберіганні енергії;
- відновлювані джерела енергії: сонячні колектори, теплові насоси, фотоелектричні системи, які зменшують потребу в зовнішньому постачанні енергії.

Енергетичний баланс може бути щомісячним, сезонним або річним, і він враховує кліматичні умови регіону, режим експлуатації будівлі, тип і стан огорожувальних конструкцій, ефективність інженерних систем. Для розрахунку використовуються стандартизовані методики, які вказані у нормативах [5–7].

Результатом розрахунку енергетичного балансу є питомі показники енергоспоживання ($\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік}$), які використовуються для присвоєння будівлі енергетичного сертифіката та визначення її енергетичного класу (від А до G). Це дозволяє порівнювати будівлі між собою, планувати заходи з термомодернізації та обґрунтовувати інвестиції в енергоефективні технології.

Клас енергетичної ефективності будівель встановлюється відповідно даним, наведеним у таблиці 2.1 [9], залежно від показника, Δ_{EP} , %, який розраховується за формулою:

$$\Delta_{EP} = \frac{EP_{use} - EP_p}{EP_p} \cdot 100, \quad (2.4)$$

де EP_{use} – загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні, що розраховується за формулою (2.5);

EP_p – граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні житлових та громадських будівель, що встановлюється згідно з мінімальними вимогами до енергетичної ефективності будівель з урахуванням вимог частини другої статті 6 [1].

Загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні (EP_{use}), кВт · год/м² [кВт · год/м³] розраховується за формулою:

$$EP_{use} = EP_{H,use} + EP_{C,use}, \quad (2.5)$$

де $EP_{H,use}$ – питома енергоспоживання при опаленні, кВт · год/м², [кВт год/м³];

$EP_{C,use}$ – питома енергоспоживання при охолодженні, кВт · год/м², [кВт год/м³].

Таблиця 2.1 – Класи енергетичної ефективності будівель [9]

Клас енергетичної ефективності будівель	Відсоткові показники, Δ_{EP}
A	$\Delta_{EP} < -50$
B	$-50 \leq \Delta_{EP} < -20$
C	$-20 \leq \Delta_{EP} \leq 0$
D	$0 < \Delta_{EP} \leq 20$
E	$20 < \Delta_{EP} \leq 35$
F	$35 < \Delta_{EP} \leq 50$
G	$50 < \Delta_{EP}$

Таким чином, енергетичний баланс – це не лише технічний розрахунок, а й інструмент стратегічного управління енергоспоживанням, що має вирішальне значення для сталого розвитку, зниження викидів парникових газів і досягнення цілей енергетичної безпеки.

Питання для самоконтролю

1. Дайте чітке визначення енергетичного балансу будівлі. Який основний закон фізики лежить в його основі?
2. Назвіть основні джерела надходження (приходу) тепла в будівлю. Який з них найменш передбачуваний?
3. Які основні механізми втрат (витрат) тепла з будівлі? Поясніть різницю між теплопередачею (трансмisiєю) та вентиляцією.
4. Як термічний опір (R -величина) стін, даху та вікон впливає на трансмісійні втрати тепла? Які сучасні матеріали використовують для його збільшення?
5. Що таке внутрішні теплонадходження і які фактори їх формують? Як їхнє ігнорування може вплинути на розрахунок потреби в опаленні?
6. Що таке енергетичний паспорт будівлі і яку роль у ньому відіграє розрахунок енергетичного балансу? Який показник є ключовим для оцінки енергоефективності?
7. Окрім огорожувальних конструкцій, які ще зовнішні та внутрішні фактори (наприклад, інфільтрація, режим експлуатації) суттєво впливають на баланс?

3 ПАСИВНІ ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

3.1 Теплоізоляція та енергоефективні будівельні матеріали

У процесі експлуатації конструкції додаткового теплозахисту піддаються впливу комплексу зовнішніх і внутрішніх чинників, що можуть негативно позначатися на їхній функціональній ефективності та довговічності. До зовнішніх впливів належать сонячна радіація, атмосферні опади, коливання температури зовнішнього середовища, зміни вологості повітря, акустичні навантаження, рух повітряних мас, дія хімічних речовин і газів, а також біологічні чинники, включаючи мікроорганізми, комах і гризунів. Внутрішні впливи охоплюють механічні навантаження різної тривалості (постійні, тимчасові, короточасні), температурні коливання в межах приміщення, підвищену вологість, морозне обдимання та сейсмічні хвилі. Термін експлуатації конструкції визначається її здатністю протистояти зазначеним впливам і відповідати нормативним вимогам щодо міцності, герметичності, технологічності та естетичної привабливості. Для забезпечення надійності теплозахисних елементів необхідно передбачити їхню вогнестійкість відповідно до чинних стандартів, здатність обмежувати або повністю виключати проникнення вологи в структуру матеріалу, а також стійкість до механічних пошкоджень, включаючи навмисні дії, обслуговування, а також забезпечувати можливість локального ремонту без демонтажу основних елементів.

З метою відповідності технологічним вимогам конструкція додаткового теплозахисту повинна бути придатною до серійного виробництва, транспортування, простого монтажу та обслуговування, а також забезпечувати можливість локального ремонту.

Утеплювальні матеріали, що застосовуються в будівництві, забезпечують збереження теплової енергії шляхом утримання повітря в нерухомому стані всередині своєї структури. Такий ефект досягається завдяки комірчастій будові матеріалу, яка може мати різну щільність. Зі збільшенням щільності зменшується рухливість повітря, що сприяє зниженню теплопередачі. Водночас надто низька щільність структури призводить до інтенсивного повітрообміну, що спричиняє втрати тепла через утеплювальний шар. У таких випадках для досягнення нормативного рівня термічного опору необхідне збільшення товщини теплоізоляції, що є економічно недоцільним і ускладнює технологічні процеси монтажу. Крім того, зменшення щільності матеріалу супроводжується підвищенням його стисливості, що негативно впливає на механічну стабільність і скорочує термін експлуатації теплоізоляційного шару.

Згідно з положеннями [5, 10] вибір теплоізоляційного матеріалу має враховувати оптимальне співвідношення між щільністю, теплопровідністю, деформаційною стійкістю та довговічністю, з урахуванням умов експлуатації та конструктивних особливостей огорожувальних елементів.

У сучасній будівельній практиці застосовують різноманітні теплоізоляційні матеріали, основні з яких:

- легкі бетони (керамзитобетон, перлітобетон, шлакобетон, газо- і пінобетон та ін.);
- «теплі» розчини (цементо-перлітовий, гіпсоперлітовий, поризований та ін.);
- вироби з органічних матеріалів (плити деревостружкові, фібролітові, комишитові та ін.);
- мінераловатні та скловолокнисті матеріали (мінераловатні мати, мінераловатні плити м'які, напівтверді, тверді і підвищеної твердості, плити зі скловолокна та ін.);
- полімерні матеріали (пінополістирол, пінопласт, пінополіуретан, піноскло або газоскло та ін.);
- композиційні матеріали і вироби з них (перлітопластобетон та ін.).

Використання того чи іншого конкретного матеріалу для теплозахисту стін залежить від цілої низки визначальних чинників, серед яких: довговічність, необхідна товщина шару теплоізоляції, технологічна прийнятність розміщення матеріалу на стіні, маса теплоізоляційної конструкції, вартість матеріалу, трудомісткість устрою, можливість транспортування матеріалу на будівельний майданчик.

У сучасній практиці термомодернізації будівель найбільш поширеними матеріалами для облаштування додаткової теплоізоляції є полімерні теплоізолятори, зокрема пінополістирол і пінополіуретан, а також вироби на основі мінеральної вати та скловолокна. Застосування зазначених матеріалів забезпечує мінімальну масу теплоізоляційної конструкції, що є важливим критерієм при проєктуванні систем теплозахисту. В умовах широкого асортименту теплоізоляційних виробів, які відрізняються за технологією монтажу, вартістю, фізико-технічними характеристиками та коефіцієнтом теплопровідності, виникає необхідність обґрунтованого вибору матеріалу з урахуванням економічної доцільності. Основним критерієм при цьому є повна собівартість встановлення одного квадратного метра утеплювача, яка включає витрати на матеріал, транспортування, монтажні роботи та супутні витрати.

Для об'єктів, що підлягають термомодернізації, додатково враховується розрахунковий термін окупності заходів з утеплення, що визначається на основі енергетичного аудиту та прогнозованих показників енергоефективності. Існує

тенденція до зростання вартості теплоізоляційних матеріалів зі збільшенням їх щільності та міцності, що пояснюється складністю виробництва та покращеними експлуатаційними властивостями. Водночас підвищення щільності та міцності матеріалу позитивно впливає на його довговічність, оскільки ці параметри є ключовими індикаторами стабільності комірчастої структури, що забезпечує збереження теплоізоляційних властивостей протягом тривалого часу. Незважаючи на це, питання нормативно підтвердженої довговічності теплоізоляційних матеріалів у складі конструкцій додаткового теплозахисту залишається недостатньо дослідженим. У зв'язку з цим при оцінці терміну експлуатації таких матеріалів переважно використовуються узагальнені статистичні дані, отримані на основі практичного досвіду експлуатації та результатів випробувань, що не завжди враховують специфіку конкретних умов застосування.

Для підвищення енергоефективності стін житлових і громадських будівель, що вже експлуатуються, доцільним є застосування теплоізоляційних матеріалів на основі пінополістиролу, мінеральної вати або скловолокна.

Зазначені матеріали характеризуються низькою теплопровідністю, невеликою питомою вагою, технологічною зручністю монтажу та відповідністю вимогам пожежної безпеки згідно з [8, 11, 12]. Вибір оптимального типу утеплювача здійснюється з урахуванням конструктивних особливостей будівлі, кліматичних умов регіону, експлуатаційного режиму приміщень, а також економічної доцільності. Товщина теплоізоляційного шару визначається розрахунковим шляхом відповідно до методики, викладеної у [3, 5], з урахуванням необхідного термічного опору огорожувальних конструкцій, що забезпечує нормативний рівень теплозахисту будівлі.

З метою систематизації наявної інформації та оптимізації процесу вибору ефективного варіанта додаткової теплоізоляції для огорожувальних конструкцій розроблено нормативну класифікацію технічних рішень теплозахисту стін.

Згідно з цією класифікацією, технічні рішення щодо теплозахисту поділяються за трьома основними ознаками: за місцем розташування теплоізоляційного шару (з боку внутрішньої або зовнішньої поверхні стіни), за типом теплоізоляційного матеріалу (мінеральні, полімерні, органічні, композиційні тощо), а також за видом матеріалу, що виконує функцію захисного шару (штукатурні системи, облицювальні панелі, вентильовані фасади, гідроізоляційні мембрани тощо). Такий підхід дозволяє забезпечити відповідність технічних рішень конструктивним, експлуатаційним і нормативним вимогам, передбаченим в [3, 8, 13].

3.1.1 Технології та методи утеплення зовнішніх стін

Починаючи з початку ХХІ століття, в Україні сформувалася розвинена галузь будівельної індустрії, орієнтована на виробництво та монтаж систем теплозахисту огорожувальних конструкцій будівель. Основними напрямками діяльності цієї галузі є розроблення конструктивно-технологічних рішень для утеплення стін, виготовлення теплоізоляційних матеріалів відповідно до вимог національних та європейських стандартів, а також впровадження сучасних методів термомодернізації житлового і громадського фонду. З урахуванням зростаючих вимог до енергоефективності будівель, зазначена галузь активно інтегрує інноваційні технології, сертифіковані матеріали та комплексні рішення, що відповідають положенням нормативних документів, які регламентують якість, довговічність і безпечність теплоізоляційних систем.

Технологічний вибір способу нанесення теплоізоляційного та захисно-декоративного шарів у системах додаткового теплозахисту стін здійснюється з урахуванням трьох основних класифікаційних ознак: за походженням компонентів, що входять до складу матеріалів (органічні або неорганічні), за умовами виготовлення (виготовлені безпосередньо на будівельному майданчику або у вигляді серійної заводської продукції), а також за способом кріплення до основи (механічне, клейове, комбіноване або шляхом пошарового нанесення). Відповідно до конструктивно-технологічних рішень, способи встановлення теплоізоляційних матеріалів поділяються на кілька типів. Зокрема, нанесення за технологією штукатурення або будівельної кладки застосовується для таких матеріалів, як пінополіуретан, «теплі» розчини², легкі бетони тощо; при цьому теплозахисний шар з легких бетонів може формуватися шляхом пошарового нанесення безпосередньо на поверхню стіни або методом заливання між стіною та опалубкою. Іншим варіантом є навішування теплоізоляційних плит за допомогою будівельних монтажних стрижнів, що характерно для напівтвердих і твердих плит зі скловолокна, пінополістиролу, пінопласту та аналогічних матеріалів. Також застосовується спосіб закріплення теплоізоляційних елементів на напрямних, який передбачає монтаж мінераловатних плит або плит зі скловолокна в системах вентильованих фасадів. Кожне з наведених рішень обирається з урахуванням типу огорожувальної конструкції, умов експлуатації, вимог до

² «Теплі» розчини – це різновид будівельних розчинів (штукатурних, кладочних, монтажних), які мають знижений коефіцієнт теплопровідності порівняно зі звичайними цементно-піщаними або вапняними сумішами. Їхнє основне призначення – зменшення містків холоду в конструкціях, особливо в місцях стиків і швів.

енергоефективності, пожежної безпеки та довговічності.

Монтаж теплоізоляційного шару в системах додаткового теплозахисту стін може здійснюватися з внутрішнього боку, з зовнішнього боку або одночасно з обох боків огорожувальної конструкції. Залежно від проектного рішення, теплоізоляція може передбачати наявність вентильованого або невентильованого повітряного прошарку. Формування захисно-декоративного покриття поверх утеплювача реалізується шляхом пошарового нанесення оздоблювальних складів на цементній, полімерній чи комбінованій основі, або шляхом механічного чи клейового кріплення облицювальних елементів. До таких елементів належать керамічні та бетонні плити, тонколистовий метал, дерев'яні панелі, полімерні вироби та інші матеріали, що відповідають вимогам експлуатаційної та естетичної придатності. На сьогодні найбільш поширеними є технології нанесення штукатурного шару поверх теплоізоляції, а також методи облицювання утеплювача штучними матеріалами, що забезпечують додатковий захист від атмосферних впливів і механічних навантажень.

3.1.2 Послідовність проектування теплозахисту

Проектування системи додаткового теплозахисту житлових будівель є складним багатоступеневим процесом, що охоплює низку послідовних етапів, спрямованих на забезпечення відповідності конструктивних рішень вимогам енергоефективності, довговічності, безпеки та економічної доцільності. Згідно з положеннями [3, 14] та іншими чинними нормативними документами, типовий алгоритм проектування включає чотири основні етапи.

Перший етап передбачає попереднє визначення характеру, масштабів і доцільності впровадження заходів з термомодернізації. На цьому етапі формулюється загальна концепція теплозахисту, визначаються цілі проекту, попередньо оцінюється технічний стан будівлі, її енергетичні характеристики, а також розглядаються потенційні варіанти технічних рішень. Важливою складовою є аналіз нормативних вимог до термічного опору огорожувальних конструкцій, що дозволяє сформувати вихідні дані для подальших розрахунків.

Другий етап охоплює комплексне технічне обстеження об'єкта утеплення з метою отримання достовірної інформації про стан стінових конструкцій, умови їх експлуатації та потенційні обмеження щодо впровадження теплоізоляційних систем. Обстеження включає:

- візуальний та інструментальний огляд огорожувальних конструкцій, що передбачає обмірювання геометричних параметрів, фіксацію дефектів, тріщин, зон зволоження, корозії арматури тощо;
- визначення характеру та інтенсивності діючих навантажень, включаючи технологічні (власна вага конструкцій, навантаження від інженерних систем),

атмосферні (вітрові, снігові), кліматичні (температурні коливання, вологість), а також вплив агресивних середовищ;

- оцінювання фізико-механічних властивостей матеріалів, що здійснюється на основі аналізу проєктної та виконавчої документації, застосування неруйнівних методів контролю (ультразвукове зондування, термографія, вологомірні вимірювання) та, за потреби, лабораторних випробувань відібраних зразків;

- аналіз результатів обстеження, який дозволяє виявити слабкі місця конструкцій, визначити необхідність підсилення або ремонту, а також сформулювати технічне завдання на проєктування системи утеплення.

На третьому етапі здійснюється розроблення технічного рішення щодо додаткового теплозахисту. Визначаються тип і товщина теплоізоляційного матеріалу відповідно до розрахункового термічного опору, обирається спосіб монтажу (зовнішнє, внутрішнє або комбіноване утеплення), тип захисно-декоративного шару (штукатурна система, вентильований фасад, облицювання тощо), а також конструктивні вузли примикання, кріплення та герметизації. Усі рішення мають відповідати вимогам пожежної безпеки, паропроникності, стійкості до атмосферних впливів, механічної міцності та довговічності.

Четвертий етап включає розроблення робочої проєктної документації відповідно до вимог [15], яка містить креслення, специфікації матеріалів, пояснювальну записку з техніко-економічним обґрунтуванням, результати розрахунків термічного опору, а також заходи з охорони праці, пожежної безпеки та охорони довкілля. На цьому етапі також визначаються строки виконання робіт, кошторисна вартість, логістичні рішення щодо постачання матеріалів і організація будівельного процесу.

Таким чином, проєктування теплозахисту є комплексним інженерним завданням, що потребує міждисциплінарного підходу, врахування нормативних вимог, технічного стану об'єкта, кліматичних умов регіону та економічної ефективності запропонованих рішень.

3.2 Архітектурно-планувальні рішення. Орієнтація будівлі та забезпечення нормативної інсоляції

У процесі архітектурного проєктування житлових будівель важливим чинником є орієнтація об'єкта на місцевості, що безпосередньо впливає на мікроклімат приміщень, енергоефективність будівлі, санітарно-гігієнічні умови проживання та відповідність нормативним вимогам щодо природного освітлення. Орієнтація визначається з урахуванням кліматичних особливостей регіону, переважаючих напрямків вітру, конфігурації рельєфу, розташування

існуючої забудови, зелених насаджень, водних об'єктів та функціонального зонування території.

Основним завданням є забезпечення оптимального теплового режиму та достатнього рівня природного освітлення, особливо в житлових, навчальних, дитячих і робочих приміщеннях, які орієнтуються переважно на південні, південно-східні або південно-західні напрямки. Допоміжні приміщення (санвузли, комори, гардеробні, коридори) доцільно розміщувати з північного боку, де інсоляція менш інтенсивна.

Інсоляція визначається як тривалість і кількість сонячного випромінювання, що потрапляє у приміщення протягом світлового дня.

Відповідно до вимог [16, 17], мінімальна тривалість прямої сонячної інсоляції у житлових кімнатах повинна становити не менше 2,5 години на добу в період з 22 березня до 22 вересня (рис. 3.1). Карта території України з показником інсоляції (сонячної активності) наведена на рисунку 3.2. Для спеціалізованих об'єктів (дошкільні заклади, школи, лікувальні установи) ці показники можуть бути вищими відповідно до галузевих норм.



Рисунок 3.1 – Необхідна тривалість інсоляції протягом року

Для забезпечення нормативної інсоляції передбачаються такі проєктні рішення:

- орієнтація віконних прорізів відповідно до сторін світу;
- застосування сонцезахисних елементів (козирки, навіси, жалюзі, екрани);
- дотримання нормативних відстаней між будівлями для запобігання затіненню;
- оптимізація внутрішньої планувальної структури з урахуванням режиму освітлення житлових приміщень.

Раціональні архітектурно-планувальні рішення сприяють формуванню сприятливого мікроклімату, зниженню витрат на штучне освітлення та опалення, підвищенню енергоефективності будівлі, а також забезпеченню комфортних і безпечних умов проживання. У контексті сучасних вимог до

сталого будівництва та енергозбереження, орієнтація будівлі та інсоляція розглядаються як ключові параметри при сертифікації об'єктів за міжнародними системами оцінки (BREEAM, LEED, DGNB).

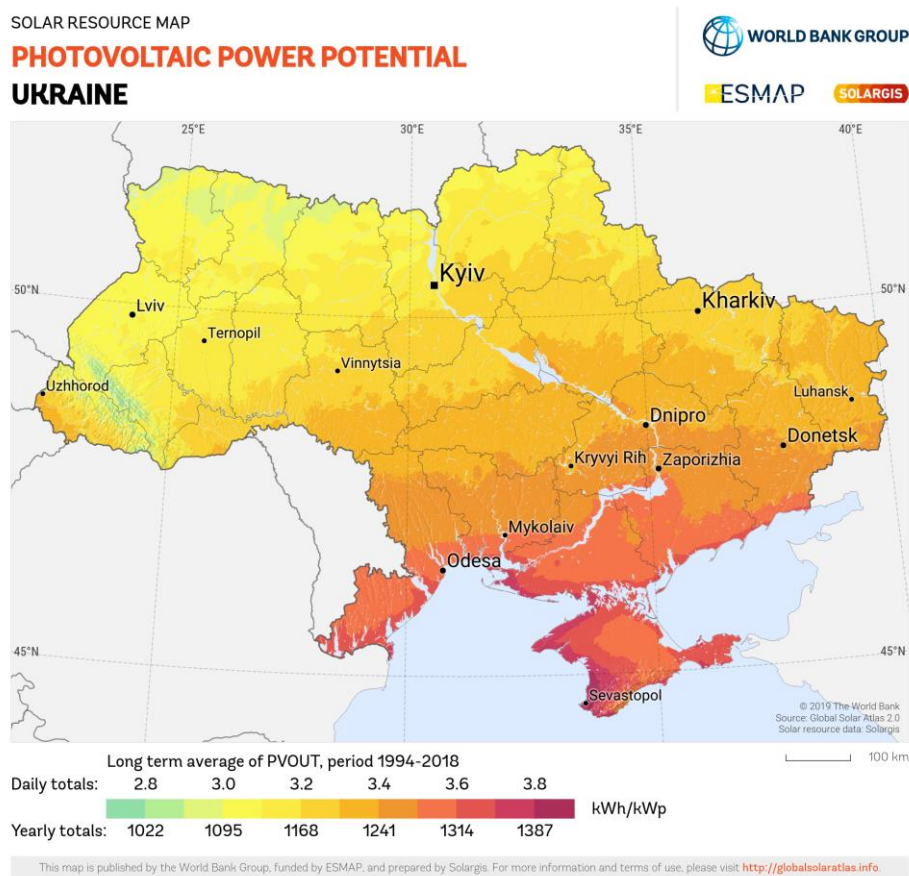


Рисунок 3.2 – Карта території України з показником інсоляції (сонячної активності)

3.3 Сучасні віконні та дверні конструкції

Світлопрозорі елементи фасадів, зокрема віконні та балконні конструкції, є важливою складовою архітектурного і функціонального рішення житлових будівель. Їхня сумарна площа може становити до 40–50 % від загальної площі зовнішніх стін, що зумовлює підвищені вимоги до теплоізоляційних, світлотехнічних і експлуатаційних характеристик. Основне призначення таких конструкцій – забезпечення природного освітлення приміщень, візуального контакту з довкіллям, а також участь у формуванні мікроклімату внутрішнього середовища.

У холодний період року віконні системи повинні забезпечувати ефективне збереження тепла, не перешкоджаючи проникненню сонячного випромінювання, яке сприяє пасивному нагріванню приміщень. Важливо, щоб температура внутрішньої поверхні скління залишалася максимально

наближеною до температури повітря в приміщенні, що забезпечує комфортні умови перебування та знижує ризик утворення конденсату. Для цього застосовуються енергоощадні склопакети з низькоемісійним покриттям, багатокамерні профільні системи з терморозривом, дистанційні рамки з покращеними теплоізоляційними властивостями.

У теплий період року світлопрозорі огороження відіграють іншу важливу роль – вони повинні забезпечувати захист від перегріву приміщень, надмірного сонячного опромінення та ультрафіолетового впливу. Це досягається шляхом використання сонцезахисного скління (тонованого, дзеркального, селективного), зовнішніх і внутрішніх жалюзі, маркіз, козирків, а також систем автоматичного регулювання світлового потоку. Важливим є також забезпечення ефективної природної вентиляції через відкривання квартирок, фрамуг або інтегрованих вентиляційних клапанів, що сприяє охолодженню приміщень без застосування енергоємних кліматичних систем.

Конструкції мають відповідати вимогам щодо повітропроникності, звукоізоляції, стійкості до вітрових навантажень, герметичності та довговічності, що регламентується нормами [3, 8, 18]. У контексті сталого будівництва та енергоефективності, віконні системи розглядаються як ключовий елемент балансування теплового режиму будівлі впродовж року.

Вимоги:

- теплозахист у літній період передбачає систему заходів, спрямованих на запобігання перегріванню приміщень під дією сонячного випромінювання;
- захист від атмосферних впливів полягає в тому, що будівельні конструкції мають перешкоджати проникненню вологи, дощу та вітру всередину приміщення;
- освітлення передбачає забезпечення приміщень достатнім рівнем природної інсоляції, що гарантує комфортні умови перебування;
- прозорість передбачає, що скління має забезпечувати якісний огляд зсередини назовні, водночас обмежуючи можливість візуального проникнення ззовні;
- звукоізоляція передбачає, що конструкції повинні забезпечувати ефективне поглинання та ізоляцію шумів як із зовнішнього середовища, так і між внутрішніми приміщеннями;
- вентиляція (припливна та витяжна) передбачає функціонування системи, яка забезпечує достатній обмін повітря з надходженням свіжих потоків і підтриманням нормативних параметрів мікроклімату;
- функціональність і технологічність означають, що конструктивні рішення мають бути зручними в експлуатації, надійними, а також простими у виготовленні та монтажі.

У структурі тепловтрат житлових будівель у зимовий період значну частку (до 30 %) становлять втрати через світлопрозорі конструкції, зокрема вікна та балконні блоки. Це свідчить про те, що навіть за умови якісного додаткового утеплення стін, без комплексної модернізації віконних систем досягнення нормативного рівня енергоефективності є неможливим. Особливо актуальною ця проблема є для будівель існуючого житлового фонду, де встановлені вікна застарілих конструкцій, теплотехнічні характеристики яких суттєво відрізняються від сучасних нормативних вимог. Зокрема, опір теплопередачі таких вікон може бути втричі нижчим за нормативний, що обумовлено високою повітропроникністю, наявністю щілин у квартирках, нещільним приляганням штапиків та слабкою герметичністю міжсклового простору.

Проникнення холодного повітря в міжсклову порожнину спричинює посилену конвекцію, що істотно знижує теплозахисну здатність конструкції. У результаті температура внутрішньої поверхні скління знижується, що не лише погіршує тепловий комфорт, а й сприяє утворенню конденсату та розвитку мікробіологічних процесів. Для дерев'яних вікон старого зразка з нещільними з'єднаннями опір теплопередачі становить лише $0,17\text{--}0,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, тоді як сучасні енергоефективні склопакети з багатокамерними профілями, низькоемісійним покриттям і терморозривами здатні забезпечити значно вищі показники (понад $0,8 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$).

Ступінь ущільнення віконних систем є одним із критичних параметрів, оскільки він одночасно забезпечує зниження тепловтрат і підвищення енергоефективності, але водночас може погіршувати якість повітря в приміщенні. Надмірна герметичність перешкоджає природному повітрообміну, що зумовлює необхідність модернізації або реконструкції системи вентиляції, зокрема впровадження припливно-витяжних установок з рекуперацією тепла.

Крім того, рівень ущільнення конструкції істотно впливає на її звукоізоляційні властивості, причому цей показник нерідко має навіть важливіше значення, ніж теплотехнічні характеристики, особливо в умовах щільної міської забудови.

Отже, теплозахисні характеристики віконних систем мають оцінюватися з урахуванням їх ролі в енергозбереженні, формуванні акустичного середовища та забезпеченні належного мікроклімату в приміщеннях.

На сучасному етапі основні вимоги до віконних конструкцій (за винятком естетичних параметрів) реалізуються шляхом використання трьох основних матеріалів, а саме: деревини, ПВХ (полівінілхлориду) та алюмінію, а також їх комбінованих варіантів. Кожен із цих матеріалів має специфічні властивості, що впливають на експлуатаційні характеристики виробу. Деревина забезпечує

високі теплоізоляційні показники та екологічність, але потребує регулярного догляду та має обмежену стійкість до атмосферних впливів. Пластикові профілі вирізняються доступністю, герметичністю та низькою теплопровідністю, проте можуть деформуватися під дією температурних коливань. Алюмінієві системи характеризуються високою міцністю, довговічністю та стійкістю до корозії, але мають нижчі показники термічного опору, що компенсується застосуванням терморозривів і багатокамерних вставок.

Комбіновані конструкції, наприклад дерево-алюміній або ПВХ-алюміній, поєднують переваги різних матеріалів, забезпечуючи баланс між естетикою, енергоефективністю, звукоізоляцією та довговічністю. Вибір конкретного рішення залежить від кліматичних умов, типу будівлі, архітектурного стилю, вимог до енергозбереження та бюджету проєкту. Усі конструкції повинні відповідати вимогам нормативних документів щодо теплотехнічних, акустичних і експлуатаційних характеристик.

Сучасні віконні та балконні системи базуються на використанні багатофункціональних склопакетів, які є ключовими елементами світлопрозорих огорожень. Їх широке впровадження стало можливим завдяки розвитку доступних технологій виробництва, зокрема застосуванню високоякісних герметиків, термополірованого скла та автоматизованих методів складання. Конструктивна гнучкість склопакетів дозволяє варіювати типи скла (тепловідбивне, селективне, мультифункціональне), кількість камер, товщину дистанційних рамок, а також використовувати газонаповнення інертними газами (аргоном, криптоном) для досягнення заданих показників енергоефективності.

Найвищі значення опору теплопередачі демонструють склопакети з теплозахисним склом і заповненням камер інертними газами, що дозволяє суттєво знизити тепловтрати в холодний період року та забезпечити комфортний температурний режим у приміщеннях. Такі рішення відповідають вимогам [3, 18, 19] щодо термічної ізоляції, герметичності та довговічності.

Для забезпечення належного повітрообміну в умовах високої герметичності сучасних віконних систем передбачено використання спеціальних вентиляційних пристроїв. Зокрема, інтегровані вентиляційні клапани, що монтуються у верхній частині рами або квартирки, дозволяють здійснювати контрольований приплив зовнішнього повітря без порушення теплоізоляційних властивостей конструкції. Такі пристрої забезпечують оптимальну швидкість повітрообміну, сприяють підтриманню рівня вологості та запобігають утворенню конденсату, що особливо актуально в міжсезоння та зимовий період.

Завдяки поєднанню енергоощадних склопакетів і вентиляційних рішень сучасні віконні системи забезпечують комплексне виконання функцій теплозахисту, світлопропускання, шумоізоляції та мікрокліматичного регулювання, що відповідає вимогам сталого будівництва та нормативам енергоефективності.

Таким чином, модернізація віконних і балконних конструкцій є невід’ємною складовою термомодернізації будівель, що дозволяє досягти нормативного рівня теплозахисту, знизити експлуатаційні витрати, забезпечити сталий мікроклімат і комфортні умови проживання впродовж усього року. Вона також сприяє відповідності об’єкта сучасним вимогам енергозбереження, екологічності та стандартам сталого будівництва, зокрема в контексті сертифікації за системами BREEAM, LEED або DGNB.

Питання для самоконтролю

1. Які чинники належать до зовнішніх експлуатаційних впливів, що впливають на стан і ефективність конструкцій теплозахисту?
2. Які чинники належать до внутрішніх експлуатаційних впливів, що впливають на стан і ефективність конструкцій теплозахисту?
3. Які етапи включає процес проектування системи додаткового теплозахисту житлової будівлі та які завдання вирішуються на кожному з них?
4. Які методи обстеження конструкцій застосовуються на стадії аналізу об’єкта утеплення та як вони впливають на вибір технічного рішення?
5. Як орієнтація будівлі на місцевості впливає на тривалість інсоляції житлових приміщень та енергоефективність споруди?
6. Які проєктні заходи застосовуються для забезпечення нормативної тривалості прямого сонячного опромінення відповідно до вимог ДБН?
7. Які конструктивні та матеріальні рішення застосовуються у сучасних віконних і дверних системах для забезпечення енергоефективності та мікрокліматичного комфорту?
8. Які функції виконують склопакети в сучасних світлопрозорих огороженнях і як їх параметри впливають на теплозахисні властивості будівлі?

4 АКТИВНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

4.1 Опалення, вентиляція та кондиціонування (HVAC-системи)

HVAC – це абревіатура від англійських слів Heating, Ventilation and Air Conditioning, тобто HVAC-системи це комплекс інженерних рішень для забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях, що включає опалення, вентиляцію та кондиціонування повітря. В українській термінології часто використовується аналог – ОВіК-системи.

Основні функції HVAC-систем:

Опалення (Heating):

- забезпечує підтримку комфортної температури в холодний період року;
- може включати водяні, електричні або повітряні системи.

Вентиляція (Ventilation):

- забезпечує приплив свіжого повітря та видалення забрудненого;
- регулює рівень кисню, вуглекислого газу, вологість, запахи та мікроорганізми.

Кондиціонування (Air Conditioning):

- охолоджує повітря в теплу пору року;
- регулює температуру, вологість і чистоту повітря;
- включає фільтри, теплообмінники, зволожувачі або осушувачі.

HVAC-системи взаємодіють між собою як єдиний інженерний комплекс та впливають на температуру, вологість, якість повітря, що критично для здоров'я, продуктивності та енергоефективності.

У сучасному будівництві HVAC є ключовим елементом проєктування, особливо для сертифікації за стандартами LEED, BREEAM тощо.

HVAC-системи застосовуються у житлових будинках; офісних та комерційних приміщеннях; промислових об'єктах; медичних та освітніх установах; на транспорті (літаки, потяги, автотранспорт).

4.1.1 Системи опалення

Застарілі та фізично зношені системи опалення є одним із ключових чинників, що спричиняють зниження енергоефективності житлового фонду. Їхня модернізація дозволяє суттєво скоротити витрати на теплову енергію, необхідну для забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях.

Перед початком будь-яких робіт з оновлення теплотехнічного обладнання доцільно провести комплексне обстеження існуючої системи опалення, включаючи її основні вузли, трубопроводи, теплообмінники та регулювальні пристрої.

Одночасно потрібно здійснити теплотехнічний аналіз огорожувальних конструкцій, зокрема зовнішніх стін, для визначення фактичних тепловтрат і потенціалу енергозбереження.

Підвищення енергоефективності системи опалення будівлі можливе шляхом реалізації комплексу технічних заходів, що охоплюють як зовнішні конструктивні елементи, так і внутрішні інженерні мережі. До таких заходів належить термомодернізація будинку, яка включає додаткове утеплення зовнішніх стін, встановлення енергоефективних віконних блоків із багатокамерними склопакетами, ущільнення входних і балконних дверей для зменшення інфільтрації повітря. Модернізація теплового пункту передбачає встановлення автоматизованої регулювальної арматури, що дозволяє змінювати температуру теплоносія залежно від температури зовнішнього повітря. Обов'язковим є встановлення лічильника теплової енергії для контролю споживання, регулятору перепаду тиску для стабілізації гідравлічного режиму, регулятору витрати теплоносія відповідно до режиму теплоспоживання, а також фільтрів для очищення теплоносія. Усунення корозії та інкрустації передбачає заміну, у системі опалення, металевих труб на полімерні з високою стійкістю до агресивного середовища та виконання хімічного промивання системи.

Модернізація та технічне оновлення мереж включає використання циркуляційних насосів з частотним перетворювачем; монтаж автоматичних клапанів балансування на стояках та кульових кранів із високим класом герметичності; встановлення мембранного розширювального баку, у випадку незалежної схеми приєднання системи опалення до теплових мереж.

Модернізація або заміна опалювальних приладів передбачає встановлення сучасних радіаторів з високим коефіцієнтом тепловіддачі та термостатичних головок для індивідуального регулювання температури.

Відповідно до [20] існують такі види регулювання:

- централізоване регулювання здійснюється безпосередньо на джерелі тепла (котельні або теплоелектроцентралі), відповідно до переважаючого типу навантаження, характерного для всього району теплопостачання, що обслуговується цим джерелом;

- групове регулювання реалізується на рівні центральних теплових пунктів (ЦТП) з урахуванням домінуючого типу навантаження певної групи споживачів (наприклад, житловий квартал, мікрорайон або промислова зона). ЦТП зазвичай проєктуються для централізованого приготування гарячої води для всієї групи будівель. Після проходження теплоносія через ЦТП регулювання здійснюється переважно за параметрами опалювального навантаження;

– місцеве регулювання впроваджується на індивідуальних теплових пунктах (ІТП) кожної окремої будівлі, де температура теплоносія встановлюється за усередненим параметром, що відповідає середнім потребам усіх приміщень цієї будівлі;

– індивідуальне регулювання здійснюється безпосередньо на кожному опалювальному приладі в окремому приміщенні самим споживачем відповідно до його особистих потреб і вподобань.

Зазначені типи регулювання узгоджуються з принципами, які вже давно впроваджені та суворо дотримуються в країнах Європейського Союзу. В Україні ці принципи почали системно впроваджуватися лише у ХХІ столітті. Вони застосовуються у всіх нових проєктах і споруджуваних об'єктах, зокрема у внутрішньобудинкових системах опалення житлових та громадських будівель.

Впровадження систем моніторингу включає інсталяцію цифрових контрольно-вимірювальних приладів з функцією дистанційного зчитування даних та інтеграцію в систему енергетичного менеджменту будівлі.

Заміна способу прокладання трубопроводів системи передбачає перехід з однотрубних систем опалення (рис. 4.1) на двотрубні з поквартирним розведенням труб у межах кожної квартири, що забезпечує автономне регулювання температури в окремих приміщеннях (рис. 4.2).

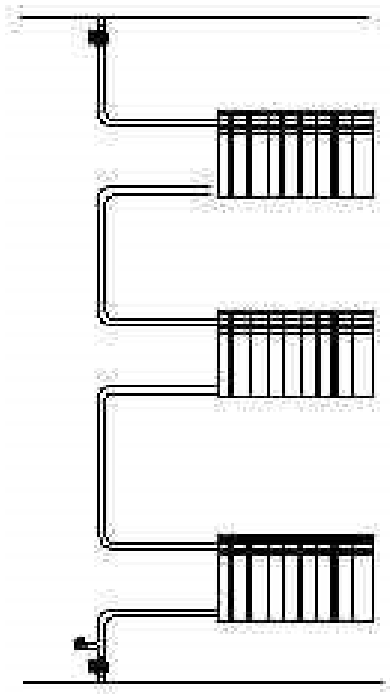


Рисунок 4.1 – Однотрубна, вертикальна система опалення

Застосування зазначених заходів дозволяє не лише знизити енергоспоживання, а й підвищити комфорт проживання, забезпечити відповідність сучасним нормативам та зменшити експлуатаційні витрати.

Регулювання систем опалення здійснюється завдяки автоматичним і ручним засобам керування, які впливають на параметри теплоносія – температуру, тиск, витрату – відповідно до зовнішніх умов, типу навантаження та потреб споживача.

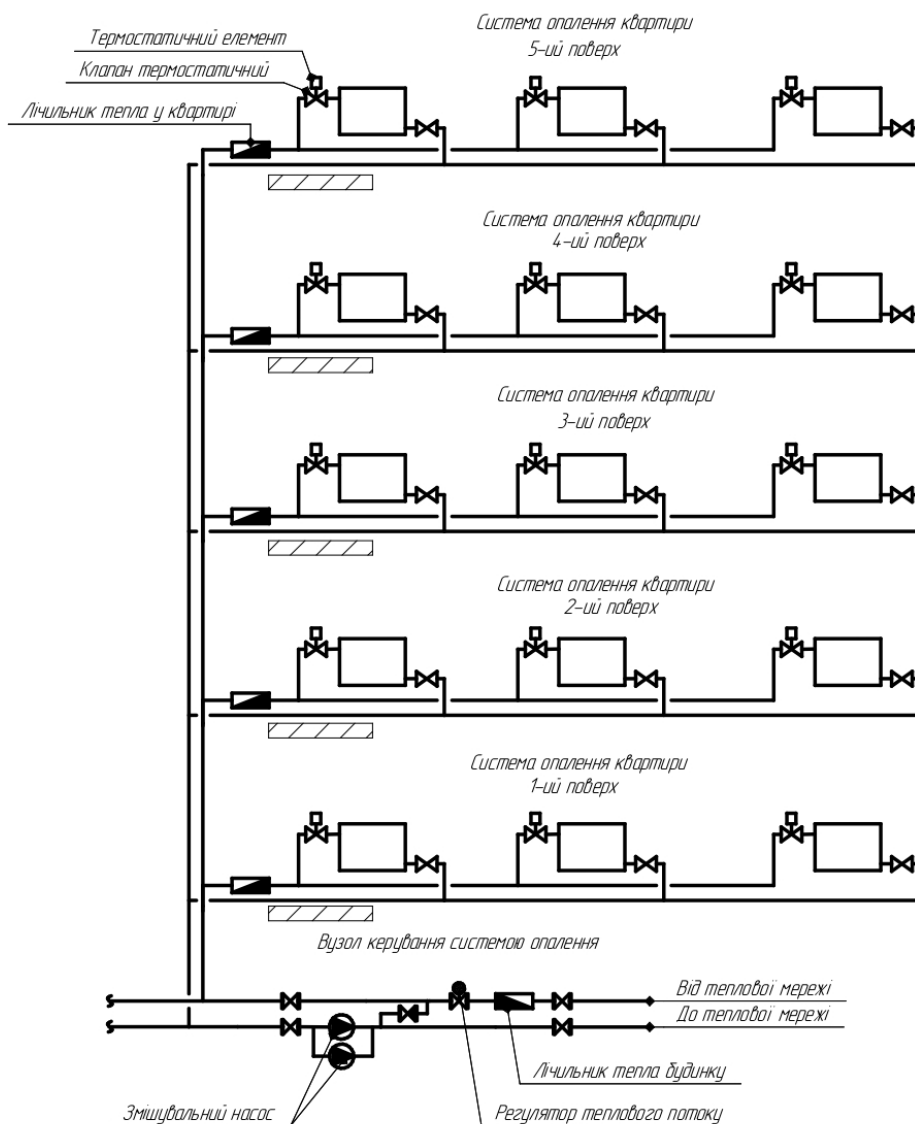


Рисунок 4.2 – Двотрубна, горизонтальна система опалення

До приладів регулювання відносять: термостатичні елементи (рис. 4.3); регулятори теплового потоку (рис. 4.4–4.6); регулятори перепаду тиску (рис. 4.7); автоматичні клапана балансування (рис. 4.8); насоси з частотним перетворювачем (рис. 4.9). До приладів обліку відносять теплові лічильники

(рис. 4.10). Принципова схема керування автоматикою теплового пункту наведена на рисунку 4.11.



Рисунок 4.3 – Клапан із термостатичною головкою [21]



Рисунок 4.4 – Контролер регулятора теплового потоку [21]



Рисунок 4.5 – Клапан двоходовий з електроприводом регулятора теплового потоку [21]



Рисунок 4.6 – Датчик температури регулятора теплового потоку [21]



Рисунок 4.7 – Регулятор перепаду тиску [21]



Рисунок 4.8 – Автоматичні клапани балансування [21]



Рисунок 4.9 – Насос із частотним перетворювачем [22]



Рисунок 4.10 – Тепловий лічильник [23]

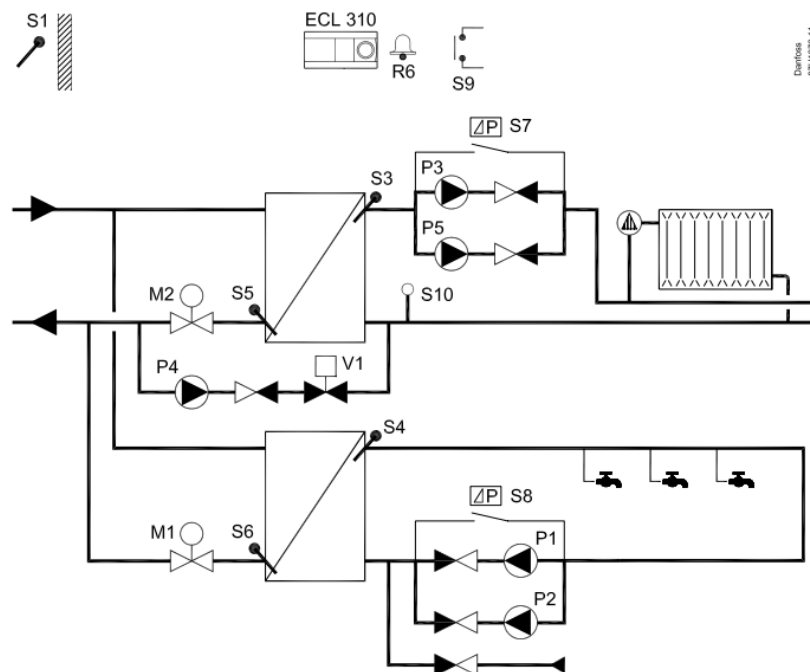


Рисунок 4.11 – Принципова схема керування автоматикою теплового пункту з контролером ECL 310 (ключ 368) [21]

Термостатичний елемент – підтримує стабільну температуру в приміщенні, змінюючи подачу теплоносія до опалювального приладу; зменшує витрати теплової енергії, запобігаючи перегріву або надмірному охолодженню; дозволяє індивідуально налаштувати температуру в кожному приміщенні; оптимізує роботу системи опалення.

Регулятор теплового потоку – змінює витрату теплоносія відповідно до температури зовнішнього повітря, забезпечуючи стабільний комфорт у приміщеннях без перевитрати енергії; запобігає перевантаженню внутрішньої системи опалення, особливо в перехідні періоди.

Регулятор перепаду тиску – підтримання стабільної різниці тиску між подавальним і зворотним трубопроводами системи теплопостачання; регулятор автоматично підтримує заданий перепад тиску, що дозволяє уникнути гідроударів, шуму та розбалансування системи.

Автоматичні клапана балансування – це пристрої, призначені для автоматичного підтримання стабільного гідравлічного режиму в системах опалення, охолодження або водопостачання. Вони забезпечують постійну витрату теплоносія незалежно від змін тиску в системі, що критично для енергоефективної та збалансованої роботи мережі; запобігають перевитраті енергії через надлишкову циркуляцію теплоносія.

Насоси з частотним перетворювачем (інверторні насоси) – це енергоефективне обладнання, яке автоматично змінює швидкість обертання електродвигуна залежно від потреб системи, забезпечуючи оптимальний тиск і витрату теплоносія або води. Насос змінює частоту обертання двигуна відповідно до поточного навантаження, що дозволяє уникати надлишкового тиску або витрати. Зменшення швидкості обертання навіть на 20–30 % може знизити споживання електроенергії до 50 % і більше. Плавний пуск і зупинка насосу знижує гідроудари, знос обладнання та навантаження на мережу. Насос дає можливість підтримання стабільного тиску, що особливо важливо в системах з перемінним гідравлічним опором (наприклад, з термостатичними клапанами). Насоси з частотним регулюванням легко підключаються до BMS (Building Management System) або SCADA.

Тепловий лічильник (комерційний, розподільний) – прилад обліку теплової енергії, який дозволяє оплачувати лише фактично використане тепло, а не усереднені нормативні показники, дає змогу аналізувати витрати тепла та оптимізувати споживання.

Диспетчеризація вузла обліку теплової енергії – це система дистанційного збору, передачі та аналізу даних з теплового лічильника, яка забезпечує оперативний контроль споживання тепла.

4.1.2 Системи вентиляції та кондиціонування

Активні системи управління енергоспоживанням у системах вентиляції та кондиціонування – це комплекс технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію витрат енергії шляхом автоматичного регулювання параметрів мікроклімату відповідно до реальних потреб приміщення. Вони базуються на принципах енергоефективності, адаптивності та інтеграції з іншими інженерними системами будівлі. Основу таких систем становлять інтелектуальні контролери, датчики температури, вологості, вуглекислого газу, присутності людей, а також програмне забезпечення, яке аналізує дані в режимі реального часу. Завдяки цьому забезпечується динамічне регулювання роботи вентиляційних установок, кондиціонерів, рекуператорів та інших елементів системи ОВК (опалення, вентиляції, кондиціонування). Наприклад, при зниженні концентрації CO₂ або відсутності людей у приміщенні система автоматично зменшує подачу свіжого повітря або вимикає охолодження, що дозволяє суттєво знизити енергоспоживання. У сучасних будівлях такі системи часто інтегруються в загальну платформу «розумного будинку» або BMS (Building Management System), що дає змогу централізовано керувати всіма інженерними мережами.

Активне управління також передбачає використання алгоритмів прогнозування – наприклад, врахування погодних умов, графіків використання приміщень, теплових надходжень від обладнання чи освітлення. Це дозволяє не лише зменшити витрати енергії, а й забезпечити комфортні умови для перебування людей. Крім того, системи можуть включати функції моніторингу споживання енергії, формування звітів, виявлення аномалій та рекомендацій щодо оптимізації. Згідно з [24], проєктування таких систем має враховувати вимоги щодо енергоефективності, санітарно-гігієнічних норм та безпеки. Впровадження активних систем управління є ключовим елементом сталого розвитку та енергозбереження в будівництві. У приватному секторі та комерційних об'єктах такі системи дозволяють скоротити витрати на електроенергію до 30–50 % порівняно з традиційними методами керування. Впровадження активних систем управління енергоспоживанням у вентиляції та кондиціонуванні є не лише технічно доцільним, а й економічно вигідним рішенням, що відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, комфорту та екологічної безпеки.

У системах вентиляції та кондиціонування використовують широкий спектр регульовальних приладів для забезпечення точного контролю мікроклімату, енергоефективності та безпеки. Ці прилади автоматизують роботу систем ОВК, адаптуючи її до змінних умов у приміщенні.

До основних регулювальних приладів належать:

Контролери (ПЛК, DDC) – програмовані логічні контролери, які керують усією системою вентиляції та кондиціонування, обробляючи сигнали від датчиків і формуючи команди на виконавчі механізми (рис. 4.12).

Датчики температури, вологості, CO₂, тиску, присутності – забезпечують зворотний зв'язок для адаптивного регулювання. Наприклад, при підвищенні рівня CO₂ система збільшує подачу свіжого повітря (4.13–4.14).

Регулювальні клапани (з електроприводом) – керують витратою теплоносія або холодоагенту в теплообмінниках, фанкойлах, чілерах (рис. 4.5).

Повітряні заслінки з сервоприводами – регулюють об'єм подачі повітря, забезпечують балансування повітряних потоків, а також виконують функції протипожежного захисту (рис. 4.15).

Частотні перетворювачі (інвертори) – змінюють швидкість обертання вентиляторів або компресорів, що дозволяє точно регулювати продуктивність і зменшувати енергоспоживання (рис. 4.16).

Термостати та гігростати – підтримують задану температуру та вологість у приміщеннях (рис. 4.17).

Програмовані таймери та реле часу – дозволяють задавати режими роботи системи за графіком (рис. 4.18).

Модулі зв'язку (BACnet, Modbus, KNX, LON) – забезпечують інтеграцію з системами диспетчеризації (BMS) і «розумного будинку».

Схема диспетчеризації наведена на рисунку 4.19.



Рисунок 4.12 – Контролер [25]



Рисунок 4.13 – Датчик вентиляційного каналу для температури та вологи [25]



Рисунок 4.14 – Датчик вентиляційного каналу для якості повітря, ЛОР [25]



Рисунок 4.15 – Повітряна заслінка з сервоприводом [26]



Рисунок 4.16 – Частотний перетворювач для вентилятора [25]



Рисунок 4.17 – Термостат для регулювання температури повітря [25]



Рисунок 4.18 – Багатофункційний таймер часу [27]

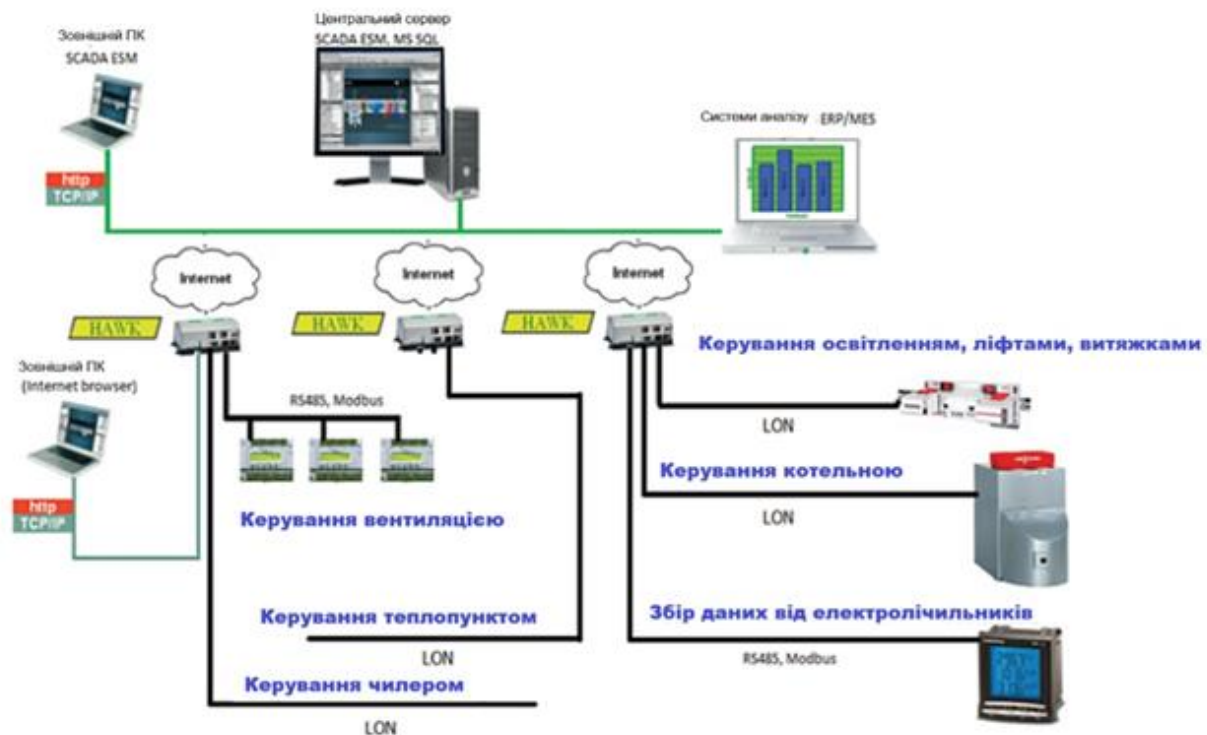


Рисунок 4.19 – Схема диспетчеризації

4.2 Інтелектуальні лічильники та моніторинг споживання. Контроль витоків. Розумні системи водо- та електроспоживання

4.2.1 Інтелектуальні лічильники

Інтелектуальні лічильники – це сучасні електронні пристрої, призначені для точного вимірювання та автоматизованого обліку споживання енергоресурсів (електроенергії, води, газу, тепла) з можливістю дистанційного моніторингу, аналізу та керування. Вони є ключовим елементом концепції Smart Grid і цифрової трансформації енергетики. На відміну від традиційних механічних приладів обліку, інтелектуальні лічильники не лише фіксують обсяг спожитого ресурсу, а й передають ці дані в реальному часі до центрів обробки інформації через бездротові або дротові канали зв'язку (наприклад, GSM, Wi-Fi, NB-IoT, LoRaWAN). Це дозволяє як споживачам, так і постачальникам оперативно відстежувати споживання, виявляти аномалії, прогнозувати навантаження та оптимізувати енергоспоживання. Завдяки інтеграції з хмарними платформами та мобільними застосунками користувачі отримують доступ до детальної аналітики, графіків, звітів, а також можуть дистанційно керувати навантаженням, наприклад, вимикати окремі прилади або змінювати режими роботи систем.

Інтелектуальні лічильники підтримують багатотарифний облік, що дозволяє зменшити витрати шляхом перенесення споживання на періоди з

нижчими тарифами. У промисловості та комерційних об'єктах такі системи забезпечують глибоку деталізацію енергоспоживання по зонах, обладнанню або процесах, що є основою для енергоаудиту та впровадження систем енергоменеджменту відповідно до [28]. Моніторинг споживання на базі інтелектуальних лічильників також сприяє виявленню втрат, витоків, несанкціонованого підключення, а також дозволяє автоматизувати виставлення рахунків і зменшити витрати на обслуговування. У контексті державної політики енергоефективності, впровадження таких систем відповідає вимогам Закону України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання», а також сприяє досягненню цілей сталого розвитку та інтеграції до європейської енергетичної спільноти. Сучасні інтелектуальні лічильники здатні вимірювати не лише обсяг споживання, а й параметри якості електроенергії, температури, вологості, тиску, рівня CO₂, що робить їх універсальним інструментом для моніторингу ресурсів у житлових, комерційних та промислових об'єктах. Таким чином, інтелектуальні лічильники та системи моніторингу споживання є основою цифрової енергетики, що забезпечує прозорість, ефективність і контроль у сфері використання ресурсів.

4.2.2 Контроль витоків

Протікання води – це не лише марнотратство цінного ресурсу, але й потенційна загроза пошкодження майна. Сучасні системи виявлення протікань допомагають швидко виявити та усунути проблему, запобігаючи серйозним наслідкам.

Типи датчиків протікання:

- контактні датчики: Розміщуються на підлозі в місцях потенційного протікання. При контакті з водою вони подають сигнал тривоги;
- безконтактні датчики: Використовують ультразвукові або інфрачервоні технології для виявлення води без прямого контакту;
- датчики тиску: Встановлюються на трубах і виявляють різкі зміни тиску, що можуть свідчити про протікання;
- акустичні датчики: Виявляють звуки, характерні для протікання води в трубах.

Системи виявлення протікань можуть бути інтегровані в загальну систему розумного дому, що надає додаткові переваги:

- автоматичне перекриття води при виявленні протікання;
- сповіщення на смартфон власника;
- активація сигналізації;
- координація з іншими системами (наприклад, відключення електрики в зоні протікання).

Впровадження систем виявлення протікань має значні переваги:

- економія води. Швидке виявлення та усунення протікань запобігає марнотратству води;
- захист майна. Своєчасне виявлення протікання запобігає пошкодженню меблів, електроніки та структури будівлі;
- зниження страхових витрат. Багато страхових компаній пропонують знижки для домогосподарств з встановленими системами виявлення протікань;
- спокій. Власники можуть бути впевнені, що їхнє майно захищене, навіть коли вони відсутні.

4.2.3 Розумні системи водоспоживання

Розумні крани та змішувачі.

Розумні крани та змішувачі – це інноваційні пристрої, які допомагають значно скоротити споживання води у ванній кімнаті та на кухні. Вони поєднують в собі сучасні технології та зручність використання, забезпечуючи оптимальне використання води.

Технології економії води в кранах:

- інфрачервоні сенсори. Активують подачу води, коли виявляють рух рук, і автоматично вимикають її, коли руки прибирають;
- аератори. Змішують воду з повітрям, створюючи ефект більшого потоку при меншій витраті води;
- таймери. Автоматично вимикають воду після заданого періоду часу;
- регулятори потоку. Обмежують максимальну витрату води без зниження комфорту користування;
- термостатичні змішувачі. Підтримують постійну температуру води, зменшуючи час на її налаштування.

Огляд функцій розумних змішувачів:

- голосове керування. Сумісність з голосовими асистентами для керування подачею води та налаштування температури;
- пресети. Можливість зберігати улюблені налаштування температури та потоку води;
- моніторинг споживання. Відстеження кількості використаної води та надання статистики через мобільний додаток;
- інтеграція з розумним домом. Можливість керування та моніторингу через загальну систему розумного дому;
- захист від протікання. Автоматичне перекриття води при виявленні нетипової активності.

Розумні душові системи.

Душ є одним з найбільших споживачів води в домогосподарстві. Розумні

душові системи пропонують інноваційні рішення для зменшення витрат води без втрати комфорту.

Технології економії води в душі:

- обмежувачі потоку. Зменшують витрату води без помітного зниження тиску;
- аерація. Змішування води з повітрям для створення більш повного потоку при меншій витраті води;
- аульсація. Чергування сильного та слабого потоку води для економії при збереженні відчуття повноцінного душу;
- рециркуляція. Очищення та повторне використання води в процесі прийняття душу.

Огляд функцій розумних душових панелей:

- термостатичне регулювання. Підтримка постійної температури води;
- цифрове керування. Точне налаштування температури та потоку води;
- Пресети. Збереження улюблених налаштувань для різних користувачів;
- Таймери. Обмеження тривалості прийняття душу;
- bluetooth-колонки. Інтегровані водостійкі динаміки для прослуховування музики;
- LED-підсвічування. Зміна кольору залежно від температури води або для створення атмосфери;
- моніторинг споживання. Відстеження кількості використаної води та енергії.

Розумні пральні та посудомийні машини.

Пральні та посудомийні машини є значними споживачами води в домогосподарстві. Сучасні розумні моделі пропонують інноваційні рішення для оптимізації використання води та енергії.

Технології оптимізації використання води:

- сенсори забрудненості. Визначають рівень забруднення та автоматично налаштовують кількість води та час прання / миття;
- система дозування. Точно розраховує необхідну кількість миючого засобу, що зменшує кількість води для полоскання;
- повторне використання води. Деякі моделі зберігають воду від останнього полоскання для використання в наступному циклі прання;
- парові технології. Використання пари для очищення та дезінфекції з мінімальним використанням води;
- програми економії. Спеціальні режими, оптимізовані для мінімального споживання води.

Системи збору та повторного використання води.

Збір та використання дощової води – це ефективний спосіб зменшити

споживання водопровідної води та знизити навантаження на централізовані системи водопостачання. Сучасні системи збору дощової води можуть забезпечити значну частину потреб домогосподарства у воді для непитних цілей.

Принципи роботи систем:

- збір. Дощова вода збирається з дахів та інших поверхонь;
- фільтрація. Вода проходить через фільтри для видалення сміття та забруднень;
- зберігання. Очищена вода зберігається в резервуарах;
- розподіл. Вода подається для використання за допомогою насосів.

Компоненти систем збору дощової води:

- водозбірна поверхня. Зазвичай це дах будинку;
- жолоби та водостоки. Для направлення води в систему;
- фільтри. Для очищення води від листя, гілок та інших забруднень;
- резервуар. Для зберігання зібраної води;
- насос. Для подачі води в систему розподілу;
- система керування. Для моніторингу рівня води та керування насосом;
- система очищення. Додаткові фільтри та УФ-стерилізатори для підвищення якості води.

Системи повторного використання сірої води.

Сіра вода – це вода, яка була використана в домашньому господарстві для миття посуду, прання або прийняття душу.

Хоча вона не придатна для пиття, її можна очистити та повторно використати для інших цілей, таких як полив саду або змивання в туалеті.

Принципи роботи систем:

- збір. Сіра вода збирається з раковин, душових кабін та пральних машин;
- фільтрація. Вода проходить через механічні та біологічні фільтри;
- дезінфекція. Застосовуються методи УФ-стерилізації або хлорування;
- зберігання. Очищена вода зберігається в резервуарі;
- розподіл. Вода подається для повторного використання.

Сфери застосування очищеної сірої води:

- змивання в туалетах;
- полив саду та газонів;
- миття автомобілів;
- прибирання прибудинкової території;
- технічні потреби (наприклад, охолодження промислового обладнання).

Розумні системи поливу.

Розумні системи поливу – це інноваційне рішення для ефективного управління водними ресурсами в садівництві та ландшафтному дизайні. Вони

дозволяють оптимізувати використання води, забезпечуючи при цьому здоровий ріст рослин.

Датчики вологості ґрунту є ключовим компонентом розумних систем поливу. Вони вимірюють рівень вологи в ґрунті та передають ці дані в систему керування

Типи датчиків:

- тензіометричні. Вимірюють силу, з якою вода утримується в ґрунті;
- резистивні. Вимірюють електричний опір ґрунту, який змінюється залежно від вологості;
- ємнісні. Вимірюють діелектричну проникність ґрунту, яка залежить від вмісту води.

Переваги використання:

- запобігання надмірному поливу;
- підтримка оптимального рівня вологості для різних видів рослин;
- економія води та зниження витрат на полив.

Автоматизовані системи поливу використовують дані з датчиків вологості та інші параметри для оптимізації графіка та інтенсивності поливу.

Компоненти системи:

- контролер. Центральний пристрій керування;
- клапани. Для контролю подачі води в різні зони;
- датчики вологості ґрунту, температури, опадів;
- спринклери або крапельні системи. Для розподілу води.

Функції автоматизації:

- налаштування графіка поливу за зонами;
- автоматичне коригування тривалості поливу залежно від погодних умов;
- віддалене керування через смартфон;
- сповіщення про несправності або аномалії.

Сучасні розумні системи поливу можуть інтегруватися з онлайн-сервісами прогнозу погоди для ще більшої оптимізації використання води.

Переваги інтеграції:

- автоматичне відкладання поливу при прогнозі дощу;
- збільшення тривалості поливу перед очікуваною спекою;
- коригування графіка поливу залежно від сезонних змін.

Приклади систем з інтеграцією прогнозу погоди:

1. Rachio 3: використовує локальні метеодані для точного налаштування поливу.
2. Hunter Hydrowise: враховує історичні та прогнозовані погодні умови.

3. Netro Sprite: аналізує погодні дані та типи рослин для оптимізації поливу.

Ефективне використання розумних водних технологій вимагає їх інтеграції в єдину систему та централізованого керування. Це дозволяє максимізувати економію води та підвищити зручність користування.

Централізоване керування водопостачанням.

Централізована система керування водопостачанням об'єднує всі розумні водні пристрої в домі в єдину мережу. Це може включати:

- розумні лічильники води;
- системи виявлення протікань;
- розумні крани та змішувачі;
- системи збору дощової води;
- системи повторного використання сірої води;
- розумні системи поливу.

Основні переваги централізованого керування:

- єдиний інтерфейс. Усі пристрої контролюються через один додаток або панель керування;
- оптимізація використання. Система може автоматично перерозподіляти воду між різними споживачами для максимальної ефективності;
- швидке реагування на проблеми. Централізована система може миттєво виявляти та реагувати на протікання або інші аномалії;
- інтеграція з іншими системами розумного дому. Наприклад, автоматичне вимкнення поливу, коли активується система безпеки в режимі «Нікого немає вдома».

Аналітика та оптимізація споживання води.

Розумні системи збирають великий обсяг даних про використання води, які можна аналізувати для подальшої оптимізації.

1. Детальна статистика. Розбивка споживання води за приладами, часом доби, днями тижня.

2. Виявлення патернів. Система може виявляти неефективні звички використання води.

3. Прогнозування. На основі історичних даних система може прогнозувати майбутнє споживання та пропонувати шляхи економії.

4. Порівняльний аналіз. Можливість порівняти своє споживання з середніми показниками в регіоні.

5. Рекомендації з оптимізації. Система може пропонувати конкретні дії для зменшення споживання води.

Приклади комплексних рішень.

1. Moen Smart Water Network:

– інтегрує розумний водонагрівач, систему виявлення протікань та розумні крани;

– керування через мобільний додаток або голосові команди;

– надає детальну аналітику споживання води.

2. Phyn Plus Smart Water Assistant:

– система виявлення протікань з автоматичним перекриттям води;

– аналіз споживання води кожним приладом Інтеграція з популярними системами розумного дому.

3. Grohe Sense Guard:

– моніторинг тиску, температури та потоку води;

– автоматичне перекриття води при виявленні аномалій;

– інтеграція з розумними кранами та душовими системами Grohe.

4.2.4 Розумні системи електроспоживання

Технології енергозбереження, що впроваджуються сьогодні, охоплюють широкий спектр рішень. Від інтелектуальних термостатів до систем управління освітленням, ці інновації дозволяють не лише знизити енергоспоживання, але й забезпечують комфорт і безпеку. Розглянемо кілька прикладів таких технологій.

Системи керування освітленням. Це рішення передбачає використання спеціальних ламп та датчиків, які можуть автоматично змінювати яскравість та колір освітлення залежно від часу доби чи вашої присутності у приміщенні. Це не лише економія електроенергії, а й створення комфортної атмосфери у будинку.

Системи керування електроприладами. Ці рішення дозволяють контролювати роботу електроприладів, забезпечуючи їх автоматичне вимкнення у разі відсутності потреби. Це не лише знижує витрати на електроенергію, а й підвищує безпеку будинку. Такі системи можуть бути інтегровані з іншими пристроями для створення єдиного екосистемного середовища.

Якість електроенергії, крім сили споживаної струму і підведеної напруги, характеризується ще двома важливими параметрами: частота (повинна бути 50 герц, відхилення навіть на 0.1 Гц погіршує роботу багатьох приладів та апаратів) і $\cos \varphi$ – косинус кута між векторами напруги і сили струму: цей параметр називається ще коефіцієнтом потужності, т. к. він дорівнює відношенню активної потужності до повної. Таким чином, для контролю електроенергії, що відпускається споживачу, необхідно мати наступні прилади:

амперметр, вольтметр, частотомір, вимірювач $\cos \varphi$, електролічильник. Особливість електроенергії як товару – безпосереднє споживання виробленого тому що в електропостачанні поки немає акумуляторів відповідної потужності.

Тому необхідно погоджувати вихід енергії у виробника, витрата у споживача, втрати при транспортуванні. Електрична енергія розподіляється по лініях електропередач ЛЕП. Електроенергія – чистий і дорогий продукт, втрати електроенергії на ЛЕП співставленні з витратами, що зменшують їх. Втрати активної і реактивної енергії на ЛЕП змінного струму становлять близько 10 %, постійного струму – трохи менше, і зменшення втрат пов'язано з перевитратою дорогих матеріалів і установкою складного обладнання.

Питання для самоконтролю

1. Що таке HVAC-системи?
2. Які види регулювання систем теплопостачання бувають?
3. У чому різниця між насосами або вентиляторами з частотними перетворювачами та без них?
4. В чому різниця між інтелектуальними лічильниками та звичайними механічними лічильниками?
5. Які види датчиків протікання ви знаєте?
6. Надайте перелік технологій економії води в розумних кранах та змішувачах системи водопостачання.
7. Надайте перелік компонентів системи автоматизованого поливу.
8. Що містить централізоване керування водопостачанням?
9. Надайте приклади комплексних рішень розумних систем водопостачання.
10. Надайте перелік розумних систем електроспоживання.

5 ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

5.1 Сонячна енергетика теплопостачання

У сучасному світі сонячна енергія широко використовується для теплопостачання, включаючи гаряче водопостачання і опалення, а також для холодопостачання, кондиціювання повітря, висушування та в інших технологічних процесах.

Системи сонячного теплопостачання класифікуються таким чином:

1) системи «активного» сонячного теплопостачання, що використовують «активні» установки на основі сонячних колекторів з циркуляцією теплоносія, в якості якого можуть застосовуватися рідина (вода, розчини солей) і газ (повітря);

2) системи «пасивного» сонячного опалення, в яких різні конструкційні елементи споруд використовуються в ролі теплоприймачів сонячної енергії;

3) комбіновані системи сонячного теплопостачання, в яких використані елементи «пасивного» і «активного» сонячного теплопостачання.

У сучасних низько- та середньотемпературних системах теплопостачання (до 100 °С), що використовуються для перетворення сонячної енергії в низькопотенційне тепло для гарячого водопостачання, опалення та інших теплових процесів, основним елементом є плоский колектор, який являє собою геліоприймальний абсорбер з циркулюючим теплоносієм, конструкція плоского сонячного колектора теплоізована з тильної сторони і зашлена з лицьової сторони. Принципова схема плоского колектора наведена на рисунку 5.1.

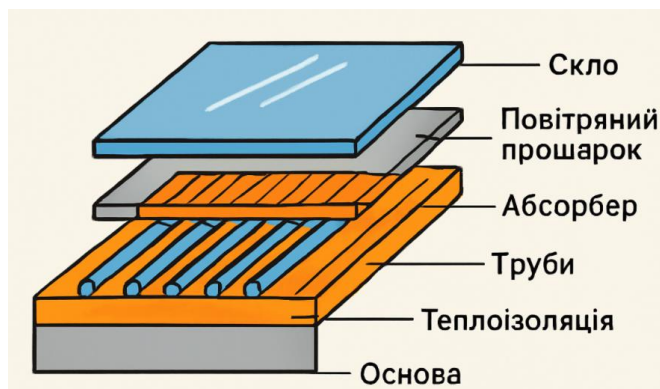


Рисунок 5.1 – Конструкція плоского колектора сонячної енергії

Особливістю плоского колектора є те, що він вловлює як пряму, так і розсіяну сонячну радіацію. Об'єми таких систем розраховуються в квадратних метрах сонячних колекторів.

У системах високотемпературного теплопостачання (вище 100 °С) використовують високотемпературні сонячні колектори. На сьогодні найкращим з них вважається концентрувальний сонячний колектор, що являє собою параболічний жолоб з чорною трубкою в центрі, на яку фокусується сонячне випромінювання. Такі колектори дуже ефективні у промисловості та для виробництва пару в електроенергетиці. Їх недоліком є неможливість використання розсіяної сонячної радіації.

У звичайних плоских колекторах практично неможливо отримати температуру теплоносія вище 100 °С. Збільшення робочої температури теплоносія до 250–300 °С можливо досягнути за допомогою вакуумних скляних сонячних колекторів. Як теплоносій в колекторах може використовуватися вода, розчин етиленгліколя і пропіленгліколя, силіконове масло, а також повітря.

Принципові схеми водяного і повітряного опалення приміщень колекторами наведено відповідно на рисунку 5.2 і рисунку 5.3.

Пасивні сонячні системи є більш простими і дешевими порівняно з активними, бо не потребують додаткових пристроїв поглинання, перетворення і розподілення сонячної енергії. Пасивне використання енергії Сонця для опалення будівель відбувається завдяки планувальним, архітектурно-конструктивним рішенням, коли вся будівля може розглядатися як колектор сонячної теплоти.



Рисунок 5.2 – Принципова схема комбінованої водяної системи сонячного теплопостачання

У пасивній системі повинна бути оптимальна орієнтація будівлі приблизно вздовж осі схід-захід, на південній стороні має бути не менше 50–70 % всіх вікон, на північній – не більше 10 %, житлові кімнати повинні розташовуватися з південної сторони і т. д. Крім того, передбачаються спеціальні пристрої – дахи-теплонакопичувачі, конвекційні системи тощо.



Рисунок 5.3 – Принципова схема активної повітряної системи сонячного опалення

Активне використання сонячної енергії може бути здійснене за допомогою сонячного ставка. Такі ставки є добрими акумуляторами сонячної енергії. Завдяки тому, що густина соляового розчину в нижніх шарах порівняно з верхніми значно вища, у таких ставках практично відсутній конвекційний тепломасообмін, в результаті чого у придонній зоні ставка створюється шар води з високою температурою. Така властивість соляних ставків може бути використаною для отримання електричної енергії, як це показано на рисунку 5.4.

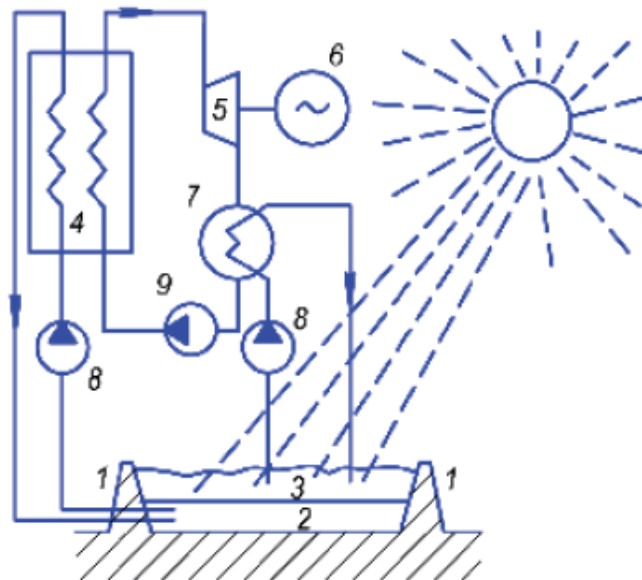


Рисунок 5.4 – Схема використання сонячного соляного ставка для отримання електричної енергії:

- 1 – дамби; 2 – гаряча вода з високою концентрацією солі; 3 – охолоджуюча вода з низькою концентрацією солі; 4 – теплообмінний апарат; 5 – турбіна; 6 – генератор; 7 – конденсатор; 8 – циркуляційні насоси; 9 – живильний насос

На активному використанні теплової дії сонячних променів базуються сонячні енергетичні печі, обігрівання басейнів, опріснення морської і засоленої води, отримання дистильованої води, сонячні побутові печі, висушування сільськогосподарських продуктів тощо.

5.2 Сонячна фотоенергетика

Перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію здійснюється за допомогою фотоелектричних елементів, які виготовляються з напівпровідникових матеріалів – найчастіше кремнію, що має здатність генерувати електричний струм під дією світла. Цей процес базується на фотоелектричному ефекті, при якому фотони, потрапляючи на поверхню напівпровідника, збуджують електрони, змушуючи їх рухатися і створювати електричний струм. Такі пристрої, які забезпечують пряме перетворення сонячної енергії на електричну, називають фотоелементами або сонячними батареями. Англійське слово «photovoltaics» походить від грецького «photos», що означає світло, і латинського «volt», що означає електрична напруга.

Ефективність роботи фотоелемента залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, яка змінюється залежно від погодних умов, часу доби, географічного розташування та кута падіння сонячних променів. Потужність сонячного потоку зазвичай вимірюється у ватах на квадратний метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$), і чим вона вища – тим більше електроенергії виробляє фотоелемент. Наприклад, у ясний день інтенсивність може перевищувати $1\,000\text{ Вт}/\text{м}^2$, тоді як у хмарну погоду вона знижується в кілька разів.

Конструкція фотоелемента є досить простою (рис. 5.5). Він складається з активного шару напівпровідника, прозорого захисного покриття, електродів для збору струму та, за потреби, додаткових шарів для підвищення ефективності – таких як антирефлексне покриття або пасивуючі шари. Завдяки відсутності рухомих частин, фотоелементи мають тривалий термін експлуатації, низькі експлуатаційні витрати та можуть бути інтегровані в різні архітектурні рішення – від дахів будівель до фасадів і мобільних систем. Вони є ключовим елементом сучасної відновлюваної енергетики, що дозволяє зменшити залежність від викопного палива та скоротити викиди парникових газів.

Фотоелектричні елементи (ФЕ) створюють на основі напівпровідникових матеріалів, які мають здатність змінювати електричну провідність залежно від типу домішок або хімічного складу. Найпоширенішим матеріалом для виготовлення ФЕ є кремній – завдяки його доступності, стабільності та високій ефективності перетворення сонячної енергії. У типовому кремнієвому фотоелементі використовують структуру з двох зон: верхня, освітлена частина

має провідність n-типу (з надлишком електронів), а нижня, темнова – р-типу (з надлишком дірок). На межі цих шарів утворюється р-n-перехід, який є ключовим для генерації електричного струму.

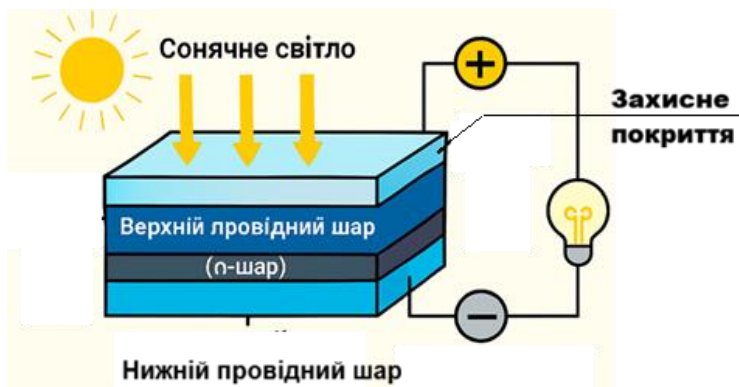


Рисунок 5.5 – Схема конструкції фотоелемента

До поверхні n-шару приєднується сітчастий або смужковий електрод, що має мінімальну площу, аби не затінювати активну зону, але водночас забезпечувати ефективне збирання електронів. На зворотному боці р-шару розташовується суцільний металевий електрод, який слугує другим контактом у зовнішньому електричному колі. Коли фотони сонячного світла потрапляють на поверхню фотоелемента, вони передають свою енергію електронам у напівпровіднику, збуджуючи їх до переходу з валентної зони у зону провідності. У результаті цього процесу виникають два типи носіїв заряду – вільні електрони та дірки, які під дією внутрішнього електричного поля рухаються до відповідних електродів, створюючи електричний струм.

Фотоелектричні елементи класифікуються за типом використовуваного кремнію, і на сьогодні виділяють три основні різновиди:

Монокристалічні фотоелементи виготовляються з одного цілісного кристалу кремнію, що забезпечує високу структурну однорідність. Завдяки цьому вони мають:

- високий коефіцієнт корисної дії (ККД) – 16–17 % у промислових умовах;
- стабільну роботу при інтенсивному сонячному освітленні;
- високі температурні характеристики (менше втрат при нагріванні);
- компактні розміри при високій продуктивності.

Недоліком є висока вартість, оскільки виробництво потребує високочистого кремнію та енергоємної технології вирощування кристалів методом Чохральського.

Полікристалічні фотоелементи виготовляються з кремнієвих пластин, отриманих методом спрямованої кристалізації, що утворює структуру з

багатьох дрібних кристалів різної орієнтації. Вони характеризуються:

- ККД на рівні 14–15 %;
- нижчою вартістю шляхом використання менш дорогого кремнію;
- достатньою ефективністю для більшості побутових і промислових застосувань;
- широким поширенням на ринку завдяки оптимальному співвідношенню ціна/якість.

Останні технологічні вдосконалення дозволили провідним виробникам досягти параметрів, близьких до монокристалічних модулів.

Тонкоплівкові фотоелементи базуються на використанні мінімальної кількості кремнію або альтернативних матеріалів, які наносяться тонким шаром на скло, метал або полімерну основу. Вони мають:

- ККД у межах 8–9 %;
- найнижчу собівартість серед усіх типів;
- гнучкість конструкції – можливість виготовлення на гнучких поверхнях;
- краще функціонування при розсіяному світлі (наприклад, у похмуру погоду).

Недоліком є менша ефективність і швидше старіння порівняно з кристалічними аналогами.

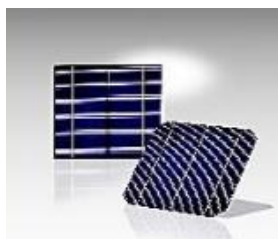
Порівняння зведені у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняльна таблиця різновидів ФЕ

Тип ФЕ	ККД (%)	Вартість	Стійкість до температур	Переваги
Монокристалічні	16–17	Висока	Висока	Максимальна ефективність
Полікристалічні	14–15	Середня	Середня	Доступність, оптимальна ціна
Тонкоплівкові	8–9	Низька	Низька	Гнучкість, дешевизна, легкість

З ФЕ збирають фотоелектричні (сонячні) модулі або панелі, а модулі збирають в фотоелектричну батарею (сонячну батарею) (рис. 5.6).

Сонячні модулі формуються шляхом об'єднання кількох послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів одного типу, які розміщуються в герметичному корпусі для захисту від зовнішніх впливів. У промисловому виробництві виготовляють модулі з номінальною потужністю в діапазоні від 50 Вт до 350 Вт, залежно від типу комірок, площі та призначення.



а



б



в

Рисунок 5.6 – Фотоелектричні елемент (а), модуль (б), батарея (в)

Коли кілька таких модулів працюють спільно на одне навантаження, вони утворюють фотоелектричну батарею, яка може слугувати джерелом живлення для автономних або мережевих сонячних електростанцій. Завдяки модульному принципу побудови, системи на основі ФЕ легко масштабуються, адаптуються до різних умов і можуть застосовуватись як у приватному секторі, так і в комерційних або промислових об'єктах. Така конструкція спрощує монтаж, обслуговування та модернізацію сонячних енергетичних систем.

Для отримання 1 кВт електричної потужності від сонячної енергії необхідна різна площа фотоелектричних батарей залежно від їхнього типу, що пов'язано з коефіцієнтом корисної дії (ККД) конкретної технології:

- монокристалічні модулі – завдяки високому ККД (16–20 %) потребують найменшої площі: приблизно 6–9 м²;
- полікристалічні модулі – мають дещо нижчу ефективність (14–17 %), тому для тієї ж потужності потрібно 7,5–10 м²;
- тонкоплівкові модулі – характеризуються найнижчим ККД (8–12 %), що обумовлює потребу у значно більшій площі: 14–20 м².

Порівняння типів наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняння типів фотобатарей для отримання 1 кВт електроенергії

Тип фотобатарей	ККД (%)	Площа, м ²	Вартість	Стійкість до температур	Переваги
Монокристалічні	16–17	6–9	Висока	Висока	Максимальна ефективність
Полікристалічні	14–15	7,5–10	Середня	Середня	Доступність, оптимальна ціна
Тонкоплівкові	8–9	14–20	Низька	Низька	Гнучкість, дешевизна, легкість

Ці показники є орієнтовними і можуть змінюватися залежно від виробника, технології, умов освітлення, кута нахилу та температури навколишнього середовища. Вони важливі для проєктування сонячних електростанцій, особливо в умовах обмеженого простору.

5.3 Вітрова та геотермальна енергія для будівель

5.3.1 Вітрова енергія

Вітер утворюється в результаті нерівномірного нагрівання поверхні Землі Сонцем. Потужність вітрового потоку пропорційна площі, яку пересікає вітровий потік, і швидкості вітру в кубі. Вітроенергетичні ресурси у США і країнах Європи класифікують в залежності від середньорічної швидкості або середньорічної питомої потужності вітру на висотах 10 і 50 м від поверхні землі (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Класифікація вітроенергетичних ресурсів на висотах 10 і 50 м від поверхні землі

Клас	Висота 10 м		Висота 50 м	
	Швидкість вітру, м/с	Питома потужність, Вт/м ²	Швидкість вітру, м/с	Питома потужність, Вт/м ²
1	0–4,4	0–100	0–5,6	0–200
2	4,4–5,1	100–150	5,6–6,4	200–300
3	5,1–5,6	150–200	6,4–7,0	300–400
4	5,6–6,0	200–250	7,0–7,5	400–500
5	6,0–6,4	250–300	7,5–8,0	500–600
6	6,4–7,0	300–400	8,0–8,8	600–800
7	7,0–9,0	400–1 000	8,8–11,9	800–1 200

Принцип дії всіх вітроустановок один: під напором вітру обертається вітроколесо з лопатями, яке передає крутільний момент через систему передач валу генератора, що виробляє електроенергію. Реальний ККД кращих вітрових коліс досягає 45 % у разі стійкої роботи при оптимальній швидкості вітру.

Існують дві принципово різні конструкції вітроенергетичних установок (ВЕУ): з горизонтальною і вертикальною віссю обертання.

Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю наведена на рисунку 5.7. Основними елементами установки є вітроприймальний пристрій (лопаті), редуктор передачі крутільного моменту до електрогенератора, електрогенератор і башта.

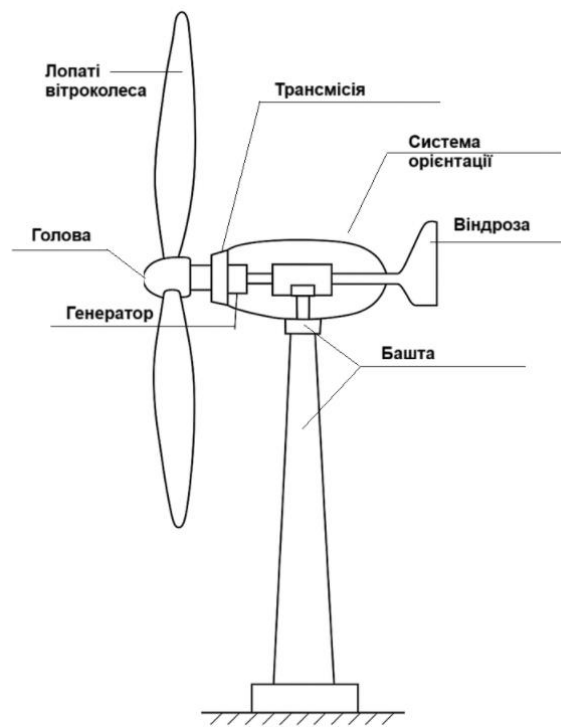


Рисунок 5.7 – Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

Вітроприймальний пристрій разом з редуктором утворюють вітродвигун. Завдяки спеціальній конструкції лопатей в повітряному потоці виникають несиметричні сили, які створюють крутільний момент.

Оскільки вітер може змінювати свою силу і напрям, вітрові установки обладнуються спеціальними пристроями контролю і безпеки. Ці пристрої складаються з механізмів розвороту осі обертання за вітром (віндроза), нахилу лопатей відносно землі при критичній швидкості вітру, системи автоматичного контролю потужності та аварійного відключення для установок великої потужності.

Найчастіше на ВЕС використовується трилопатеве вітроколесо з горизонтальним розташуванням осі ротора. Удосконалення відбуваються шляхом збільшення розмірів лопатей, покращення техніко-економічних показників енергетичного обладнання і електронного управління, використання композитних матеріалів і застосування більш високих башт. Деякі ВЕУ функціонують зі змінною швидкістю або взагалі не використовують редуктор і працюють за методом прямого приводу. Отже, при потужності ВЕУ 2,5 МВт діаметр лопатей вітроколеса досягає 80 м, а висота башти більше 80 м.

Конструктивна схема ВЕУ з вертикальною віссю обертання наведена на рисунку 5.8.

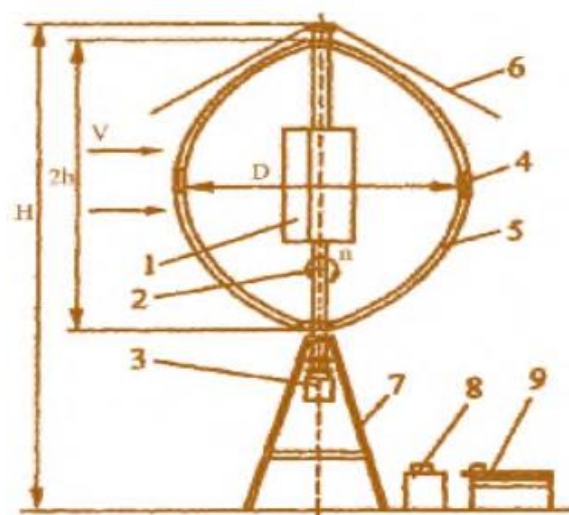


Рисунок 5.8 – Конструктивна схема ВЕУ з вертикальною віссю обертання:

1 – стартер (ротор Савоніуса); 2 – вісь; 3 – електрогенератор;
 4 – гальмівний пристрій; 5 – робоча лопать; 6 – розтяжка; 7 – рама;
 8 – перетворювач напруги; 9 – акумулятор; V – швидкість вітру; H – висота вітроустановки; h – половина висоти робочої лопаті; n – швидкість обертання робочої лопаті; D – діаметр розгортки лопатей

ВЕУ з вертикальною віссю обертання мають переваги перед установками з горизонтальною віссю, які полягають у тому, що зникає необхідність у пристроях орієнтації на вітер, спрощується конструкція і знижуються гіроскопічні навантаження, обумовлені додатковим напруженням в лопатях, системі передачі та інших елементах установки, з'являється можливість встановлення редуктора з генератором в основі башти.

У залежності від потужності генератора вітроустановки підрозділяються на класи, їх параметри і призначення наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Класифікація вітроустановок

Клас установки	Потужність, МВт	Діаметр колеса, м	Кількість лопатей	Призначення
Малої потужності	До 0,1	3–10	3–2	Зарядка акумуляторів, насоси, побутові потреби
Середньої потужності	Від 0,1 до 1,0	25–44	3–2	Енергетика
Великої потужності	Більше 1	> 45	3–2	Енергетика

На сьогодні розроблена і використовується значна кількість схем перетворення енергії вітру в електричну енергію постійного чи змінного струму або для виконання механічної роботи.

Середньорічне вироблення електроенергії з 1 км² площі ВЕС при різних швидкостях вітру наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Річне вироблення електроенергії з 1 км² площі ВЕС

Середньорічна швидкість вітру, м/с	5	6	7	8	9
Виробництво електроенергії, млн кВт · год/км ²	12	20	26	34	39

Основними недоліками ВЕС є:

1. Непостійне і нерівномірне вироблення електроенергії як протягом доби, так і за сезонами року, що пов'язано з наявністю вітру і його швидкістю.

2. Використання значних площ земельних ресурсів. Отже, для ВЕС потужністю 1 000 МВт потрібна загальна площа 70–200 км², хоча більша частина цих земель може бути використаною в сільському господарстві та ін. (сама ВЕС займає 1 % загальної площі). При використанні ВЕС морського базування цей недолік зникає.

Обмеження шумового впливу ВЕС досягається їх віддаленістю від населених пунктів (для ВЕС до 300 м).

5.3.2 Теплові насоси

Джерелом теплопостачання можуть служити теплові насоси, які перетворюють низькопотенційну теплову енергію довкілля (води, ґрунту, повітря), а також теплові відходи промислових підприємств і комунальних служб в теплову енергію потрібного потенціалу. Перенесення теплоти від джерела низького потенціалу на більш високий температурний рівень відбувається підведенням механічної енергії або додатковим підведенням теплоти.

Найбільш простою конструкцією є тепловий насос парокомпресійного типу, схема якого наведена на рисунку 5.9.

Конструкція парокомпресійного теплового насоса включає два теплообмінних апарата – випарювач, в якому відбувається випарювання рідинного холодильного агенту шляхом підведення теплоти при невеликому тиску від середовища з низьким потенціалом, і конденсатор, в якому відбувається конденсація пароподібного холодильного агенту при підвищеному тиску віддачею теплоти теплоприймачу. У схемі передбачений компресор для відсмоктування з випарювача і стискання парів холодильного агенту до тиску конденсації.

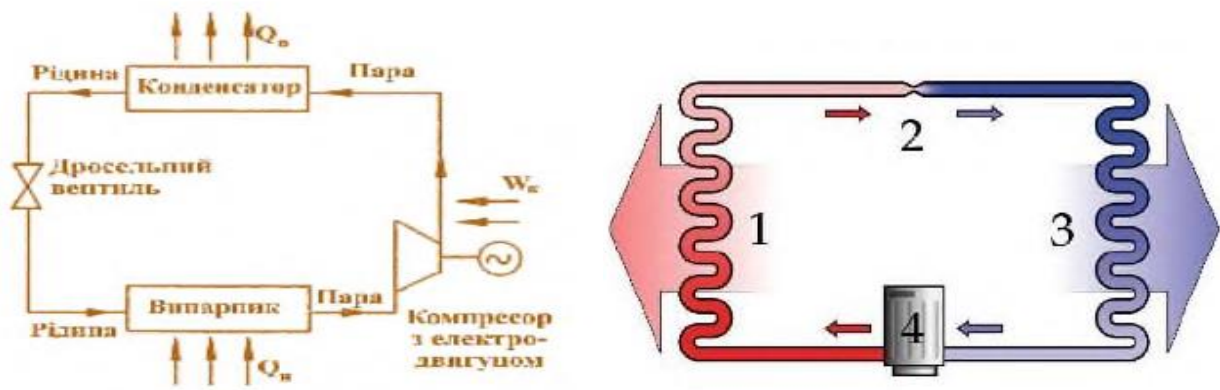


Рисунок 5.9 – Схема парокомпресійного теплового насоса:
1 – конденсатор; 2 – дросель; 3 – випарювач; 4 – компресор

Рівняння теплового балансу парокомпресійного теплового насоса має вигляд:

$$Q_B = Q_H + W, \quad (5.1)$$

де Q_B – енергія, яка передається від конденсатора до робочого середовища високого потенціалу;

Q_H – енергія середовища низького потенціалу, яка передається випарювачу;

W – механічна енергія, витрачена компресором для стиснення холодильного агенту.

Цикл Карно щодо теплового насоса (рис. 5.10) складається з таких процесів:

1) ізотермічний процес DC підведення теплоти Q_{DC} (Q_H) на низькому температурному рівні T_H , що відповідає умові теплообміну з довкіллям;

2) ізоентропічне стискання CB, в процесі якого до робочого тіла підводиться робота W_{CB} ;

3) ізотермічний процес BA відведення теплоти Q_{BA} (Q_B) на високому температурному рівні T_B , що відповідає умові теплообміну із середовищем, яке нагрівається;

4) ізоентропічне розширення AD, в процесі якого робоче тіло повертає енергію W_{AD} , внаслідок чого до компресора подається зовнішня енергія W , яка дорівнює різниці енергій W_{CB} і W_{AD} .

Відношення корисної теплоти, відведеної в процесі BA, до витраченої роботи називають коефіцієнтом перетворення K_p теплового насоса:

$$K_p = Q_{BA} / W = T_B / (T_B - T_H). \quad (5.2)$$

Практичний інтерес з точки зору енергопостачання становить коефіцієнт використання палива $K_{вп}$, який є відношенням корисної енергії на виході установки Q_B до кількості енергії $Q_{пал}$, яке знаходиться в первинному паливі й використане для роботи теплового насоса:

$$K_{вп} = Q_B \cdot Q_{пал} . \quad (5.3)$$

Чим вище коефіцієнт використання палива, тим ефективніша робота теплового насоса. Іншими словами, ефективність теплового насоса тим вища, чим нижча вартість використаної для приводу компресора механічної або електричної енергії.

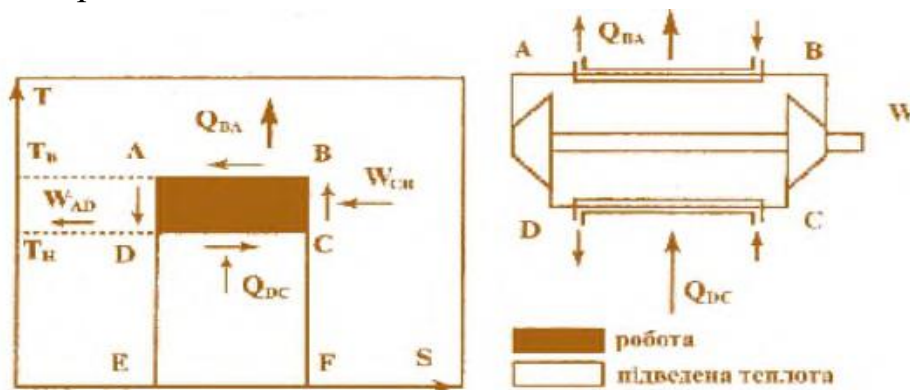


Рисунок 5.10 – Цикл Карно і схема ідеального теплового насоса

Більш складні конструкції аналогічного принципу дії мають теплові насоси абсорбційного і компресійно-резорбційного типів.

Інший принцип роботи мають термоелектричні теплові насоси, дія яких базується на ефекті Пельтьє. Якщо взяти напівпровідниковий пристрій, конструкція якого показана на рисунку 5.11, то при пропусканні постійного струму через пристрій на переході n-p виділяється теплота, а на переході p-n – поглинається. Таким чином, зміною напрямку електричного струму і його величини можна регулювати величину отриманої теплоти або відповідного охолодження.

Теплові насоси такого типу знаходять широке застосування як кондиціонери в приміщеннях, для підігріву води на фермах і в багатьох інших випадках.

Існують також теплові насоси, дія яких заснована на використанні ефекту Ранка, подвійного циклу Ренкіна, такі, що працюють за циклом Стірлінга, Брайтона та інших типів. Ці теплові насоси мають обмежене застосування і специфічні умови використання.

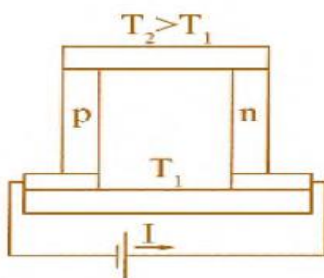


Рисунок 5.11 – Принцип роботи термоелектричного теплового насоса

У цілому, теплові насоси дозволяють одночасно вирішувати такі проблеми, як енергозбереження, зменшення ендегенного впливу на довкілля, економію енергетичних ресурсів і покращення умов роботи теплоенергетичних виробництв.

Джерелами низькопотенційної теплоти, які забезпечують енергетично ефективну і економічно доцільну роботу теплонасосних установок, можуть бути:

- 1) ґрунтова вода, яка зберігає на протязі року постійну температуру на рівні $+8-12\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) підземний ґрунт на глибині від 2 м до 50 м за температури $+10-14\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 3) морська вода з мінімальною температурою в зимовий період $+5-8\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 4) технічна вода систем охолодження ТЕС, АЕС, промислових та інших установок;
- 5) стічні води очисних споруджень населених пунктів тощо;
- 6) застосування теплових насосів перспективне в комбінованих схемах в комплексі з іншими технологіями використання відновлювальних джерел енергії (сонячні, вітрові, біоенергетичні) і в локальних системах. Отже, ґрунтові теплові насоси з тепловою потужністю до 16 кВт (ККД до 6 %) використовуються для опалення будівель і кондиціонування.

У багатьох розвинених країнах використання теплових насосів є одним з ефективних напрямів політики енергозбереження. Значне розповсюдження отримали теплові помпи в локальних системах опалення США (600 тис.), Канади (136 тис.), Швеції (200 тис.), Німеччини (40 тис.), Японії та інших країн, їх потужність швидко зростатиме для тепlopостачання (комунального і виробничого) в розвинутих країнах.

5.4 Гібридні енергосистеми

Гібридна енергосистема (ГЕС) – це інтегрована система, яка поєднує кілька джерел енергії (відновлюваних і невідновлюваних) із системами накопичення та керування, щоб забезпечити надійне, стабільне та економічно

ефективне енергопостачання.

Основна мета – мінімізувати залежність від традиційних джерел (газу, нафти, вугілля) і максимально використовувати потенціал відновлюваних (сонце, вітер, біомаса, вода тощо).

Основні складові гібридної системи.

1. Відновлювані джерела енергії:

- сонячні батареї (фотовольтаїчні модулі) – виробляють електроенергію від сонячного випромінювання;
- вітрогенератори – перетворюють кінетичну енергію вітру в електричну;
- малі гідроелектростанції – використовують енергію потоку води;
- біоенергетичні установки – отримують енергію з органічних відходів (біогаз, біомаса);
- геотермальні системи – використовують тепло надр Землі.

2. Невідновлювані (резервні) джерела:

- дизель- або газогенератори;
- мережеве електропостачання (для систем, що працюють у режимі on-grid) ;

3. Системи накопичення енергії:

- акумуляторні батареї (літій-іонні, свинцево-кислотні) – зберігають енергію в години надлишку;
- гідроакумулюючі, водневі або термічні сховища – у великих проєктах.

4. Система керування (Energy Management System, EMS):

- визначає пріоритети використання джерел;
- керує зарядом / розрядом акумуляторів;
- оптимізує споживання та баланс енергії.

Принцип роботи гібридної системи.

1. Вдень – основне живлення надходить від сонячних панелей або вітрогенератора.

2. Надлишок енергії спрямовується в акумулятори або в мережу (у разі on-grid системи).

3. Уночі або при слабкому вітру – споживання забезпечується з акумуляторів або резервного генератора.

4. Система керування автоматично розподіляє потоки енергії для найефективнішої роботи.

Типи гібридних систем наведені у таблиці 5.6.

Переваги гібридних систем:

– безперебійне енергопостачання – система працює незалежно від погоди або часу доби;

– економічна ефективність – зменшення споживання палива, нижчі витрати на обслуговування;

– екологічність – скорочення шкідливих викидів CO₂;

– гнучкість – можна масштабувати або змінювати конфігурацію;

– енергетична незалежність – актуально для віддалених регіонів.

Недоліки гібридних систем:

– висока початкова вартість обладнання;

– необхідність складної системи керування;

– потреба у кваліфікованому обслуговуванні;

– витрати на заміну акумуляторів.

Таблиця 5.6 – Типи гібридних систем

Тип системи	Джерела	Особливості
Сонячно-вітрова	СЕС + ВЕС	Найпоширеніша комбінація; доповнює роботу вдень / вночі
Сонячно-дизельна	СЕС + дизель-генератор	Застосовується в місцях без мережі
Вітрово-гідро	ВЕС + мініГЕС	Використовується в гірських районах
Сонячно-біоенергетична	СЕС + біогаз	Ефективна для фермерських господарств
Мережево-автономна (on/off grid)	СЕС/ВЕС + мережа + акумулятори	Дає змогу продавати енергію в мережу та мати резерв

Сфери застосування:

– віддалені населені пункти без централізованого енергопостачання;

– фермерські господарства, телекомунікаційні об'єкти, метеостанції;

– приватні будинки, школи, лікарні, де потрібна автономність;

– острівні системи (off-grid).

Схема гібридної системи енергозабезпечення (з сонячними панелями, вітряком, акумулятором, генератором і споживачем) наведена на рисунку 5.12.

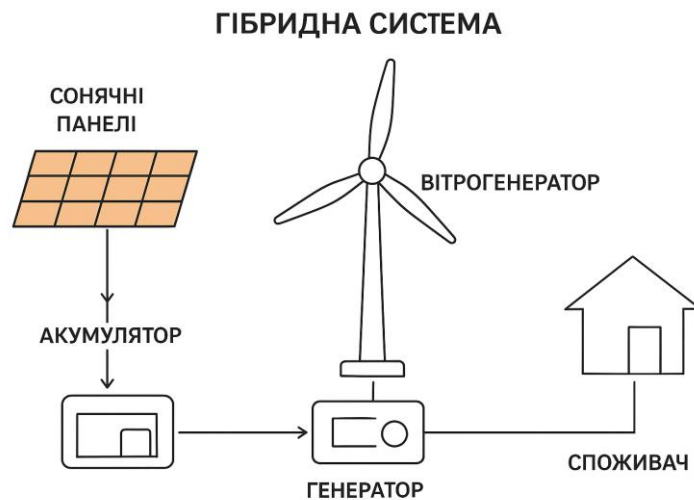


Рисунок 5.12 – Схема гібридної системи енергозабезпечення з сонячними панелями, вітряком, акумулятором, генератором і споживачем

Питання для самоконтролю

1. Класифікація систем сонячного теплопостачання.
2. Які бувають види фотоелектричних елементів?
3. Навести опис пасивних і активних систем сонячного теплопостачання.
4. Класифікація вітроенергетичних установок. Навести їхній опис.
5. Які недоліки вітроенергетичних станцій?
6. Конструкція парокомпресорного теплового насоса.
7. Які переваги має використання гібридних енергосистем порівняно з окремими відновлюваними джерелами енергії?
8. Яку роль відіграє система накопичення енергії (акумулятори) у роботі гібридної енергетичної установки?

6 АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ТА ЙОГО ФУНКЦІЇ

6.1 Системи автоматичного керування

Система автоматичного керування (САК) – це сукупність об'єкта керування (наприклад, виробничого механізму чи робочого органу) та з'єднаних певним чином елементів автоматики, які, взаємодіючи між собою, забезпечують автоматичне виконання завдання керування без безпосередньої участі людини. До складу САК входять пристрої вимірювання, регулювання, обробки інформації та виконавчі механізми, що разом утворюють єдину функціональну систему. Динаміку роботи таких систем, їхні властивості, структуру та принципи побудови досліджує теорія автоматичного керування.

У системі автоматичного керування (САК) основними складовими є об'єкт керування (ОК), вимірювальний елемент (ВЕ), виконуючий елемент (ВикЕ) та пристрій автоматичного керування (ПАК). Об'єкт керування – це технічна, природна або організаційна система, функціонування якої в межах САК підтримується з визначеною точністю відповідно до заданого алгоритму. Пристрій автоматичного керування виконує функції регулювання автоматично, без участі оператора, забезпечуючи реалізацію алгоритму керування. Функціональна схема САК наведена на рисунку 6.1.

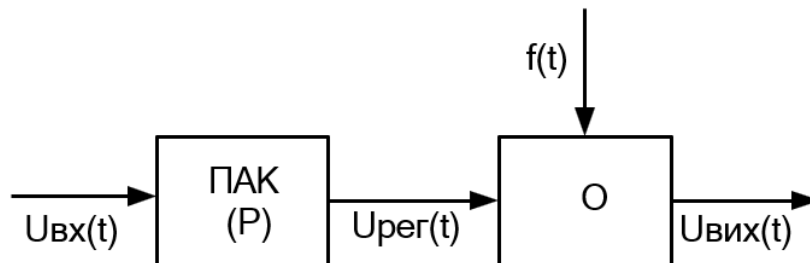


Рисунок 6.1 – Функціональна схема системи автоматичного керування

На схемах САК стрілками позначають основні сигнали, що забезпечують її функціонування:

- $U_{вх}(t)$ – вхідний (задавальний) сигнал, який відображає вплив оператора на систему та визначає бажаний режим роботи об'єкта;
- $U_{рег}(t)$ – регулювальний сигнал, що є реакцією ПАК на вхідну величину і спрямований на підтримання заданого режиму функціонування об'єкта;
- $U_{вих}(t)$ – вихідний сигнал, який характеризує фактичний стан об'єкта та є результатом роботи всієї системи;
- $f(t)$ – сигнал збурення, тобто зовнішній вплив на об'єкт, що може викликати відхилення вихідних параметрів від допустимих меж, визначених

алгоритмом керування.

Ці сигнали у межах САК, забезпечуючи її стабільну та точну роботу.

У системах автоматичного керування вимірювальний елемент виконує функцію контролю вихідної (керованої) величини об'єкта, а також, у більшості випадків, здійснює її перетворення у фізичну величину іншого типу, зручну для подальшої обробки. У деяких типах САК ці елементи також фіксують зовнішні впливи на об'єкт, що класифікуються як збурення.

Найчастіше в ролі вимірювальних елементів використовуються давачі-пристрої, здатні трансформувати неелектричні параметри (такі як температура, тиск, швидкість, положення, зусилля) в електричні сигнали (наприклад, активний, індуктивний або ємнісний опір, напруга, струм, частота, фаза). Прикладом є тахогенератор, який перетворює швидкість обертання в електричну напругу. У технічних системах широко застосовуються давачі для вимірювання напруги, струму, тиску, температури, положення, швидкості, крутного моменту та інших параметрів.

Виконавчий елемент у системі автоматичного керування здійснює цілеспрямований вплив на об'єкт керування, змінюючи його режим роботи відповідно до заданого алгоритму. Тип виконавчого елемента залежить від специфіки технологічного процесу: це можуть бути допоміжні електричні, гідравлічні або пневматичні двигуни, які приводять у дію регульовальні механізми об'єкта. Наприклад, регулятори на трубопроводах для керування подачею повітря, пари чи води, а також рукоятки перемикання швидкостей та інші виконавчі органи.

Приклади САК.

1. Регулятор температури в системах централізованого гарячого водопостачання (рис. 6.2).

Регулятор температури в централізованих системах гарячого водопостачання автоматично підтримує задану температуру води, реагуючи на її зміну. Його робота базується на принципі зворотного зв'язку.

У централізованих системах гарячого водопостачання (ГВП) регулятор температури є ключовим елементом автоматичного керування, що забезпечує комфорт, енергоефективність і безпеку. Його роботу можна описати наступним чином:

Датчик температури, який встановлюється на виході теплообмінника (в трубопроводі гарячої води) або в середній частині накопичувального бака вимірює фактичну температуру гарячої води та передає сигнал на контролер. Контролер порівнює фактичну температуру з заданою ($U_{вх}(t)$) і, залежно від відхилення, змінює положення клапана, регулюючи подачу теплоносія ($U_{рег}(t)$). Температура зазвичай на контролері встановлюється ($52 \div 60$ °C або

47÷55 °C). Клапан регулятора монтується на вході теплоносія (наприклад, пари або гарячої води), що нагріває воду для споживача. Якщо температура нижча за норму 52 °C (47 °C) – клапан відкривається більше; якщо вища – закривається. Система має зворотній зв'язок та постійно оновлює дані, забезпечуючи стабільну температуру на виході ($U_{\text{вих}}(t)$).

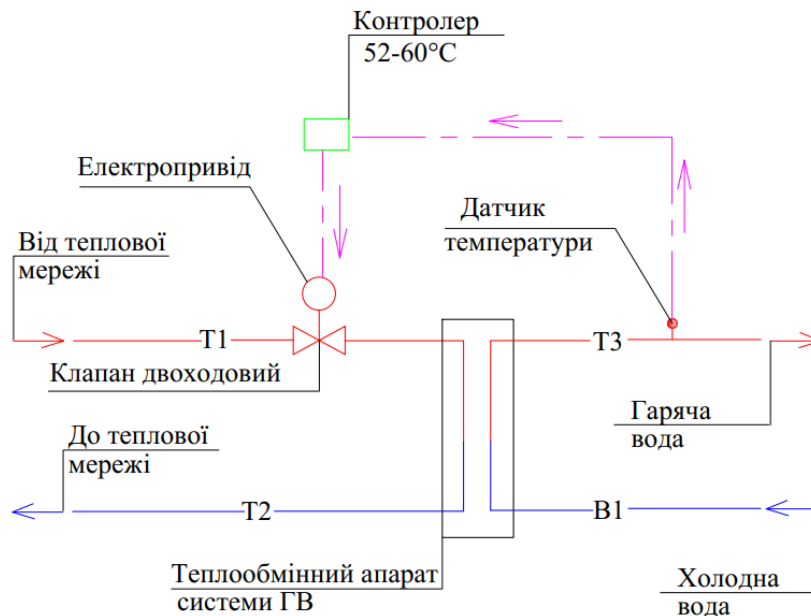


Рисунок 6.2 – Регулятор температури в системах централізованого гарячого водопостачання

2. Регулятор рівня води.

Регулятор рівня рідини в накопичувальних ємностях (рис. 6.3) автоматично підтримує заданий рівень шляхом керування подачею або відведенням рідини, реагуючи на сигнали від датчиків рівня.

У системах автоматичного керування, що обслуговують резервуари, баки або інші накопичувальні ємності, регулятор рівня рідини виконує функцію стабілізації об'єму рідини в межах заданих параметрів. Його робота базується на принципі зворотного зв'язку між датчиком рівня, контролером і виконавчим пристроєм (наприклад, насосом або клапаном).

Основні етапи роботи:

Вимірювання рівня: датчики (електродні, ультразвукові, поплавкові тощо) фіксують фактичний рівень рідини в ємності.

Порівняння з заданим значенням: регулятор аналізує отриманий сигнал і визначає, чи потрібно змінити режим подачі або відведення рідини.

Формування керуючого сигналу: якщо рівень нижчий за норму – регулятор активує насос або відкриває клапан для заповнення; якщо перевищено – запускається процес зливу або припиняється подача.

Зворотний зв'язок: система постійно оновлює дані, забезпечуючи стабільну роботу в реальному часі.

Режими роботи:

Автоматичне заповнення – при досягненні нижнього порогу рівня рідини.

Автоматичний перелив – при перевищенні верхнього порогу.

Сигналізація аварійного рівня – при критичних відхиленнях.

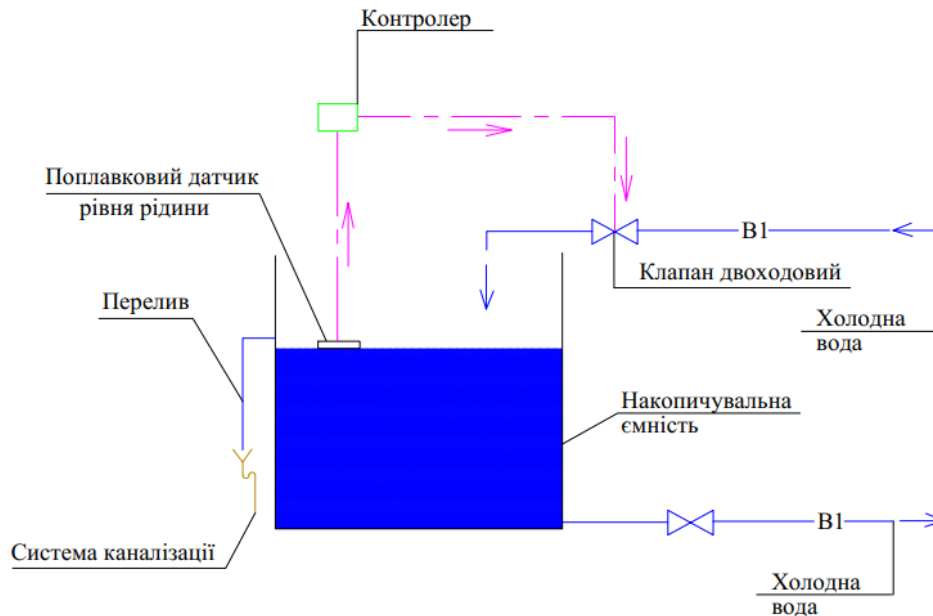


Рисунок 6.3 – Регулятор рівня води накопичувальної ємності

3. Регулятор температури холодильника.

З системами САК ми постійно стикаємося у нашому побутовому житті – холодильник, утюг, електричний чайник, мікрохвильова піч, телевізор тощо.

Розглянемо приклад САК на базі холодильника (рис. 6.4).

Принцип роботи холодильника полягає в автоматичному підтриманні стабільно низької температури всередині корпусу. Основними елементами системи є блок керування та холодильний агрегат із термостатом, який забезпечує охолодження внутрішнього простору. Температура, яку встановлює користувач за допомогою регулятора, виступає як вхідний параметр системи, тоді як фактична температура продуктів у холодильнику є її вихідною величиною.

Під час функціонування компресорного двигуна циркулює фреон, який, потрапляючи до термостатичної камери, розширюється та охолоджує її. Контроль температури здійснюється за допомогою сифона, що блокує клапан і запобігає надмірному розширенню теплоносія в охолоджувальній зоні. Саме перекривання клапана є керуючим впливом у системі. Зовнішні чинники, такі як відкривання дверцят або розміщення теплих продуктів, виступають як

збурювальні дії, що можуть викликати відхилення температурного режиму.

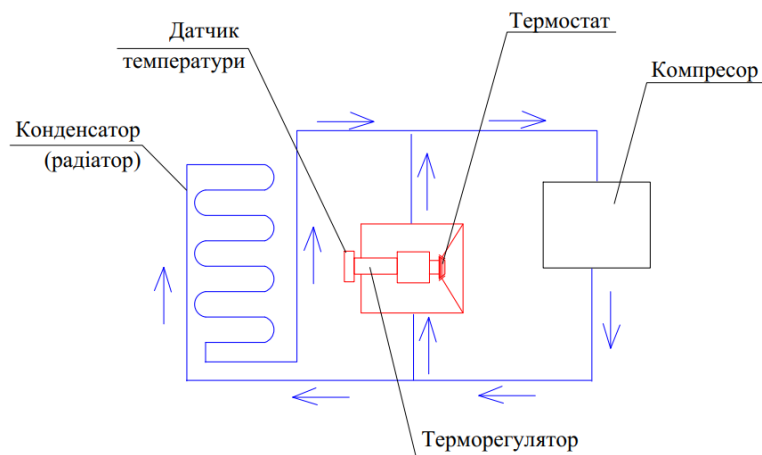


Рисунок 6.4 – Регулятор температури холодильника

Режими роботи САК.

Будь-яка система автоматичного керування (САК) функціонує у двох основних режимах:

- усталеному;
- перехідному.

Усталений режим характеризується стабільністю похибки регулювання в часі. Такий режим настає після завершення перехідних процесів. У межах усталеного режиму розрізняють два типи:

- статичний;
- динамічний.

Статичний усталений режим наявний тоді, коли задавальні та збурювальні впливи залишаються постійними, а параметри системи не змінюються. У результаті цього вихідна величина системи також зберігає свою сталість.

Динамічний усталений режим виникає в тих випадках, коли задавальна, збурювальна або вихідна величина змінюється відповідно до сталого закону в часі, а похибка регулювання залишається сталою. Такий режим характерний, наприклад, для ситуацій, коли задавальна дія змінюється за синусоїдальним законом, або коли її зміна відбувається з постійною швидкістю чи прискоренням. Прикладом динамічного усталеного режиму є функціонування регулятора рівня, коли витік рідини з резервуара відбувається з незмінною швидкістю.

Перехідний режим характеризує стан системи, коли вона змінює свій режим роботи – переходить від одного усталеного стану до іншого. Такий режим виникає внаслідок зміни задавальної дії, збурення або параметрів самої

системи. Перехідні процеси можуть мати різний характер залежно від типу системи керування. Впливаючи на параметри системи, можна змінити динаміку її переходу між режимами.

На рисунку 6.5 наведені критерії яким повинна відповідати САК.

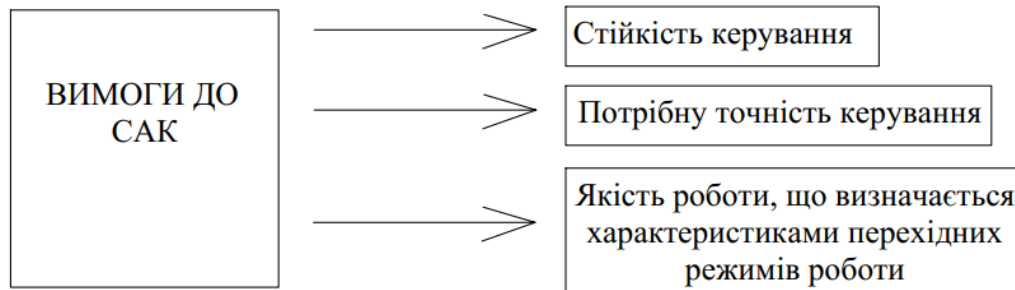


Рисунок 6.5 – Основні критерії яким повинна відповідати САК

Вимоги до САК:

1. Стійкість керування. Забезпечення стійкості керування, тобто здатності системи зберігати працездатність і не переходити в нестабільний стан при дії зовнішніх або внутрішніх збурень.

2. Точність керування. Досягнення необхідної точності регулювання, що означає мінімізацію похибки між задавальною величиною та фактичним виходом системи.

3. Якість роботи. Висока якість функціонування, яка оцінюється за параметрами перехідних процесів, зокрема часом встановлення, коливаннями, швидкістю реакції та характером стабілізації.

Стійкість – це здатність системи автоматичного керування зберігати або відновлювати рівноважний стан після дії зовнішніх або внутрішніх збурень. Вона є фундаментальною вимогою до будь-якої САК, оскільки визначає її працездатність у реальних умовах експлуатації.

Стійка система – це така система, яка, незважаючи на зміну параметрів, характеру взаємодії з іншими системами чи вплив ззовні, здатна відновити свій стан до початкового або наближеного до нього.

Нестійка система – це система, яка після дії збурення не повертається до попереднього стану, а її відхилення з часом лише зростає.

Приклади стійкої та нестійкої систем наведені на рисунку 6.6.

Точність керування в системах автоматичного регулювання визначається величиною похибки, яка виникає в усталеному режимі роботи. Похибка керування – це різниця між бажаним значенням вихідної величини, що задається відповідним сигналом, і фактичним значенням, яке система

забезпечує на виході. Чим меншою є ця різниця, тим точніше працює система. Висока точність регулювання є однією з ключових вимог до будь-якої САК, оскільки вона забезпечує відповідність фактичного результату заданим параметрам, що особливо важливо в технологічних процесах, де навіть незначні відхилення можуть призвести до порушення режиму роботи або зниження ефективності.

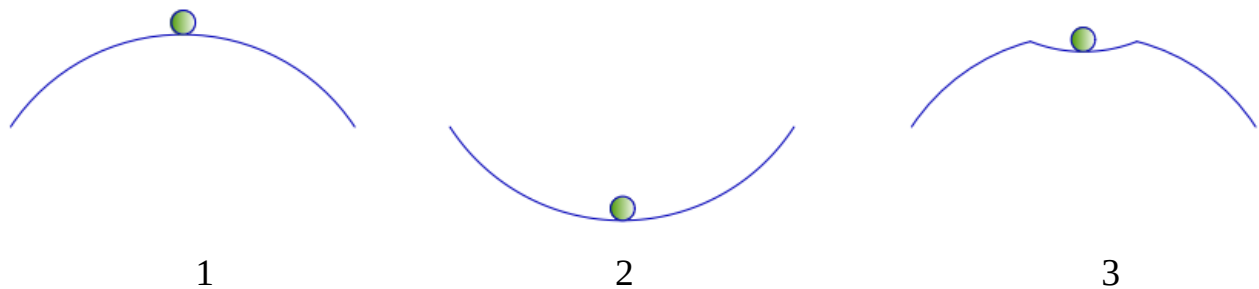


Рисунок 6.6 – Приклади стійкої та нестійкої системи:

1 – нестійка система; 2 – стійка система; 3 – система стійка «в малому» та нестійка «у великому»

На точність впливають тип регулятора, наявність зворотного зв'язку, характеристики сенсорів, виконавчих механізмів, а також зовнішні збурення. У практиці розрізняють статичну похибку, яка виникає при постійній задавальній дії, та динамічну, що проявляється під час змінних режимів або перехідних процесів. Для забезпечення необхідної точності системи часто застосовують ПІ або ПІД-регулятори, які дозволяють компенсувати похибку та стабілізувати вихідну величину. Таким чином, точність керування є показником здатності системи точно реалізовувати задану функцію незалежно від впливу зовнішніх чи внутрішніх факторів.

Експлуатаційні властивості САК значною мірою залежать від якості перехідних процесів, які виникають при зміні режиму роботи або впливі зовнішніх збурень. Саме характеристики цих процесів визначають, наскільки ефективно система реагує на зміну задавальних або збурювальних дій, а також як швидко вона стабілізується після таких змін. До основних параметрів, що характеризують перехідні процеси, належать тривалість процесу стабілізації, амплітуда коливань, які виникають у відповідь на збурення, частота цих коливань, а також форма реакції системи в часі. Чим коротший час перехідного процесу, менша амплітуда та швидше згасання коливань, тим вищою вважається якість роботи САК. Відповідно, аналіз і оптимізація перехідних процесів є важливою складовою проектування та налаштування систем керування.

Функціонування всіх типів систем автоматичного керування базується на двох основоположних принципах: керування за збуренням і керування за відхиленням. У першому випадку система реагує на зовнішні або внутрішні збурення до того, як вони вплинуть на вихідну величину, тобто здійснюється попереднє коригування дії. У другому – керування здійснюється на основі відхилення фактичного значення вихідної величини від заданого, що дозволяє системі компенсувати похибку після її виникнення. Крім того, у практиці широко застосовується комбіноване керування, яке поєднує обидва підходи для підвищення точності, стійкості та швидкодії системи. Такий підхід дозволяє ефективно реагувати як на передбачувані збурення, так і на непередбачувані відхилення, забезпечуючи оптимальну якість регулювання.

Системи автоматичного керування класифікують за принципом функціонування або алгоритмом керування на три основні типи: розімкнуті, замкнуті та комбіновані. Розімкнуті системи реалізують керування за збуренням, тобто реагують на зовнішні впливи до того, як вони позначаться на вихідній величині. Прикладом такої системи може слугувати автоматизована районна котельня, яка регулює температуру теплоносія відповідно до температури зовнішнього середовища, не враховуючи фактичну температуру в приміщеннях.

Замкнуті системи працюють за принципом керування за відхиленням – вони порівнюють фактичне значення вихідної величини із заданим і коригують керуючий вплив на основі цієї різниці.

Класичним прикладом є регулятор Уатта, який автоматично підтримує стабільну швидкість обертання. Комбіновані системи поєднують обидва принципи – вони враховують як збурення, так і відхилення, що дозволяє досягати високої точності та адаптивності. Такі системи застосовуються в складних технічних об'єктах, зокрема в автомобілях, гідро- та теплогенераторах, а також у високотехнологічному обладнанні, де необхідна комплексна реакція на змінні умови.

Системи автоматичного керування класифікуються за кількома ознаками, що відображають їхню структуру, призначення та функціональні можливості. За кількістю контурів регулювання розрізняють одноконтурні, двоконтурні та багатоконтурні системи. Одноконтурні системи мають один замкнутий контур керування, що забезпечує регулювання лише однієї величини. Двоконтурні включають два взаємопов'язані контури, які можуть регулювати різні параметри або одну величину з підвищеною точністю. Багатоконтурні системи зазвичай реалізують комбіноване керування і застосовуються в складних технічних об'єктах, де необхідна координація кількох процесів.

За характером зміни задавальної величини, тобто за призначенням або алгоритмом керування, системи поділяють на системи стабілізації, слідкуючі системи та системи програмного керування. Системи стабілізації підтримують вихідну величину на постійному рівні, слідкуючі – забезпечують її зміну відповідно до змін задавального сигналу, а програмні – реалізують керування за заздалегідь визначеним часовим законом. За кількістю вихідних координат системи поділяються на одномірні та багатовимірні. Одномірні системи керують лише однією вихідною величиною, наприклад, температурою в холодильнику або швидкістю обертання двигуна. Багатовимірні системи здійснюють керування за кількома параметрами одночасно. Прикладом є система керування зенітною ракетою, яка регулює як напрямок руху, так і кут нахилу, або система керування генератором електростанції, що одночасно стабілізує частоту та напругу. Така класифікація дозволяє глибше аналізувати функціональні особливості САК та обирати оптимальні рішення для конкретних технічних завдань.

Системи автоматичного керування класифікуються за характером математичних моделей, які їх описують, а також за типом дії в часі. Залежно від виду рівнянь, що лежать в основі опису, системи поділяються на лінійні та нелінійні. Лінійні системи моделюються лінійними диференціальними рівняннями, для яких справедливий принцип суперпозиції. Це означає, що відповідь системи на сумарну дію дорівнює сумі реакцій на кожен дію окремо, що значно спрощує аналіз і синтез таких систем. Нелінійні системи, навпаки, не підпорядковуються принципу суперпозиції, і їхнє поведіння залежить від складних взаємозв'язків між елементами, що потребує спеціальних методів дослідження.

За характером дії в часі системи поділяються на безперервні та дискретні. У безперервних системах усі елементи забезпечують плавну зміну вихідної величини відповідно до зміни вхідного сигналу. Такі системи, також відомі як аналогові, працюють у режимі постійного часу, де кожна зміна сигналу миттєво відображається на виході. Якщо хоча б один елемент системи порушує цей безперервний зв'язок, система вважається дискретною. У дискретних системах вихідна величина змінюється ступінчасто, навіть якщо інші сигнали змінюються плавно. До дискретних систем належать релейні, імпульсні та цифрові. У релейних системах вихід змінюється при досягненні певного порогового значення вхідного сигналу. Імпульсні системи реагують через визначені часові інтервали, а цифрові поєднують обидва принципи – порогову реакцію та часову дискретність. Така класифікація дозволяє точно визначити тип системи та обрати відповідні методи її аналізу, моделювання і реалізації.

Релейні системи автоматичного керування функціонують на основі релейних елементів, які змінюють свій стан при досягненні певного порогового значення вхідного сигналу (рис. 6.7).

Найпростішим прикладом такого елемента є електромагнітне реле (рис. 6.8), яке спрацьовує при підвищенні вхідної напруги до заданого рівня. У момент спрацювання на виході реле формується напруга, що дорівнює певному фіксованому значенню, наприклад $U_{\text{вих}} = U_0$. Такий принцип дії дозволяє реалізувати чітке перемикання між станами системи, що особливо корисно в умовах, де необхідна порогова реакція на зміну параметрів. Релейні системи широко застосовуються в техніці для реалізації функцій захисту, сигналізації, а також у схемах керування, де важлива простота, надійність і чіткість спрацювання.

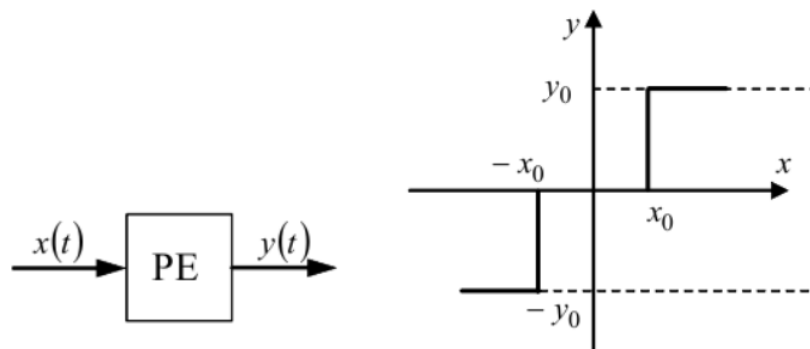


Рисунок 6.7 – Схематичне зображення та характеристика релейного елемента

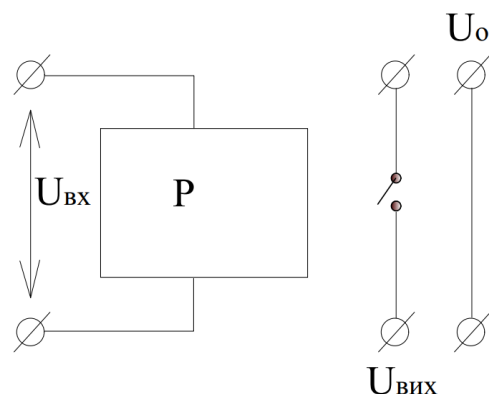


Рисунок 6.8 – Електромагнітне реле

Окрім електромагнітних реле, у релейних системах широко застосовуються безконтактні релейні елементи, зокрема транзисторні ключі (рис. 6.9). Їх принцип дії полягає в тому, що при надходженні керуючого сигналу електричний опір між входом і виходом змінюється різко — від високого до низького значення або навпаки. Така стрибкоподібна зміна дозволяє реалізувати чітке перемикання станів без механічного втручання.

Якість транзисторного ключа оцінюється за співвідношенням опору в закритому стані до опору у відкритому, яке може досягати значень порядку 10^6 . Завдяки цьому електронні ключі мають набагато вищу чутливість і швидкодію порівняно з традиційними електромагнітними реле, що робить їх особливо ефективними в сучасних цифрових і імпульсних системах керування.

Системи автоматичного керування класифікуються за низкою ознак, що відображають їхню поведінку, точність, енергетичну структуру та здатність до адаптації.

За зміною параметрів у часі розрізняють стаціонарні та нестаціонарні системи. У стаціонарних системах усі параметри залишаються незмінними протягом часу, що дозволяє застосовувати сталі математичні моделі для їх аналізу. Нестационарні системи, навпаки, характеризуються тим, що їхні параметри змінюються з часом, і при математичному описі такі зміни враховуються через коефіцієнти диференціальних рівнянь, які є функціями часу.

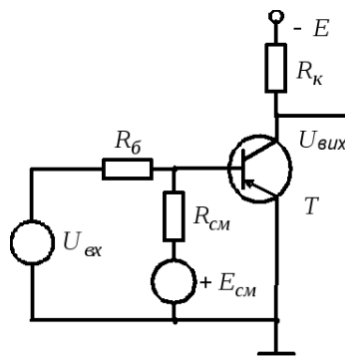


Рисунок 6.9 – Транзисторний ключ

За точністю керування системи поділяють на статичні та астатичні.

Статичні системи мають обмежену здатність до компенсації постійної похибки, тоді як астатичні здатні повністю її усувати завдяки наявності інтегруючих ланок у структурі.

Залежно від наявності додаткового джерела енергії системи класифікують на системи прямої дії, які працюють винятково завдяки енергії вхідного сигналу, та системи непрямої дії, що використовують зовнішнє джерело енергії для формування керуючого впливу.

За способом налаштування та здатністю реагувати на зміну зовнішніх умов системи поділяються на не адаптивні та адаптивні. Не адаптивні системи мають фіксовані параметри, які не змінюються в процесі роботи, тоді як адаптивні здатні автоматично коригувати свої характеристики відповідно до змін середовища або умов функціонування, що забезпечує їхню гнучкість і підвищену ефективність у складних або змінних умовах.

Структурна схема класифікації САК наведена на рисунку 6.10.



Рисунок 6.10 – Структурна схема класифікації САК

6.2 Функції систем автоматичного керування

Функції системи автоматичного керування визначають, які саме завдання вона виконує для забезпечення стабільної, точної та ефективної роботи об'єкта керування. На рисунку 6.11 наведено структурований перелік основних функцій.

Інформаційна функція систем автоматичного керування охоплює комплекс дій, спрямованих на забезпечення ефективного моніторингу та аналізу стану об'єкта керування. Вона включає збір, передавання, обробку та зберігання даних про ключові параметри процесу – такі як температура, тиск, швидкість, положення, витрати, рівень тощо. Ці дані надходять від датчиків і вимірювальних елементів, передаються через канали зв'язку до обчислювальних пристроїв, де проходять фільтрацію, нормалізацію, архівацію та перетворення у зручний формат.

Результати обробки можуть бути подані оператору у вигляді графіків, табличних звітів, попереджень або візуалізованих схем, що дозволяє своєчасно реагувати на зміни в системі. Крім того, інформація може подаватися у цифровому вигляді для подальшого аналізу, оптимізації керування, прогнозування поведінки об'єкта або інтеграції з іншими інформаційними системами.

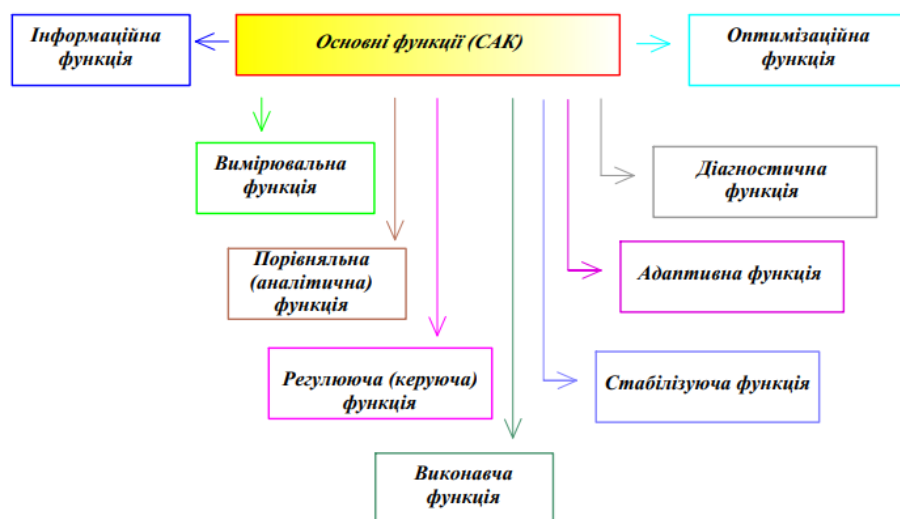


Рисунок 6.11 – Структурна схема основних функцій САК

Інформаційна функція є критично важливою для забезпечення прозорості, надійності та адаптивності САК, особливо в умовах складних технологічних процесів, де точність і своєчасність даних визначають ефективність керування. У сучасних системах вона реалізується за допомогою мікропроцесорних засобів, промислових контролерів, SCADA-систем³ та інтерфейсів людина-машина (НМІ)⁴.

Вимірювальна функція систем автоматичного керування полягає у фіксації поточних значень параметрів об'єкта керування за допомогою спеціалізованих датчиків і сенсорів. Ці елементи здійснюють безперервний або періодичний контроль таких фізичних величин, як температура, тиск, рівень, швидкість, положення, витрати тощо. Зібрана інформація проходить процес перетворення у форму, придатну для подальшої обробки – найчастіше це електричний сигнал або цифровий код, який відповідає значенню вимірюваної величини. Така трансформація забезпечує сумісність із обчислювальними пристроями, контролерами та системами аналізу, дозволяючи точно оцінювати стан об'єкта, формувати керуючі дії та забезпечувати зворотний зв'язок. Вимірювальна функція є базовою складовою будь-якої САК, оскільки без достовірних даних про об'єкт неможливе ефективне керування. У сучасних системах вона реалізується за допомогою аналогових і цифрових сенсорів, перетворювачів, модулів збору даних та інтерфейсів зв'язку.

Порівняльна, або аналітична, функція систем автоматичного керування

³ SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) – це програмно-апаратні комплекси для моніторингу, управління та збору даних з технологічних процесів у реальному часі.

⁴ Інтерфейси людина-машина (HMI, Human-Machine Interface) – це програмні або апаратні засоби, які забезпечують взаємодію оператора з технічною або автоматизованою системою.

полягає в зіставленні заданого значення керованої величини, що надходить на вхід системи, з її фактичним значенням на виході. Це порівняння дозволяє визначити величину відхилення, тобто похибку керування, яка є різницею між бажаним і реальним станом об'єкта. Виявлена похибка слугує основою для формування коригуючого впливу, що спрямований на мінімізацію розбіжності та досягнення заданого режиму роботи. Завдяки цій функції система забезпечує зворотний зв'язок, що є ключовим елементом замкнутого контуру керування. Аналітична функція реалізується за допомогою спеціалізованих блоків порівняння, математичних алгоритмів та логіки регуляторів, які дозволяють оперативно реагувати на зміни та підтримувати стабільність, точність і ефективність керування.

Регулююча, або керуюча, функція систем автоматичного керування полягає у формуванні впливу на об'єкт керування з метою усунення виявленої похибки між заданим і фактичним значенням керованої величини. На основі результатів порівняння система генерує коригуючий сигнал, який спрямовується до виконавчих елементів – регуляторів, приводів, клапанів тощо. Цей сигнал забезпечує стабілізацію процесу, компенсує дію зовнішніх або внутрішніх збурень і підтримує параметри об'єкта в межах заданих норм. Ефективність регулюючої функції визначає здатність системи до точного, швидкого та надійного реагування на зміну умов, що є критично важливим для забезпечення безперервності, безпеки та енергоефективності технологічних процесів. У сучасних САК ця функція реалізується за допомогою алгоритмів П, ПІ, ПІД-регулювання, логічного керування, адаптивних і інтелектуальних методів.

Виконавча функція систем автоматичного керування полягає в реалізації керуючого сигналу, сформованого регулятором, через відповідні виконавчі механізми. Ці механізми – електродвигуни, клапани, реле, сервоприводи, пневматичні або гідравлічні приводи – забезпечують фізичну дію на об'єкт керування, змінюючи його стан відповідно до заданих параметрів. Виконавча ланка є завершальним етапом у структурі САК, де абстрактний керуючий вплив перетворюється на конкретну дію: переміщення, відкриття, регулювання, запуск або зупинка процесу. Ефективність виконавчої функції визначає точність, швидкодію та надійність системи загалом, оскільки саме вона забезпечує безпосереднє втручання в керований процес. У сучасних системах виконавчі пристрої часто інтегруються з датчиками зворотного зв'язку, що дозволяє реалізувати замкнене керування з високим рівнем автоматизації.

Стабілізуюча функція систем автоматичного керування полягає в підтриманні заданого рівня керованого параметра незалежно від впливу зовнішніх або внутрішніх збурень. Вона забезпечує сталість таких величин, як

температура, тиск, швидкість, рівень, напруга тощо, навіть при зміні навантаження, умов середовища або характеристик об'єкта.

Типовими прикладами реалізації стабілізуючої функції є:

- термостат, який підтримує постійну температуру в приміщенні або пристрої;
- регулятор швидкості двигуна, що забезпечує стабільну частоту обертання незалежно від зміни навантаження;
- автоматичний регулятор напруги, який компенсує коливання в електромережі.

Стабілізація досягається завдяки замкненому контуру керування, де система постійно порівнює фактичне значення параметра із заданим і формує коригуючий вплив для компенсації відхилення. Ця функція є критично важливою для забезпечення надійності, безпеки та ефективності роботи технічних систем.

Адаптивна функція систем автоматичного керування полягає в автоматичному коригуванні параметрів або алгоритму керування залежно від змін умов роботи об'єкта. Вона дозволяє системі самостійно аналізувати ситуацію, виявляти зміни у зовнішньому середовищі, навантаженні або характеристиках об'єкта, і відповідно змінювати свою поведінку без участі оператора. Така здатність до самоналаштування забезпечує високу гнучкість, точність і стійкість керування, особливо в умовах невизначеності або нестабільності.

Адаптивна функція реалізується в самоналагоджувальних і інтелектуальних системах, які можуть використовувати методи математичної ідентифікації, нечіткої логіки, нейронних мереж або машинного навчання. Вона є ключовою для сучасних високотехнологічних САК, що працюють у складних динамічних середовищах – таких як енергетика, авіація, робототехніка, мобільна техніка та автоматизовані виробничі комплекси.

Діагностична функція систем автоматичного керування забезпечує контроль технічного стану елементів системи з метою своєчасного виявлення несправностей, відхилень або аварійних ситуацій. Вона реалізується через постійний моніторинг параметрів роботи датчиків, виконавчих механізмів, каналів зв'язку та обчислювальних блоків. При виявленні ознак порушення – перевищення допустимих меж, втрати сигналу, збоїв у логіці роботи – система формує відповідні повідомлення, сигнали тривоги або автоматично переходить у безпечний режим. Діагностика може бути як локальною (на рівні окремого елемента), так і централізованою (на рівні всієї системи), з можливістю архівації подій, аналізу причин і прогнозування відмов. Завдяки цій функції підвищується надійність, безпека та обслуговуваність САК, що особливо

важливо для критичних об'єктів – енергетичних установок, транспортних систем, медичного обладнання та промислових комплексів.

Оптимізаційна функція систем автоматичного керування полягає у визначенні таких режимів і параметрів роботи, за яких забезпечується максимальна ефективність функціонування об'єкта. Це може включати мінімізацію енерговитрат, зменшення часу перехідних процесів, підвищення точності регулювання, зниження рівня шумів або коливань, а також забезпечення стійкості системи в умовах змінних навантажень. Оптимізація може здійснюватися як на етапі проєктування системи, так і в реальному часі – за допомогою адаптивних алгоритмів, математичних моделей, методів чисельного аналізу або штучного інтелекту. У складних технічних об'єктах оптимізаційна функція дозволяє досягати балансу між продуктивністю, надійністю та ресурсозбереженням, що є особливо важливим для енергетичних, транспортних, виробничих і екологічних систем.

Питання для самоконтролю

1. Які основні принципи лежать в основі роботи систем автоматичного керування?
2. Чим відрізняються розімкнуті, замкнуті та комбіновані системи керування?
3. Як класифікуються САК за кількістю контурів регулювання та що характеризує багатоконтурні системи?
4. У чому полягає різниця між статичними та астатичними системами з точки зору точності керування?
5. Які особливості мають лінійні та нелінійні системи автоматичного керування?
6. Як реалізується інформаційна та вимірювальна функція в САК?
7. Яке значення має порівняльна (аналітична) функція для формування керуючого впливу?
8. У чому полягає адаптивна функція САК і в яких системах вона реалізується?
9. Як виконавча та стабілізуюча функції забезпечують фізичну дію та сталість параметрів об'єкта керування?
10. Які завдання вирішує діагностична та оптимізаційна функція в сучасних автоматизованих системах?

7 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

7.1 Поняття сигналу та зворотного зв'язку

Термін «сигнал» походить від латинського слова «*signum*», що означає «знак». У науковій літературі не існує єдиного загальноприйнятого визначення цього поняття. Сигнал можна визначити як повідомлення, що передається за допомогою знаку. У цьому визначенні підкреслюються дві основні риси: він містить інформаційний зміст і потребує матеріального носія для здійснення передачі.

Сигнал не може існувати ізольовано – він завжди реалізується через певне фізичне середовище, яке забезпечує перенесення енергії від джерела до приймача. Таким чином, сигнал необхідно розглядати як поєднання інформаційного повідомлення та матеріального носія. У ролі носія можуть виступати різні фізичні поля: електромагнітні, температурні або поля частинок. Вимірювання параметрів таких полів дозволяє фіксувати сигнали.

Значення сигналу – це числове подання фізичної величини, яка змінюється у часі, просторі або інших координатах. Оскільки передача інформації здійснюється опосередковано – через знаки, символи або фізичні параметри, що мають змістовне навантаження – виникає потреба в їх обробці, аналізі та інтерпретації з боку отримувача.

У контексті систем автоматичного керування сигнал визначається як фізичний процес, що несе інформацію про стан об'єкта, зовнішній вплив або команду керування. Якщо сигнал сформовано з метою передачі повідомлення, то його параметри (наприклад, амплітуда, частота, фаза) змінюються відповідно до змісту переданої інформації.

У межах теорії сигналів будь-який фізичний процес може бути описаний за допомогою математичної функції, яка має певні властивості. Найчастіше це функції, що змінюються неперервно з часом, або впорядковані числові послідовності, які відображають дискретні значення у визначені моменти.

Графічне зображення сигналу $x(t)$ зазвичай подається як набір точок, кожна з яких відповідає конкретному значенню функції у відповідний момент часу (рис. 7.1). Такий графік ілюструє зміну фізичної величини, що характеризує сигнал, у часовому вимірі.

У теорії сигналів усі фізичні процеси розглядаються як математичні функції, що мають певні властивості. Здебільшого це функції часу або просторової координати, які відображають зміну фізичних величин. Для узагальнення прийнято вважати, що сигнали є функціями часу, якщо інше не зазначено окремо. Тип функції, яка використовується для опису сигналу,

залежить від його характеру: періодичні неперервні сигнали зручно моделювати періодичними функціями, випадкові – випадковими процесами, а дискретні – числовими послідовностями. Побудова математичної моделі сигналу полягає у виборі або створенні функції, яка адекватно відображає суттєві властивості досліджуваного процесу. Така модель дозволяє проводити аналіз сигналу без необхідності прямого втручання в фізичний об'єкт, що дає змогу отримати додаткову інформацію про його поведінку. Вся математична база теорії сигналів працює не з реальними фізичними величинами, а з їхніми формалізованими представленнями – функціями, які описують сигнали та забезпечують можливість їх обробки, аналізу й інтерпретації.



Рисунок 7.1 – Довільний неперервний сигнал $x(t)$, що змінюється в часі

Класифікація сигналів.

1. За причиною виникнення:

- сигнали, що виникають у природних системах, охоплюють процеси, властиві фізичним і біологічним об'єктам. Наприклад, до таких сигналів належить електроенцефалографічний запис – відображення електричної активності головного мозку, або інфрачервоне випромінювання зірок, яке фіксується спеціалізованими телескопами;

- сигнали, що генеруються штучними системами, пов'язані з функціонуванням технічних засобів. Прикладом може служити сигнал, який приймається антеною мобільного телефону під час передачі даних.

2. За фізичною природою:

- електричні (напруга, струм). Передаються у вигляді змін напруги або струму в електричних колах. Є найпоширенішими у сучасних автоматизованих системах завдяки простоті обробки, високій швидкодії та можливості цифрового представлення. Наприклад, сигнал з терморпарі, що змінюється залежно від температури;

- пневматичні (тиск повітря). Передаються за допомогою зміни тиску повітря або газу в пневматичних системах. Застосовуються в промислових

умовах, де електроніка може бути небажаною (наприклад, вибухонебезпечні середовища). Як приклад, сигнал керування пневматичним клапаном;

- гідравлічні (тиск рідини). Передаються через зміну тиску рідини (зазвичай масла або води) в гідравлічних системах. Характеризуються високою потужністю та точністю, особливо в системах важкого машинобудування. Прикладом може служити сигнал від гідравлічного датчика навантаження;

- механічні (переміщення, швидкість). Передаються через фізичні переміщення, обертання, швидкість або прискорення тіл. Часто використовуються в системах зворотного зв'язку, де важливо контролювати положення або рух. Як приклад, швидкість обертання ротора електродвигуна.

Правильне усвідомлення фізичної природи сигналів необхідно для ефективного проєктування систем автоматичного керування, оскільки воно забезпечує правильний вибір типу датчиків і виконавчих механізмів, гарантує узгодженість між елементами системи та сприяє підвищенню точності, стабільності й надійності процесу керування.

3. За формою подання:

- безперервні (аналогові) – змінюються плавно та неперервно у часі, приймаючи нескінченну кількість значень у заданому діапазоні. Такі сигнали відображають реальні фізичні процеси без дискретизації. Наприклад, Напруга на виході термопари, що змінюється залежно від температури;

- дискретні – мають окремі значення у визначені моменти часу. Вони є результатом дискретизації безперервних сигналів або генеруються цифровими пристроями. Значення сигналу змінюється стрибкоподібно. Сигнал з енкодера (датчик, який перетворює кутове положення або переміщення обертового об'єкта (наприклад, валу) в електричні сигнали, які використовуються для визначення кута повороту, швидкості та напрямку обертання), який фіксує положення валу у вигляді послідовності імпульсів;

- імпульсні – короточасні сигнали з фіксованою амплітудою, що виникають у визначені моменти часу. Можуть бути одиничними або періодичними, використовуються для передачі подій або синхронізації. Прикладом може служити сигнал синхронізації в системах цифрового зв'язку.

4. За джерелом виникнення:

- вхідні – надходять із зовнішнього середовища. Визначають початкові умови або бажаний режим роботи системи. Наприклад, команда на зміну температурного режиму в термостаті;

- вихідні – результат роботи системи. Відображають реакцію об'єкта керування на вхідні сигнали та збурення. Наприклад температура в холодильній камері після регулювання;

– збурення – це небажані зовнішні або внутрішні впливи, що порушують нормальний режим роботи системи. Вони не є контрольованими і можуть викликати відхилення вихідного сигналу від бажаного значення. Як приклад, зміна температури навколишнього середовища;

– вимірювальні – це сигнали, що надходять від датчиків і відображають поточний стан об'єкта керування. Вони використовуються для порівняння з еталонними значеннями та формування керуючого впливу. Наприклад, рівень освітленості, зафіксований фотодатчиком;

– еталонні – це задані значення бажаного режиму роботи системи. Вони є основою для порівняння з вимірювальними сигналами і визначають, наскільки система відхилилася від мети. Задана температура в термостаті (наприклад, 22 °C).

5. За функціональним призначенням:

– командні – задають цільове (еталонне) значення, до якого повинна прагнути система. Як приклад, Заданий рівень тиску в гідравлічній системі;

– регулювальні – формуються регулятором на основі порівняння командного та вимірювального сигналів. Визначають керуючий вплив на об'єкт з метою досягнення заданого стану;

– коригувальні – вносять додаткові зміни до параметрів системи з метою компенсації збурень або покращення динамічних характеристик. Не є основним керуванням, але підвищують точність і стійкість. Наприклад, автоматична зміна коефіцієнтів ПД-регулятора залежно від умов.

Типи зворотного зв'язку⁵:

- негативний зворотний зв'язок – зменшує відхилення між фактичним і бажаним значенням. Це основа стабільного регулювання. Приклад: термостат знижує нагрів, якщо температура перевищує задану;

- позитивний зворотний зв'язок – підсилює відхилення, використовується рідко, переважно для генерації коливань або в системах з підсиленням. Наприклад, генератор електричних сигналів.

Структура системи зі зворотним зв'язком:

- еталонний сигнал – задає бажане значення;
- об'єкт керування – технічна система, яка реагує на керуючий сигнал;
- датчик – вимірює фактичний вихідний параметр;
- порівняльний елемент – визначає похибку (різницю між еталонним і вимірним значенням);

⁵ Зворотний зв'язок (англ. feedback) – це механізм, за допомогою якого частина вихідного сигналу системи повертається на її вхід для порівняння з еталонним значенням. На основі цієї інформації регулятор формує коригуючий сигнал, що дозволяє зменшити похибку та компенсувати збурення.

- регулятор – формує керуючий сигнал на основі похибки;
- зворотний зв'язок – канал передачі виміряного сигналу назад до регулятора.

Призначення зворотного зв'язку:

- підвищення точності регулювання;
- компенсація збурень;
- стабілізація системи;
- адаптація до змін зовнішніх умов.

7.2 Математичне моделювання систем

Статична математична модель об'єкта керування описує взаємозв'язок між його вхідними та вихідними параметрами в умовах усталеного режиму, не враховуючи динамічні особливості, зокрема інерційність, навіть якщо вона властива об'єкту. Такий опис не включає звичайні диференціальні рівняння, хоча рівняння в часткових похідних можуть бути присутніми. Графічне відображення статичної моделі називається статичною характеристикою.

У випадку, коли математичне моделювання враховує зміну параметрів у часі та інерційні властивості об'єкта, модель набуває динамічного характеру. В її структурі обов'язково присутні диференціальні рівняння першого або вищих порядків, що відображають часову еволюцію системи.

Таким чином, статична модель є окремим випадком динамічної, коли всі часові похідні в диференціальних рівняннях приймають нульові значення, тобто система розглядається в умовах повної стабільності без змін у часі.

Здебільшого параметри системи керування – як її технічних засобів, так і самого об'єкта – змінюються з часом. Це відображається у математичних моделях через часову залежність коефіцієнтів рівнянь, наприклад $a(t)$. Отже, коефіцієнт теплопередачі в моделі теплообміну трубчастого теплообмінника поступово зменшується внаслідок утворення накипу на внутрішній поверхні труб. Подібні явища класифікують як нестационарні процеси.

Нестационарна математична модель – це така модель, у якій параметри рівнянь змінюються з часом. Її побудова є складною і потребує застосування спеціалізованих математичних методів, зокрема чисельного інтегрування, адаптивного моделювання або методів змінних структур.

У практиці технічного моделювання часто припускають, що зміна параметрів відбувається повільно порівняно з характерним часом процесу керування. У таких випадках часову залежність коефіцієнтів можна з достатньою точністю ігнорувати. Об'єкти з подібною поведінкою називають квазістационарними.

Стационарна математична модель – це модель, у якій усі коефіцієнти рівнянь є сталими, тобто не змінюються з часом. Такі моделі широко застосовуються для аналізу та синтезу систем у ustalених режимах.

Основними задачами теорії автоматичного керування є аналіз і синтез систем. У процесі аналізу система та її параметри вважаються заданими, і метою є визначення її властивостей – таких як стійкість, точність, швидкодія, реакція на зовнішні впливи. Синтез, навпаки, передбачає наявність вимог до майбутньої системи, і завдання полягає у побудові такої структури, яка б цим вимогам відповідала. Цей процес є складнішим, оскільки часто не має єдиного розв’язку і потребує оптимізації, врахування обмежень та вибору ефективного алгоритму керування. Обидві задачі розв’язуються на основі математичного моделювання, яке дозволяє досліджувати як ustalені, так і перехідні процеси. Одним із підходів до побудови математичної моделі є структурне розбиття системи на окремі функціональні елементи, для кожного з яких визначаються закономірності перетворення вхідного сигналу у вихідний. Такий підхід базується на зручності формалізованого опису, де система розглядається як послідовність взаємодіючих елементів, здатних передавати фізичні та інформаційні сигнали в чітко визначеному напрямку. Кожен елемент моделюється як перетворювач, а його математичний опис ґрунтується на апіорних знаннях про фізичну природу та функціональні закономірності.

При цьому неминуче виникає потреба в ідеалізації реальних процесів, спрощенні рівнянь, відкиданні другорядних факторів, що вимагає глибокого розуміння об’єкта, фундаментальних законів та експериментальної перевірки.

У більшості випадків реальні технічні системи мають нелінійний характер, тобто залежності між їхніми вхідними та вихідними параметрами не є строго лінійними. Для спрощення аналізу та синтезу таких систем у теорії автоматичного керування широко застосовується лінеаризація – процедура наближеного представлення нелінійних залежностей у вигляді лінійних моделей. Це дозволяє використовувати класичні методи лінійного аналізу, зберігаючи прийнятну точність у межах обраного робочого діапазону.

Одним із прикладів є лінеаризація статичної характеристики елемента, яка відображає графічну залежність між вхідним і вихідним сигналами в ustalеному режимі, тобто без урахування динамічних властивостей. Така характеристика дозволяє визначити коефіцієнт передавання – величину, що описує пропорційність змін між входом і виходом системи (рис. 7.2).

Для лінеаризації гладких (тобто без різких зламів або точок розриву) статичних характеристик застосовують два основні підходи:

– метод дотичної, який полягає у побудові прямої, дотичної до кривої характеристики в обраній точці (рис. 7.3);

– метод малих відхилень, що базується на припущенні про незначні зміни вхідного сигналу навколо робочої точки, де нелінійність незначна і може бути знехтувана.

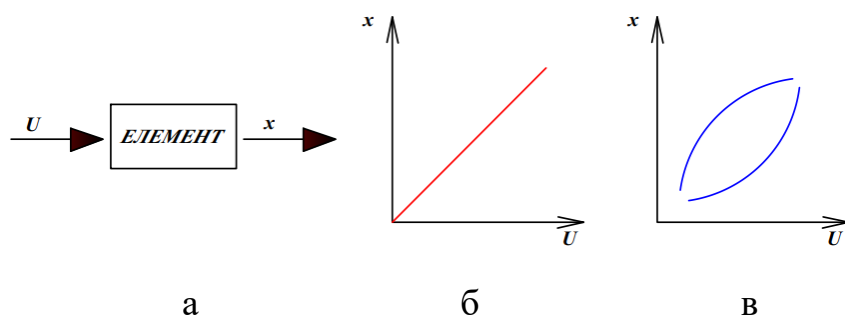


Рисунок 7.2 – Схема елемента (а); статична лінійна характеристика (б); статична нелінійна характеристика (в)

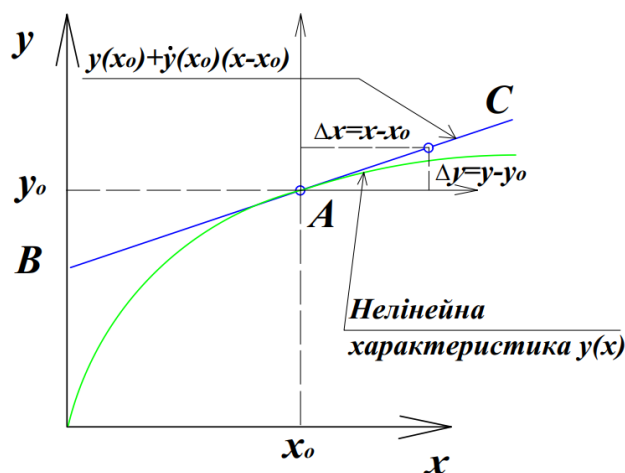


Рисунок 7.3 – Лінеаризація статичної характеристики методом дотичної

Лінеаризація методом дотичної – це математичний прийом, який дозволяє наближено описати поведінку нелінійної функції у вузькому діапазоні навколо певної робочої точки. Суть методу полягає в тому, що функцію $y(x)$ розкладають у ряд Тейлора поблизу точки x_0 , після чого враховують лише перший лінійний член цього розкладу:

$$y(x) \approx y(x_0) + \dot{y}(x_0)(x - x_0), \quad (7.1)$$

де $\dot{y}(x_0)$ – значення похідної функції $y(x)$ у заданій точці А з координатами x_0 і y_0 .

Геометрично лінеаризація функції $y(x)$ у вибраній точці x_0 полягає в заміні її криволінійної форми на дотичну пряму ВС, що проходить через точку дотику А (рис. 7.3). Такий підхід дозволяє локально апроксимувати поведінку

нелінійної залежності лінійною функцією, яка є достатньо точною в малому околі точки x_0 .

Для зручності аналізу систем автоматичного керування лінійні статичні характеристики часто розглядають у формі відхилень змінних від їхніх номінальних значень. Це означає, що замість абсолютних значень x і y використовують $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$, що відповідає перенесенню початку координат у робочу точку (x_0, y_0) . У такому випадку вираз (7.1), який описує лінеаризовану залежність, набуває вигляду:

$$\Delta y = k \cdot \Delta x, \quad (7.2)$$

де $k = \dot{y}(x_0)$ – передатний коефіцієнт об’єкта (коефіцієнт підсилення), що характеризує його передатні (підсилювальні) властивості в статичному режимі.

У подальшому розгляді припускається, що всі об’єкти (системи та елементи) мають лінійні та стаціонарні властивості. Ілюстрації, що демонструють приклади лінеаризації статичних характеристик, наведено на рисунку 7.4.

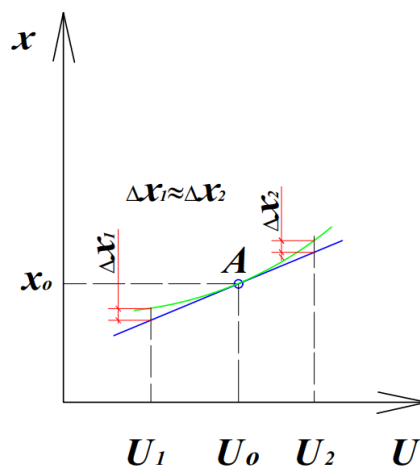


Рисунок 7.4 – Лінеаризація статичної характеристики методом дотичної

Якщо статичну характеристику елемента задано у вигляді графіка, її лінеаризацію можна виконати за допомогою графічних методів. Один із таких методів – метод дотичної, який передбачає побудову прямої, дотичної до кривої статичної характеристики в обраній робочій точці A з координатами (U_0, X_0) . При цьому добирають точку дотику так, щоб відхилення по осі X були приблизно симетричними: $\Delta X_1 \approx \Delta X_2$. Отримана дотична пряма вважається лінійною статичною характеристикою в межах робочого діапазону $U_1 - U_2$, як показано на рисунку 7.4. Такий підхід дозволяє наближено описати поведінку елемента в обмеженій області, де нелінійність не має суттєвого впливу.

Під час виконання лінеаризації важливо оцінити її точність, тобто наскільки адекватно лінійна модель відображає поведінку реального нелінійного елемента в обраному діапазоні. Зокрема, при застосуванні методу дотичної похибка апроксимації зростає на межах робочого інтервалу, де відхилення між дотичною та реальною кривою стають найбільш помітними. Це обмежує достовірність моделі за межами околу точки лінеаризації.

Варто також враховувати, що лінеаризація завжди виконується відносно конкретної робочої точки (наприклад, точки A з координатами x_0, y_0), яка відповідає певному режиму функціонування системи. У разі зміни режиму – тобто переходу до іншого значення вхідного сигналу або параметрів – необхідно повторити процедуру лінеаризації в новій точці, оскільки попередня модель втрачає актуальність.

Додатково варто зазначити, що точність лінеаризації залежить не лише від вибору точки, а й від характеру нелінійності функції. Для слабо нелінійних, гладких характеристик метод дотичної забезпечує прийнятну точність у вузькому діапазоні. Проте для систем із вираженою нелінійністю або зламами доцільно застосовувати чисельні методи або сегментну апроксимацію, де кожна ділянка моделюється окремо.

Таким чином, лінеаризація – це не лише технічна операція, а й процес, що вимагає ретельного аналізу умов застосування, оцінки похибки та адаптації моделі до змін у режимах роботи системи.

7.3 Динамічні характеристики систем

Оцінка динамічних характеристик систем автоматичного керування має важливе значення для забезпечення їх ефективного функціонування. Ці характеристики визначають, як система реагує на зміну вхідних сигналів і зовнішні збурення, що є критично важливим для досягнення точності, швидкодії та стабільності. У сучасних технічних галузях – від енергетики до автоматизації – здатність системи швидко адаптуватися до змін і зберігати керованість залежить від її динамічних властивостей.

Перехідні та частотні характеристики дозволяють кількісно оцінити якість регулювання, виявити затримки, перерегулювання та інші параметри, що впливають на надійність і безпеку.

Математичне моделювання, зокрема використання передавальних функцій і перетворення Лапласа, забезпечує точний опис поведінки системи, що є основою для її оптимізації та інтеграції в складні технічні комплекси. Таким чином, вивчення динамічних характеристик є необхідним як для теоретичного аналізу, так і для практичного впровадження сучасних керуючих

систем відповідно до нормативних вимог.

Динамічні характеристики систем автоматичного керування тісно пов'язані з їх загальною структурою та математичним моделюванням, оскільки саме структура системи визначає типи елементів, їх взаємодію та спосіб формалізації поведінки. Кожна складова САК – сенсори, виконавчі механізми, регулятори – має власні динамічні властивості, які описуються за допомогою математичних моделей, зокрема диференціальних рівнянь, передавальних функцій та операторного методу. Ці моделі дозволяють аналізувати реакцію системи на зовнішні впливи, оцінювати її стабільність, точність і швидкодію. Таким чином, динамічні характеристики є результатом математичного опису структури САК і водночас інструментом для її оптимізації, синтезу та адаптації до конкретних технічних умов.

Динамічна характеристика – це математичний опис реакції системи автоматичного керування на зміну вхідного сигналу в часі. Вона відображає, як вихідна величина змінюється у відповідь на певний тип збурення (наприклад, одиничний стрибок, імпульс або гармонічний сигнал), і дозволяє оцінити швидкодію, точність, стабільність та інші параметри якості керування. Динамічні характеристики можуть бути представлені у вигляді перехідної функції, імпульсної характеристики, частотної характеристики або передавальної функції, що формалізується через диференціальні рівняння або операторні методи, зокрема перетворення Лапласа.

У системах автоматичного керування динамічні характеристики класифікують за типом вхідного сигналу, на який система реагує, та способом представлення її реакції. Перехідна характеристика описує реакцію системи на одиничний стрибок вхідного сигналу (функцію Гевісайда) і дозволяє оцінити параметри якості керування, такі як час встановлення, запізнення та перерегулювання. Імпульсна характеристика відображає реакцію системи на короткочасний імпульс (дельта-функцію) і використовується для аналізу внутрішньої структури системи та її здатності до фільтрації сигналів. Частотна характеристика демонструє поведінку системи у частотній області – як вона реагує на гармонічні сигнали різної частоти – і дозволяє дослідити стабільність, резонансні явища та ефективність у придушенні збурень. Кожен тип характеристики має своє математичне представлення, зокрема через передавальні функції, операторні методи або графічні залежності, і використовується для комплексного аналізу та синтезу керуючих систем.

Сталий та перехідний режими є основними поняттями, що описують часову поведінку системи автоматичного керування. Перехідний режим спостерігається після зміни вхідного сигналу або впливу зовнішнього збурення й триває доти, доки всі тимчасові процеси в системі не затухнуть. У цей

проміжок часу система пристосовується до нових умов, а її вихідна величина змінюється не постійно – можливі коливання або затримки. Сталий режим настає після завершення перехідного процесу, коли всі змінні системи встановлюються на постійних або періодичних рівнях, що не змінюються з часом за незмінного вхідного сигналу. Дослідження обох режимів дає змогу оцінити якість роботи системи, зокрема її точність, швидкодію та стабільність.

Диференціальні рівняння становлять основу математичного опису динаміки систем автоматичного керування, оскільки дають змогу відобразити взаємозв'язок між вхідними та вихідними сигналами з урахуванням їх змін у часі. За допомогою таких рівнянь моделюються фізичні процеси – електричні, теплові, механічні чи гідравлічні – які визначають поведінку об'єктів керування. Порядок диференціального рівняння характеризує порядок системи, а його коефіцієнти задають параметри, що впливають на швидкодію, стабільність і точність функціонування. Перехід до операторної форми, зокрема за допомогою перетворення Лапласа, дозволяє отримати передавальні функції, що широко застосовуються для аналізу та синтезу систем у часовій і частотній областях. Отже, диференціальні рівняння виступають основним інструментом побудови математичних моделей, які описують динамічні характеристики систем автоматичного керування.

Перетворення Лапласа є одним із ключових математичних методів, що широко застосовується для дослідження динамічних систем у теорії автоматичного керування. Воно забезпечує перехід від диференціальних рівнянь, які описують систему у часовій області, до алгебраїчних рівнянь в операторній (частотній) області. На основі цього підходу визначається передавальна функція – відношення зображення вихідного сигналу до зображення вхідного сигналу за нульових початкових умов. Передавальна функція відображає структуру та динамічні властивості системи, слугує базою для побудови частотних характеристик, оцінки стабільності, розробки регуляторів і моделювання перехідних процесів. Завдяки використанню операторної форми, перетворення Лапласа значно спрощує аналіз і синтез систем керування, забезпечуючи ефективне дослідження об'єктів будь-якої складності. Формула прямого перетворення Лапласа для функції часу $f(t)$, визначеної на проміжку $t \geq 0$, має вигляд:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt, \quad (7.3)$$

де $F(s)$ – зображення функції $f(t)$ у площині комплексної змінної s ;

$f(t)$ – початкова функція часу;

$s = \sigma + j\omega$ – комплексна змінна;

e^{-st} – ядро перетворення Лапласа.

Зворотнє перетворення Лапласа записується як:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} ds. \quad (7.4)$$

Таким чином, пряме перетворення використовується для переходу з часової області в операторну (частотну), а зворотнє – для повернення до початкового сигналу $f(t)$.

Це перетворення дозволяє перейти від диференціальних рівнянь до алгебраїчних, що значно спрощує аналіз динамічних систем. Якщо потрібно, можна також подати зворотнє перетворення або приклади для типових функцій.

Приклади типових ланок.

Аперіодична ланка (інерційна першого порядку) описує систему, що реагує на зміну вхідного сигналу із затримкою, але без коливань. Її динаміка визначається диференціальним рівнянням першого порядку, а передавальна функція має вигляд:

$$W(s) = \frac{K}{T_s + 1}, \quad (7.5)$$

де K – коефіцієнт підсилення;

T – постійна часу.

Подібне поведіння характерна для об'єктів із повільною динамікою, таких як теплові або електричні системи.

Інтегрувальна ланка моделює систему, у якій вихідна величина є результатом накопичення (інтегрування) вхідного сигналу. Для постійного вхідного впливу вихід зростає без обмежень, не набуваючи сталого значення. Її передавальна функція записується як:

$$W(s) = \frac{K}{s}. \quad (7.6)$$

Такі властивості притаманні механічним системам, у яких, наприклад, переміщення визначається інтеграцією швидкості.

Колівальна ланка (інерційна другого порядку) описує системи, схильні до коливальних або резонансних процесів. Вона задається диференціальним рівнянням другого порядку, а її передавальна функція має вигляд:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2\xi \cdot T_s + 1}, \quad (7.7)$$

де ξ – коефіцієнт затухання.

При малих значеннях ξ система проявляє коливальну поведінку під час перехідного процесу. Такі ланки притаманні електромеханічним системам,

підвіскам транспортних засобів і коливальним контурам.

Параметри елементів системи автоматичного керування мають безпосередній вплив на її динамічні властивості, визначаючи характер і якість перехідних процесів. Зокрема, постійна часу T в аперіодичних ланках характеризує швидкодію системи: чим менше значення T , тим оперативніше система реагує на зміну вхідного сигналу.

У ланках другого порядку важливою є роль коефіцієнта затухання ξ : при $\xi < 1$ система має коливальний характер реакції, при $\xi = 1$ спостерігається критичне (безколивальне) затухання, а при $\xi > 1$ – повільний аперіодичний процес. Коефіцієнт підсилення K впливає на рівень вихідного сигналу, не змінюючи при цьому форми перехідного процесу. Зміна зазначених параметрів дає змогу адаптувати систему до вимог щодо точності, стійкості та швидкодії, а також оптимізувати керування за наявності змінних навантажень або зовнішніх впливів. Отже, дослідження впливу параметрів є ключовим етапом під час проектування та налаштування систем автоматичного керування.

У технічних системах динамічні властивості залежать від характеру процесу, який описується, і можуть відтворюватися за допомогою типових динамічних ланок. Наприклад, у теплових системах – під час регулювання температури нагрівача – спостерігається повільна аперіодична реакція без коливань. Це типовий приклад ланки першого порядку, коли температура поступово досягає нового встановленого значення. В електричних системах, зокрема в колі з конденсатором, вихідна напруга зростає у відповідь на струм, що надходить, – таке поведіння відповідає інтегрувальній ланці, для якої характерне плавне зростання без усталення. У гідравлічних системах, наприклад у підвісці автомобіля або гідроциліндрі з пружним елементом, зміна тиску спричиняє коливальні процеси, що поступово згасають, – це ознака ланки другого порядку з коливальними властивостями. Такі приклади ілюструють, що фізична природа об'єкта визначає форму його реакції на зовнішні дії, що є основою для створення математичних моделей і точного налаштування систем автоматичного керування.

Динамічні характеристики систем автоматичного керування визначають їхню здатність ефективно реагувати на зміну вхідного сигналу, збурення чи початкові умови. Основні параметри – час запізнення, тривалість перехідного процесу, перерегулювання, амплітуда коливань і точність встановлення вихідного значення – слугують критерієм якості керування.

Стійкість системи залежить від її динамічних властивостей. Надмірна інерційність, слабе затухання або невдалі параметри регулятора можуть спричинити нестабільність чи самозбудження. Натомість правильно налаштовані динамічні параметри забезпечують стабільну роботу, швидке

досягнення режиму та ефективно пригнічення збурень. Якість керування визначається не лише стійкістю, а й точністю відтворення сигналу, мінімізацією похибок і адаптивністю до зовнішніх змін. У швидкодіючих системах важливо уникати перерегулювання, а в енергетичних – забезпечити плавний перехід без різких змін.

Аналіз і вдосконалення динамічних характеристик забезпечують оптимальний баланс між стійкістю, точністю, швидкодією та енергоефективністю. Ці параметри є основою синтезу регуляторів, вибору структури керування (пропорційної, інтегральної чи диференціальної) і відповідають міжнародним вимогам щодо надійності та безпеки технічних систем.

Питання для самоконтролю

1. Що таке сигнал у системах автоматичного керування?
2. Яку роль відіграє зворотний зв'язок у системах автоматичного керування та як він впливає на стабільність і точність системи?
3. Які бувають сигнали за джерелом виникнення?
4. Які бувають сигнали за функціональним призначенням?
5. Чим відрізняється позитивний зворотний зв'язок від негативного, і які наслідки їх застосування в системах автоматичного керування?
6. Які основні методи використовуються для математичного моделювання динамічних систем, і в чому їх переваги?
7. Які основні типи динамічних характеристик використовуються для аналізу систем автоматичного керування, і яку інформацію вони надають про поведінку системи?
8. Як зміна коефіцієнта затухання у ланці другого порядку впливає на форму перехідного процесу?
9. Наведіть приклади типових ланок.
10. Що показує частотна характеристика системи?

8 АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

8.1 Принципи побудови алгоритмів САК

Мета керування в системах автоматичного керування визначає основну функціональну задачу, яку має реалізувати алгоритм керування для забезпечення бажаного поведіння об'єкта. Найпоширенішими цілями є стабілізація, стеження, оптимізація, компенсація збурень, адаптація та робастність.

Стабілізація передбачає утримання системи в заданому стані або режимі, незважаючи на зовнішні чи внутрішні збурення, наприклад підтримання постійної температури в термостаті.

Стеження або слідування полягає в забезпеченні точного проходження системою бажаної траєкторії або зміни вихідного сигналу відповідно до еталонного, як це реалізується в автопілотах чи сервоприводах.

Оптимізація спрямована на досягнення найкращих показників за певним критерієм якості, наприклад мінімізація енергоспоживання або часу переходу, що характерно для енергоефективних систем.

Компенсація збурень означає зменшення їх впливу на вихід системи, що особливо важливо в умовах нестабільного середовища, як-от при керуванні дроном у вітряну погоду.

Адаптація забезпечує здатність алгоритму змінювати свої параметри при зміні умов функціонування або характеристик об'єкта, наприклад при змінному навантаженні на двигун.

Робастність (від англ. «robustness») означає збереження працездатності та прийнятної якості керування навіть при неточному знанні моделі об'єкта або наявності параметричної невизначеності. Формалізація мети керування здійснюється через математичне визначення критерію якості, який може бути інтегральним, часовим, енергетичним або комбінованим, і використовується для синтезу алгоритму, що найкраще реалізує поставлену задачу.

Математична модель є основою для аналізу динаміки системи, оцінки її поведінки та побудови ефективного регулятора. Найпоширенішими формами опису є диференціальні рівняння, передавальні функції та станова модель.

Диференціальні рівняння описують фізичні процеси у вигляді рівнянь, що пов'язують змінні стану, вхідні та вихідні сигнали, і дозволяють моделювати неперервні системи у часовій області.

Передавальні функції використовуються для лінійних стаціонарних систем і визначають співвідношення між вхідним та вихідним сигналом у частотній області, що зручно для аналізу стійкості та частотних характеристик.

Станова модель описує систему у вигляді векторних рівнянь першого порядку, що дозволяє враховувати багатовимірні входи та виходи, а також внутрішній стан системи, і є основою для сучасних методів керування, таких як оптимальне, адаптивне та робастне керування.

Вибір типу моделі залежить від складності об'єкта, вимог до точності, доступності параметрів та цілей керування. Приклади побудови кожного типу моделі для типових технічних об'єктів наведені нижче рис. 8.1).

Електричне коло (RC-ланцюг).

Фізичний зміст: напруга на конденсаторі змінюється відповідно до вхідної напруги та параметрів кола.

Диференціальне рівняння для RC-кола з послідовним з'єднанням резистора та конденсатора:

$$u(t) = RC \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t), \quad (8.1)$$

де R – резистор;

C – конденсатор;

$u(t)$ – вхідна напруга;

$y(t)$ – вихідна напруга.

Передавальна функція:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{RCs + 1}, \quad (8.2)$$

де $W(s)$ – передавальна функція системи. Це відношення вихідного сигналу до вхідного у зображенні Лапласа;

$Y(s)$ – зображення вихідного сигналу $y(t)$ після перетворення Лапласа. Це функція, яка показує поведінку виходу системи в операторній області;

$U(s)$ – зображення вхідного сигналу $u(t)$ після перетворення Лапласа. Це функція, яка представляє вхід у частотній області;

Cs – коефіцієнт у передавальній функції.

Станова модель:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -\frac{1}{RC}x(t) + \frac{1}{RC}u(t) \\ y(t) = x(t) \end{cases}, \quad (8.3)$$

де $x(t)$ – напруга на конденсатор.

Теплова система (однорозонний обігрів).

Фізичний зміст: температура змінюється під впливом теплового надходження та теплопередачі.

Диференціальне рівняння для моделі теплового балансу:

$$C \cdot \frac{dT(t)}{dt} = -G[T(t) - T_3(t)] + Q(t) , \quad (8.4)$$

де C – теплоємність;
 G – теплопередача;
 $T(t)$ – температура;
 $T_3(t)$ – зовнішня температура;
 $Q(t)$ – теплове надходження.

Передавальна функція при сталому T_3 :

$$W(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{1}{C_s + G} . \quad (8.5)$$

Станова модель:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -\frac{G}{C}x(t) + \frac{1}{C}Q(t) + \frac{G}{C}T_3 \\ y(t) = x(t) \end{cases} , \quad (8.6)$$

де $x(t) = T(t)$.

Механічний привід (масивна платформа з тертям).

Фізичний зміст: швидкість платформи залежить від сили, яка прикладається та тертя.

Диференціальне рівняння:

$$F(t) = m \cdot \frac{dv(t)}{dt} + bv(t) , \quad (8.7)$$

де m – маса;
 b – коефіцієнт тертя;
 $v(t)$ – швидкість;
 $F(t)$ – сила.

Передавальна функція:

$$W(s) = \frac{V(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms + b} . \quad (8.8)$$

Станова модель:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -\frac{b}{m}x(t) + \frac{1}{m}F(t) \\ y(t) = x(t) \end{cases} , \quad (8.9)$$

де $x(t) = T(t)$.

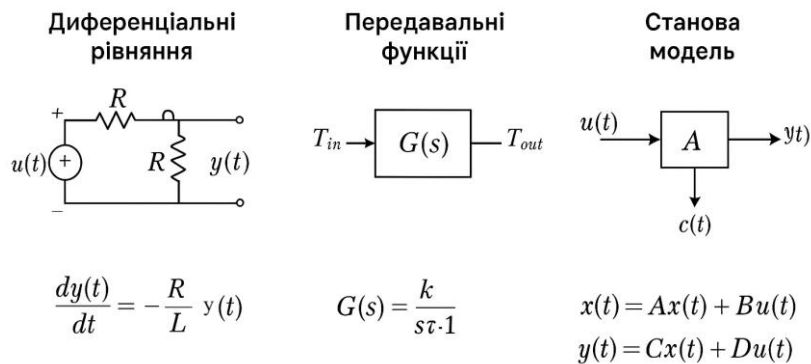


Рисунок 8.1 – Опис об'єкта керування

Вхідні, вихідні, керуючі та збурювальні сигнали є ключовими елементами будь-якої системи автоматичного керування.

Вхідні сигнали задають бажану поведінку системи, наприклад, еталонне значення температури, швидкості або положення, до якого має прагнути об'єкт.

Вихідні сигнали відображають фактичний стан об'єкта, який вимірюється за допомогою датчиків і порівнюється з вхідним значенням для формування помилки керування.

Керуючі сигнали генеруються алгоритмом керування на основі поточного стану системи та помилки, і подаються на виконавчі механізми, такі як двигуни, нагрівачі, клапани або електронні регулятори, з метою впливу на об'єкт.

Збурювальні сигнали є небажаними впливами, які можуть порушити стабільну роботу системи, зокрема зміни навколишнього середовища, шум, коливання навантаження або нестабільність джерел живлення.

Для побудови ефективного алгоритму керування необхідно чітко ідентифікувати всі ці сигнали, визначити їхні джерела, динаміку, можливі обмеження та врахувати їх у математичній моделі системи. Наприклад, у системі клімат-контролю вхідним сигналом є бажана температура, вихідним – фактична температура в приміщенні, керуючим – потужність нагрівача, а збурювальним – температура зовнішнього повітря.

Умови та обмеження на керування визначають реальні межі, в яких може функціонувати система автоматичного керування, і суттєво впливають на вибір структури алгоритму, його параметри та реалізацію. Фізичні обмеження пов'язані з властивостями об'єкта керування, наприклад, максимальна швидкість обертання, межі температури, обмеження на струм або тиск, інерційність системи, наявність запізнення або нелінійностей. Технологічні обмеження виникають із специфіки виробничого процесу або апаратної реалізації, зокрема дискретність сигналів, обмежена точність датчиків, обмеження на частоту дискретизації, затримки в обробці, обмеження на енергоспоживання або ресурс виконавчих механізмів. Нормативні обмеження

встановлюються стандартами, технічними регламентами або вимогами безпеки, наприклад, обмеження на допустимі коливання параметрів, вимоги до надійності, екологічні норми, вимоги до електромагнітної сумісності, а також відповідність національним або міжнародним стандартам (ДСТУ, ISO, IEC). Усі ці обмеження мають бути враховані при побудові математичної моделі, виборі критерію якості та синтезі алгоритму керування, щоб забезпечити не лише ефективність, а й безпечність та відповідність нормативним вимогам.

Класифікація алгоритмів керування базується на їхніх математичних властивостях, способі реалізації та структурній організації.

Лінійні алгоритми керування ґрунтуються на припущенні, що об'єкт має лінійну модель, тобто його поведінку описується рівняннями, де всі змінні входять у першому степені. Такі алгоритми прості в аналізі та реалізації, але мають обмежену точність при керуванні складними або нелінійними об'єктами. Нелінійні алгоритми враховують нелінійні залежності між змінними, що дозволяє керувати об'єктами з насиченням, гістерезисом, перемикачами або іншими складними властивостями, однак їхній синтез і аналіз є значно складнішими.

Дискретні алгоритми реалізуються у цифрових системах і працюють з сигналами, поданими у вигляді послідовностей значень у дискретні моменти часу. Вони широко застосовуються в мікропроцесорних і комп'ютерних системах керування.

Неперервні алгоритми працюють з аналоговими сигналами в реальному часі, що характерно для класичних електронних регуляторів.

Централізовані алгоритми керування передбачають наявність одного керуючого пристрою або регулятора, який обробляє всю інформацію і формує керуючі сигнали для всіх елементів системи. Такий підхід забезпечує узгоджене керування, але є менш гнучким і вразливим до відмов.

Децентралізовані алгоритми розподіляють функції керування між кількома регуляторами або вузлами, кожен з яких керує окремою частиною системи. Це дозволяє підвищити надійність, масштабованість і адаптивність, особливо в складних технічних або мережевих системах.

Правильний вибір типу алгоритму залежить від характеристик об'єкта, вимог до точності, швидкодії, ресурсів реалізації та умов експлуатації.

Вибір критерію якості керування є ключовим етапом при побудові алгоритму САК, оскільки саме він визначає, наскільки ефективно система виконує поставлену задачу. Інтегральні показники оцінюють якість керування на основі інтегралу від помилки або її функцій за часом, наприклад інтеграл квадрата помилки (ISE), інтеграл модуля помилки (IAE), інтеграл помилки з ваговим коефіцієнтом часу (ITAE). Ці критерії дозволяють мінімізувати

відхилення вихідного сигналу від бажаного, враховуючи тривалість і амплітуду помилки. Енергетичні показники враховують витрати енергії або потужності на керування, що важливо для систем з обмеженими ресурсами, наприклад у мобільних пристроях, автономних роботах або енергоефективних технологіях. Часові показники характеризують динаміку перехідного процесу: час встановлення, час наростання, перерегулювання, затримку, і використовуються для оцінки швидкодії та точності реакції системи.

Вибір конкретного критерію залежить від типу об'єкта, мети керування, обмежень на ресурси та вимог до якості. У складних випадках застосовуються комбіновані критерії, які враховують одночасно точність, енергоспоживання та швидкодію. Правильно сформульований критерій якості дозволяє синтезувати алгоритм, який забезпечує оптимальне керування відповідно до заданих умов.

Перевірка стійкості, точності, швидкодії та робастності є обов'язковим етапом оцінки якості алгоритму керування перед його впровадженням у реальну систему.

Стійкість визначає здатність системи повертатися до рівноважного стану після збурення; її перевіряють за допомогою аналізу коренів характеристичного рівняння, критерію Гурвіца, діаграм Боде або Ляпуновських функцій.

Точність характеризує здатність системи досягати бажаного значення вихідного сигналу з мінімальною помилкою; її оцінюють за величиною статичної та динамічної похибки, а також за інтегральними показниками якості.

Швидкодія визначає, наскільки оперативно система реагує на зміну вхідного сигналу або збурення; її перевіряють за часовими характеристиками перехідного процесу – часом наростання, часом встановлення, перерегулюванням.

Робастність відображає здатність алгоритму зберігати працездатність при зміні параметрів об'єкта, неточності моделі або впливі шумів; її оцінюють шляхом моделювання сценаріїв з варіацією параметрів, аналізу запасу стійкості, чутливості до збурень та параметричних невизначеностей.

Тестування алгоритму керування на типових режимах роботи та при збуреннях є критично важливим етапом перевірки його ефективності, надійності та відповідності заданим вимогам. Типові режими роботи охоплюють стандартні сценарії функціонування об'єкта, зокрема запуск, стабілізацію, зміну еталонного значення, перехідні процеси та зупинку. У кожному з цих режимів перевіряється, чи забезпечує алгоритм бажану динаміку, точність та швидкодію.

Окремо проводиться тестування при збуреннях – як внутрішніх (наприклад, зміна параметрів об'єкта, нелінійності, шум у вимірюваннях), так і зовнішніх (зміна навантаження, температури, тиску, електромагнітні впливи).

Метою такого тестування є оцінка здатності алгоритму зберігати стабільність, точність та робастність у несприятливих умовах. Тестування може здійснюватися шляхом математичного моделювання, комп'ютерної симуляції (наприклад, у MATLAB/Simulink), лабораторних експериментів або натурних випробувань. Результати тестування дозволяють виявити слабкі місця алгоритму, скоригувати його параметри та забезпечити відповідність нормативним вимогам і технічним умовам експлуатації.

Підготовка алгоритму керування до реалізації передбачає врахування низки практичних аспектів, які впливають на його працездатність у реальному середовищі.

Апаратна сумісність означає відповідність алгоритму технічним характеристикам обчислювальної платформи, на якій він буде реалізований – мікроконтролера, ПЛК, DSP або промислового комп'ютера. Важливо враховувати доступні типи входів / виходів, частоту дискретизації, розрядність, наявність АЦП / ЦАП, інтерфейси зв'язку та обмеження на пам'ять. Обчислювальна складність характеризує кількість математичних операцій, які необхідно виконати за один цикл керування, і визначає, чи здатна апаратна платформа забезпечити реальний час виконання без затримок. Це особливо важливо для алгоритмів з високою частотою оновлення, адаптивних або оптимізаційних методів.

Ресурсоемність охоплює споживання пам'яті, енергоспоживання, обсяг переданих даних, використання процесорного часу та інших апаратних ресурсів. Надмірна ресурсоемність може призвести до перевантаження системи, зниження надійності або необхідності модернізації обладнання. Тому на етапі підготовки до реалізації алгоритм має бути адаптований до конкретної апаратної архітектури, оптимізований за обчислювальними витратами та протестований на відповідність технічним умовам експлуатації.

8.2 Порівняння дискретних і безперервних алгоритмів

Дискретні та безперервні алгоритми керування – це два фундаментальні підходи до реалізації систем автоматичного керування, які розрізняються за способом обробки сигналів у часі, математичним апаратом та апаратною реалізацією.

Безперервні алгоритми керування працюють із аналоговими сигналами, що змінюються плавно та неперервно. Їх опис ґрунтується на диференціальних рівняннях, передавальних функціях в операторній формі та станових моделях першого порядку. Такий підхід точно відтворює фізичну динаміку об'єкта, забезпечує високу точність та оперативність, особливо у системах, де потрібна

швидка реакція в реальному часі. Реалізація здійснюється на аналогових пристроях – електронних регуляторах, гідравлічних механізмах, аналогових обчислювальних схемах. Аналіз таких систем виконується за допомогою класичних методів теорії керування: частотних характеристик, кореневих локусів, діаграм Боде, критерію Гурвіца тощо.

Дискретні алгоритми керування оперують цифровими сигналами, що обробляються у визначені моменти часу з певним інтервалом. Для їх математичного опису використовують різницеві рівняння, z -перетворення, дискретні передавальні функції та дискретні станові моделі. Такі алгоритми впроваджуються на цифрових платформах, зокрема в мікроконтролерах, ПЛК, DSP, комп'ютерах та цифрових сигнальних процесорах. Їхньою перевагою є можливість гнучкого програмування логіки керування, збереження та обміну даними, а також інтеграції з іншими цифровими системами.

Порівняння дискретних і безперервних алгоритмів охоплює такі аспекти:

Тип сигналів: безперервні – аналогові, дискретні – цифрові.

Математичний апарат: безперервні – диференціальні рівняння, s -область; дискретні – різницеві рівняння, z -область.

Апаратна реалізація: безперервні – аналогові пристрої; дискретні – цифрові контролери.

Точність і швидкодія: безперервні – висока точність, миттєва реакція; дискретні – залежність від частоти дискретизації.

Гнучкість і масштабованість: дискретні алгоритми легко адаптуються, інтегруються в складні системи, підтримують оновлення та діагностику.

Стійкість і робастність: дискретні алгоритми потребують спеціального аналізу стійкості (наприклад, критерію Jury), а безперервні – класичних методів.

У сучасних системах автоматичного керування переважають дискретні алгоритми, оскільки більшість апаратних платформ є цифровими. Проте безперервні алгоритми залишаються актуальними для швидкодіючих процесів, аналогових об'єктів або вбудованих систем з обмеженим цифровим ресурсом.

Типові області застосування.

Безперервні алгоритми:

1. Аналогові системи керування: Безперервні алгоритми природно реалізуються в системах, де сигнали не оцифровуються, а обробляються в реальному часі. Це класичні електронні регулятори, аналогові підсилювачі, стабілізатори напруги, генератори сигналів.

2. Гідравлічні та пневматичні системи: У системах з фізичними процесами, які змінюються плавно (тиск, витрата, переміщення), безперервні алгоритми забезпечують точне керування без необхідності цифрової обробки.

3. Швидкодійні технологічні процеси: Там, де затримка навіть у мілісекунди є критичною (наприклад, у високочастотних електронних пристроях, лазерних системах, системах стабілізації), безперервні алгоритми забезпечують миттєву реакцію.

4. Системи з аналоговими датчиками та виконавчими механізмами: Якщо об'єкт керування має аналогові входи / виходи (наприклад, термопари, аналогові приводи), безперервна обробка дозволяє уникнути втрат точності при перетворенні сигналів.

5. Прості регулятори в автономних пристроях: У пристроях з обмеженими ресурсами, де немає цифрового процесора, використовуються аналогові П, ПІ, ПІД-регулятори, реалізовані на операційних підсилювачах.

6. Класичні навчальні стенди та лабораторні установки: У навчальних цілях часто використовуються безперервні моделі для демонстрації основ теорії керування, аналізу перехідних процесів, побудови діаграм Боде та кореневих локусів.

Безперервні алгоритми залишаються актуальними там, де потрібна висока точність, швидкодія, простота реалізації та відсутність цифрової обробки. Вони особливо ефективні в системах, де об'єкт і середовище є фізично безперервними.

Дискретні алгоритми:

1. Цифрові системи автоматичного керування: Дискретні алгоритми є стандартом у сучасних САК, що реалізуються на мікроконтролерах, ПЛК, DSP, промислових комп'ютерах. Вони забезпечують гнучке програмне керування, можливість оновлення та інтеграцію з цифровими інтерфейсами.

2. Інтелектуальні та адаптивні системи: У системах з машинним навчанням, предиктивним керуванням, самоорганізацією та оптимізацією використовуються складні дискретні алгоритми, які потребують цифрової обробки даних.

3. Мережеві та розподілені системи керування: Дискретні алгоритми дозволяють реалізовувати керування через мережу, з передачею даних між вузлами, синхронізацією, обробкою запитів у реальному часі (наприклад, SCADA, IoT, Smart Grid).

4. Системи з цифровими датчиками та виконавчими механізмами: Якщо об'єкт має цифрові входи / виходи (датчики температури, тиску, положення, цифрові приводи), дискретні алгоритми забезпечують точну обробку та керування.

5. Системи з обмеженими ресурсами: У вбудованих пристроях, автономних роботах, мобільних системах дискретні алгоритми дозволяють оптимізувати обчислювальні витрати, енергоспоживання та пам'ять.

6. Системи з вимогами до архівування, діагностики та зв'язку: Дискретні алгоритми легко інтегруються з базами даних, журналами подій, системами діагностики, віддаленого моніторингу та керування.

Дискретні алгоритми є основою сучасної цифрової автоматизації, забезпечуючи масштабованість, адаптивність, інтеграцію та ефективність у складних технічних і інформаційних системах. Якщо потрібно, можна доповнити прикладами реалізації або схемами.

Дискретизація безперервних алгоритмів – це процес перетворення алгоритму керування, побудованого в безперервній (аналоговій) формі, у дискретну (цифрову) форму для реалізації на цифрових обчислювальних пристроях, таких як мікроконтролери, ПЛК або DSP. Вона є необхідною умовою для впровадження алгоритмів у цифрових системах автоматичного керування.

Основні етапи дискретизації:

1. Вибір періоду дискретизації.

Період дискретизації повинен бути достатньо малим, щоб точно відтворити динаміку об'єкта, але не надто малим, щоб уникнути перевантаження процесора. Зазвичай обирається за правилом:

$$T_s \leq \frac{1}{10f_{max}}, \quad (8.10)$$

де f_{max} – максимальна характерна частота об'єкта.

2. Перетворення безперервної моделі у дискретну.

Застосовуються методи апроксимації похідних або перетворення Лапласа у z-площину. Найпоширеніші методи:

- метод прямої (прямокутної) апроксимації (Euler);
- метод зворотної прямокутної апроксимації (backward Euler);
- метод трапецій (Tustin);
- Zero-Order Hold (ЗОХ) – для передавальних функцій.

3. Отримання різницевого рівняння або передавальної функції $W(z)$.

Наприклад, безперервна передавальна функція:

$$W(s) = \frac{K}{\tau s + 1}. \quad (8.11)$$

Після дискретизації методом Tustin рівняння 8.11 набуває вигляду:

$$W(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}. \quad (8.12)$$

4. Реалізація у вигляді алгоритму.

Дискретна модель перетворюється у різницеве рівняння, яке реалізується

програмно. Наприклад:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + b_0 u(k) + b_1 u(k-1). \quad (8.13)$$

Важливі аспекти:

- при дискретизації необхідно забезпечити, щоб дискретна система залишалася стійкою;
- цифрова реалізація вводить затримки, які потрібно враховувати в моделі;
- цифрові сигнали мають обмежену розрядність, що може впливати на точність.

Вибір періоду дискретизації є ключовим етапом при переході від безперервного алгоритму керування до його цифрової реалізації. Період дискретизації – це інтервал часу між двома послідовними моментами, коли система оновлює дані, вимірює сигнали та обчислює керуючі дії. Від правильного вибору цього параметра залежить точність, стійкість і швидкодія дискретного алгоритму.

Занадто великий період дискретизації може призвести до втрати важливої інформації про динаміку об'єкта, появи затримок, зниження точності та навіть нестійкості системи. Занадто малий період – навпаки, створює надмірне навантаження на обчислювальні ресурси, збільшує енергоспоживання та може спричинити перевантаження процесора.

Згідно з теоремою Котельникова (Шеннона), частота дискретизації повинна бути щонайменше вдвічі більшою за максимальну частоту змін сигналу, що обробляється. Проте в системах керування зазвичай застосовують більш консервативне правило: період дискретизації має бути щонайменше в 5–10 разів меншим за характерний час реакції об'єкта. Це дозволяє точно відтворити динаміку системи та забезпечити ефективне керування.

При виборі періоду дискретизації варто враховувати:

- динамічні властивості об'єкта (інерційність, швидкодія);
- тип алгоритму (наприклад, ПД-регулятор, адаптивний, оптимізаційний);
- обчислювальні можливості апаратної платформи (частота процесора, обсяг пам'яті);
- вимоги до точності, стійкості та енергоспоживання.

У практиці період дискретизації визначається експериментально або шляхом моделювання, з урахуванням компромісу між якістю керування та ресурсними обмеженнями. Правильно обраний період дискретизації забезпечує надійну роботу алгоритму, збереження динамічних властивостей об'єкта та відповідність технічним умовам реалізації.

8.3 Логічне, адаптивне та оптимальне керування

Потреба в розширених методах керування виникає в умовах, коли класичні алгоритми (наприклад, П, ПІ, ПІД-регулятори) не здатні забезпечити ефективне функціонування системи через складність об'єкта, змінність зовнішніх умов, наявність невизначеностей або жорсткі вимоги до точності, адаптивності та оптимальності. У сучасних технічних, енергетичних, біотехнічних та інформаційних системах об'єкти керування часто мають нелінійний характер, змінні параметри, багатоканальну структуру, обмеження на ресурси або функціонують у непередбачуваному середовищі. Це вимагає застосування більш гнучких, інтелектуальних та ресурсно-ефективних підходів до керування.

До розширених методів керування належать:

1. Логічне керування: базується на булевій логіці, умовних переходах, релейних схемах та дискретних станах. Застосовується для керування технологічними циклами, безпечними режимами, послідовностями дій. Реалізується переважно у ПЛК, SCADA, релейних схемах.

2. Адаптивне керування: передбачає зміну параметрів алгоритму в реальному часі залежно від стану об'єкта або зовнішніх умов. Дозволяє підтримувати ефективне керування при зміні динаміки, збуреннях, деградації елементів. Включає методи самоідентифікації, адаптивних регуляторів, нейромережевих моделей.

3. Оптимальне керування: спрямоване на мінімізацію або максимізацію заданого критерію якості (наприклад, енергоспоживання, час, похибка). Вимагає точної математичної моделі та застосування методів варіаційного числення, динамічного програмування, лінійно-квадратичного регулювання (LQR).

Логічне керування – це тип керування, що базується на логічних умовах, булевих операціях та дискретних станах системи. Його принцип полягає у прийнятті рішень залежно від виконання певних умов, без використання математичних моделей або неперервних змінних. Такий підхід широко застосовується у випадках, коли об'єкт керування має чітко визначені режими роботи, а реакція системи повинна бути однозначною – «ввімкнути» або «вимкнути», «відкрити» або «закрити».

Прикладами логічного керування є релейні схеми, діаграми переходів станів, логіка програмованих логічних контролерів (ПЛК), а також алгоритми, реалізовані у вигляді послідовностей команд з умовними переходами. Ці системи не реагують на незначні зміни вхідних сигналів, що забезпечує їхню стійкість до шумів і збурень, а також спрощує реалізацію.

Особливістю логічного керування є його дискретна природа – система перебуває у визначеному стані, який змінюється лише при виконанні заданої умови. Це забезпечує простоту реалізації, надійність та передбачуваність поведіння, що особливо важливо у критичних або безпечних режимах.

Логічне керування широко застосовується в побутовій автоматизації (наприклад, керування освітленням, вентиляцією, сигналізацією), у технологічних циклах (наприклад, послідовне керування насосами, клапанами, конвеєрами), а також у системах безпеки, де необхідна чітка реакція на події (наприклад, аварійне вимкнення, блокування доступу, запуск резервних систем).

Адаптивне керування – це тип керування, при якому алгоритм здатен змінювати свої параметри або структуру в реальному часі залежно від змін у поведінці об'єкта, зовнішніх умов або збурень. На відміну від класичних регуляторів з фіксованими налаштуваннями, адаптивні системи самостійно аналізують поточний стан і перебудовують свою модель або логіку дій для збереження ефективності керування. Основою адаптивного керування є механізм самоідентифікації – система оцінює параметри об'єкта, порівнює їх з еталонними значеннями та коригує свої дії. Це дозволяє підтримувати стабільну роботу навіть при зміні навантаження, деградації елементів, впливі зовнішніх факторів або старінні обладнання. Існують різні типи адаптації: параметрична (зміна числових коефіцієнтів регулятора), структурна (перемикання між різними алгоритмами) та функціональна (зміна логіки керування залежно від ситуації). Адаптивне керування особливо ефективне в складних, змінних або слабо формалізованих системах, таких як авіаційні комплекси, робототехніка, біотехнічні процеси, енергетичні системи з відновлюваними джерелами, а також у медичних пристроях, де параметри пацієнта змінюються в реальному часі. Його переваги полягають у здатності працювати в умовах невизначеності, високій точності при змінних параметрах, зменшенні потреби в ручному налаштуванні та підвищенні надійності системи. Завдяки своїй гнучкості та здатності до самоналаштування, адаптивне керування є важливим етапом розвитку інтелектуальних систем автоматизації.

Оптимальне керування – це метод керування, який полягає у формуванні керуючих дій таким чином, щоб досягти найкращого результату за певним критерієм якості. Такий критерій може включати мінімізацію енергоспоживання, часу перехідного процесу, відхилення від заданої траєкторії або максимізацію продуктивності, точності, економічності. На відміну від класичних регуляторів, оптимальні алгоритми враховують не лише стабільність, а й ефективність керування з урахуванням обмежень на ресурси та сигнали.

Для реалізації оптимального керування необхідна точна математична модель об'єкта, яка описується диференціальними або різницевиими рівняннями. На основі цієї моделі формулюється задача оптимізації, що розв'язується за допомогою методів варіаційного числення (наприклад, принцип максимуму Понтрягіна), динамічного програмування (метод Беллмана), або чисельних алгоритмів. У лінійних системах з квадратичним критерієм широко застосовується метод лінійно-квадратичного регулювання (LQR), який дозволяє отримати оптимальний закон керування у замкненій формі.

Оптимальне керування має високу точність, дозволяє враховувати обмеження, забезпечує найкращу якість керування, але водночас є обчислювально складним і чутливим до похибок моделювання. Воно широко використовується в авіації, космічній техніці, транспорті, енергетиці, економіці, робототехніці – скрізь, де важливо досягти максимальної ефективності при обмежених ресурсах або в умовах складної динаміки.

Завдяки здатності формалізувати цілі керування та забезпечити їх досягнення з урахуванням обмежень, оптимальне керування є потужним інструментом для побудови високоефективних, ресурсозберігаючих і стратегічно орієнтованих систем.

Порівняння підходів керування наведені у таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Порівняння підходів керування

Ознака	Логічне керування	Адаптивне керування	Оптимальне керування
1	2	3	4
Принцип роботи	Умовні переходи, булева логіка	Самоналаштування параметрів	Мінімізація / максимізація критерію якості
Тип сигналів	Дискретні (увімк. / вимк., істина / похибка)	Аналогові або цифрові	Аналогові або цифрові
Модель об'єкта	Не обов'язкова	Оцінюється або адаптується	Необхідна точна математична модель
Гнучкість	Низька	Висока	Висока
Стійкість до змін умов	Обмежена	Висока	Залежить від точності моделі
Обчислювальна складність	Низька	Середня	Висока
Типові сфери застосування	Побутова автоматика, технологічні цикли	Робототехніка, енергетика, біотехнічні системи	Авіація, транспорт, економіка, стратегічні системи

Продовження таблиці 8.1

1	2	3	4
Переваги	Простота, надійність, передбачуваність	Гнучкість, адаптація до змін	Ефективність, оптимізація ресурсів
Недоліки	Нечутливість до малих змін, обмежена логіка	Потреба в алгоритмах адаптації	Високі вимоги до моделі та обчислень

Вибір типу керування залежно від задачі є важливим етапом проєктування системи автоматичного керування і повинен базуватися на аналізі характеристик об'єкта, умов експлуатації, вимог до точності, гнучкості, ресурсів та стійкості.

Логічне керування доцільно застосовувати у випадках, коли об'єкт має дискретні стани, чітко визначені режими роботи, а керування здійснюється за умовними правилами. Це технологічні цикли, побутова автоматика, системи безпеки, де важлива простота, надійність і передбачуваність. Логічні алгоритми легко реалізуються на ПЛК, релейних схемах або в SCADA-системах.

Адаптивне керування рекомендовано для об'єктів зі змінними параметрами, невизначеністю або впливом зовнішніх збурень. Якщо система повинна зберігати ефективність при зміні навантаження, деградації елементів або в умовах нестабільного середовища, адаптивні алгоритми забезпечують самоналаштування і стійкість. Їх варто застосовувати в енергетиці, робототехніці, біотехнічних системах, автономних пристроях.

Оптимальне керування потрібно обирати тоді, коли необхідно досягти найкращого результату за заданим критерієм – мінімізація витрат, часу, енергії або максимізація продуктивності, точності. Цей тип керування потребує точної математичної моделі об'єкта і значних обчислювальних ресурсів, тому його застосування доцільне в авіації, транспорті, економіці, стратегічних системах, де важлива ефективність і ресурсозбереження.

У складних системах часто використовуються *комбіновані підходи* – адаптивно-оптимальні, логіко-адаптивні або предиктивні алгоритми, які поєднують переваги різних методів. Методично доцільно починати з аналізу об'єкта, формулювання вимог до керування, оцінки доступних ресурсів і лише потім обирати відповідний тип алгоритму з урахуванням можливості його реалізації, налаштування та підтримки.

Питання для самоконтролю

1. Що таке алгоритм автоматичного регулювання і які основні етапи його побудови?
2. Які вимоги висуваються до алгоритмів САК з точки зору стійкості, точності та швидкодії?
3. Як впливає структура об'єкта керування на вибір типу алгоритму регулювання?
4. У чому полягає принципова різниця між дискретними та безперервними алгоритмами регулювання?
5. Які переваги та недоліки має дискретне керування порівняно з безперервним?
6. Як вибір періоду дискретизації впливає на якість роботи дискретного алгоритму?
7. У чому полягає суть логічного керування і для яких задач воно найдоцільніше?
8. Які механізми реалізації адаптивного керування використовуються в сучасних САК?
9. Які критерії оптимальності застосовуються в оптимальному керуванні і як вони формалізуються?
10. Як обрати тип керування (логічне, адаптивне, оптимальне) залежно від характеристик об'єкта і умов задачі?

9 КЛАСИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ

9.1 Пропорційні, інтегральні та диференційні регулятори

Історичний розвиток класичних регуляторів охоплює понад два століття технічного прогресу – від механічних пристроїв до сучасних цифрових алгоритмів керування. Першим прикладом автоматичного регулювання вважається центробіжний регулятор Джеймса Ватта (1788), який підтримував постійну швидкість обертання парової машини, реагуючи на зміну навантаження. Цей пристрій реалізовував принцип пропорційного регулювання, що став основою для подальших розробок.

У 1922 році Нікола Мінорський сформулював математичну модель регулятора для керування курсом корабля, яка включала пропорційну, інтегральну та диференціальну складові – фактично перший PID-регулятор. Його дослідження започаткували формалізацію теорії автоматичного керування.

У середині XX століття класичні регулятори набули широкого застосування в електромеханічних системах, зокрема в енергетиці, авіації та промисловості. В цей період активно розвивались методи частотного аналізу, теорія стійкості (Найквіст, Боде), а також аналогові реалізації регуляторів на операційних підсилювачах.

З 1980-х років почалася цифрова ера: класичні регулятори стали програмними модулями в мікропроцесорних системах, ПЛК та SCADA. Це дозволило реалізовувати адаптивне налаштування, фільтрацію шумів, антиінтегральне перенасичення.

У XXI столітті PID-регулятори інтегруються в інтелектуальні системи керування, поєднуються з нейромережами, нечіткою логікою та генетичними алгоритмами. Незважаючи на появу складніших методів, класичні регулятори залишаються фундаментальним інструментом керування завдяки своїй простоті, надійності та універсальності.

Пропорційні (P), інтегральні (I) та диференційні (D) регулятори займають центральне місце в структурі систем автоматичного керування, виконуючи функцію формування керуючого сигналу на основі похибки між заданим і фактичним значенням регульованої величини. У типовій системі керування регулятор розташовується між блоком порівняння (де формується сигнал похибки) та виконавчим органом, який впливає на об'єкт керування. Пропорційний регулятор забезпечує миттєву реакцію на зміну похибки, але не усуває залишкову похибку; інтегральний – накопичує похибку в часі, усуваючи її, але може спричинити повільну реакцію; диференційний – реагує на

швидкість зміни похибки, покращуючи динаміку, але чутливий до шумів. Комбіновані регулятори (PI, PD, PID) дозволяють досягти балансу між точністю, стабільністю та швидкодією, що робить їх універсальним інструментом для широкого спектра технічних об'єктів – від теплових пунктів і насосних станцій до промислових процесів і робототехніки. У сучасних цифрових системах керування (ПЛК, SCADA, DCS) класичні регулятори реалізуються програмно, з можливістю адаптивного налаштування, фільтрації шумів та інтеграції в інтелектуальні алгоритми. Таким чином, P, I, D-регулятори є ключовими елементами систем керування, що забезпечують ефективне, стабільне та енергоефективне функціонування технічних процесів.

Серед переваг класичних регуляторів – простота реалізації, універсальність, надійність і можливість застосування в широкому спектрі технічних об'єктів. Водночас вони мають обмеження: чутливість до шумів (особливо D-компонента), потребу в точному налаштуванні параметрів, обмежену адаптивність до змін параметрів об'єкта. Порівняно з сучасними цифровими регуляторами, класичні мають меншу гнучкість, але залишаються актуальними завдяки своїй ефективності в стабільних умовах. Цифрові регулятори, реалізовані на базі ПЛК, мікроконтролерів або SCADA-систем, дозволяють автоматичне налаштування, фільтрацію шумів, інтеграцію з інтелектуальними алгоритмами (нейромережі, нечітка логіка), що робить їх більш придатними для складних, змінних або багатofакторних процесів. Незважаючи на це, класичні P, I, D-регулятори залишаються основою теорії керування та широко застосовуються в енергетиці, промисловості, будівництві та інших галузях. Порівняння класичних та цифрових регуляторів наведено у таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Порівняння класичних регуляторів з сучасними цифровими регуляторами

Ознака	Класичні регулятори (P, I, D)	Сучасні цифрові регулятори
Реалізація	Аналогова або програмна	Програмна (на ПЛК, мікроконтролерах)
Гнучкість	Обмежена	Висока (адаптивні, самоналаштовні)
Робота з шумами	Обмежена	Можлива фільтрація, компенсація
Застосування в складних системах	Обмежена	Ефективне (нейромережі, нечітка логіка)
Налаштування	Ручне, емпіричне	Автоматичне, алгоритмічне

Порівняння пропорційних, інтегральних, диференційних регуляторів наведено у таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 – Порівняння пропорційних, інтегральних, диференційних регуляторів

Характеристики	Пропорційний (P) регулятор	Інтегральний (I) регулятор	Диференційний (D) регулятор
Принцип дії	Керуючий сигнал пропорційний до похибки	Керуючий сигнал пропорційний до інтегралу похибки	Керуючий сигнал пропорційний до похідної похибки
Математична модель	$u(t) = K_p \cdot e(t)$	$u(t) = K_i \cdot \int e(t)dt$	$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$
Вплив на систему	Зменшує похибку, але залишає залишкову	Усуває залишкову похибку	Покращує динаміку, зменшує перерегулювання
Швидкодія	Висока	Низька	Висока
Стійкість	Висока при правильному налаштуванні	Може знижувати стійкість	Може викликати нестабільність при шумі
Переваги	Простота, швидка реакція	Усунення статичної похибки	Прогнозування змін, покращення динаміки
Недоліки	Не усуває залишкову похибку	Повільна реакція, ризик перерегулювання	Чутливість до шумів, складність реалізації
Застосування	Просте регулювання температури, рівня	Системи з постійним навантаженням	Швидкі процеси, де важлива передбачуваність
Налаштування	Один параметр K_p	Один параметр K_i	Один параметр K_d

Типові перехідні процеси для пропорційного (P), інтегрального (I), диференційного (D) та комбінованого PID-регуляторів відображають реакцію системи на одиничний стрибок задавального сигналу. P-регулятор забезпечує швидке наближення вихідної величини до нового значення, але створює сталу залишкову похибку, оскільки його дія пропорційна миттєвій похибці. I-регулятор усуває цю похибку шляхом її накопичення, проте реагує повільніше й може викликати перерегулювання, особливо в інерційних об'єктах. D-регулятор формує імпульс керувального сигналу, реагуючи на зміну похибки

в часі, що покращує прогнозованість динаміки, однак робить систему чутливою до шумів і самотійно не забезпечує стабільності.

Найбільш збалансований перехідний процес забезпечує PID-регулятор, який поєднує швидкодію Р-компоненти, усунення статичної похибки завдяки І-частини та зменшення перерегулювання завдяки D-компоненті. Це робить PID універсальним для точного та стабільного керування широким спектром технічних об'єктів.

Форма перехідної характеристики визначається налаштуваннями регулятора. Збільшення коефіцієнта K_p прискорює реакцію, але може погіршити стійкість; K_i впливає на швидкість усунення похибки, і його надмірне значення спричиняє коливання; K_d зменшує перерегулювання, проте підвищує чутливість до шумів. Оптимізація параметрів забезпечує необхідний баланс між точністю, швидкодією та стійкістю.

Вибір типу регулятора визначається динамікою об'єкта, вимогами до точності, швидкодії та стійкості. Для малих інерційних систем із некритичною залишковою похибкою застосовують Р-регулятори. За наявності статичної похибки доцільні І або PI-регулятори. Коли потрібне передбачення змін (наприклад, у сервоприводах), використовують D або PD-регулятори. Найбільш універсальним залишається PID-регулятор, який ефективно працює в складних або змінних режимах, зокрема в енергетиці, хімічних і виробничих комплексах.

Параметри регулятора обирають на основі аналізу динаміки об'єкта та моделювання перехідних процесів. На практиці застосовують емпіричні методи (метод Зіглера – Ніколса) та автоматизовані алгоритми оптимізації, що забезпечують стабільність і точність системи керування.

9.2 PID-алгоритм: налаштування та застосування

Алгоритми налаштування параметрів класичних регуляторів (P, I, D) є критично важливими для забезпечення ефективної роботи системи керування. Найбільш поширеними підходами є емпіричні методи, серед яких особливе місце займає метод Зіглера – Ніколса, а також метод критичного періоду, метод проб і помилок, графічні методи та чисельне моделювання.

Метод Зіглера – Ніколса: класика емпіричного налаштування.

Метод запропонований у 1942 році Джоном Зіглером і Натаном Ніколсом. Він базується на експериментальному визначенні двох характеристик системи:

- критичного коефіцієнта підсилення $K_{кр}$ – значення K_p , при якому система починає стійко коливатись;
- критичного періоду коливань $T_{кр}$ – період цих коливань.

Алгоритм налаштування:

1. Встановлюється тільки Р-регулятор (тобто $K_i = 0$, $K_d = 0$).
2. Поступово збільшується K_p , доки система не почне стійко коливатись.
3. Фіксуються $K_{кр}$ і $T_{кр}$.

Параметри PID-регулятора визначаються за таблицею 9.3.

Таблиця 9.3 – Параметри Р, PI, PID регуляторів

Тип регулятора	K_p	T_i (інтегральний час)	T_d (диференціальний час)
P	$0,5 \cdot K_p$	—	—
PI	$0,45 \cdot K_p$	$\frac{T_{кр}}{1,2}$	—
PID	$0,6 \cdot K_p$	$\frac{T_{кр}}{2}$	$\frac{T_{кр}}{8}$

Цей метод ефективний для систем з добре вираженою коливальною поведінкою, але може бути неточним для сильно інерційних або нелінійних об'єктів.

Метод Зіглера – Ніколса є швидким і ефективним для первинного налаштування, особливо в промислових умовах.

Ручне налаштування (метод проб і помилок).

Параметри змінюються вручну.

1. Спостерігається реакція системи на одиничний стрибок.
2. Мета – мінімізувати перерегулювання, час встановлення та залишкову похибку.

Метод відкритого контуру (step response method).

1. На об'єкт подається одиничний стрибок.
2. Аналізується форма перехідної характеристики.
3. Визначаються параметри моделі типу «інерційна ланка з запізненням» (First Order Plus Dead Time – FOPDT), на основі яких обираються параметри PID.

Графічні методи.

1. Побудова логарифмічних частотних характеристик (Bode plot).
2. Визначення запасу стійкості та фазового запасу.
3. Налаштування PID для забезпечення бажаної частотного поведіння.

Чисельне моделювання.

1. Застосування програмного забезпечення (MATLAB/Simulink, TIA Portal, LabVIEW).
2. Автоматичне налаштування параметрів PID-регулятора на основі моделі об'єкта.

3. Можливість оптимізації за критеріями якості: інтеграл квадрату похибки (ISE), часу встановлення, перерегулювання тощо.

Графіки реакції системи другого порядку на одиничний стрибок для чотирьох типів регуляторів: P, PI, PD та PID, які наведені на рисунку 9.1, демонструють, як параметри впливають на швидкодію, точність та стабільність.

P-регулятор ($K_p = 1$): повільна стабілізація з залишковою похибкою.

1. PI-регулятор ($K_p = 1, K_i = 0.5$): усуває залишкову похибку, але має більший перехідний час.

2. PD-регулятор ($K_p = 1, K_d = 0.1$): швидша реакція з меншим перерегулюванням.

3. PID-регулятор ($K_p = 1, K_i = 0.5, K_d = 0.1$): найкращий баланс між швидкодією, точністю та стабільністю.

Модель об'єкта:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}. \quad (9.1)$$

Це система другого порядку з критичним демпфуванням.

Вплив параметрів:

1. K_p (пропорційний коефіцієнт): збільшує швидкодію, але може викликати перерегулювання.

2. K_i (інтегральний коефіцієнт): усуває залишкову похибку, але може спричинити колювання.

3. K_d (диференціальний коефіцієнт): згладжує реакцію, зменшує перерегулювання, але чутливий до шумів.

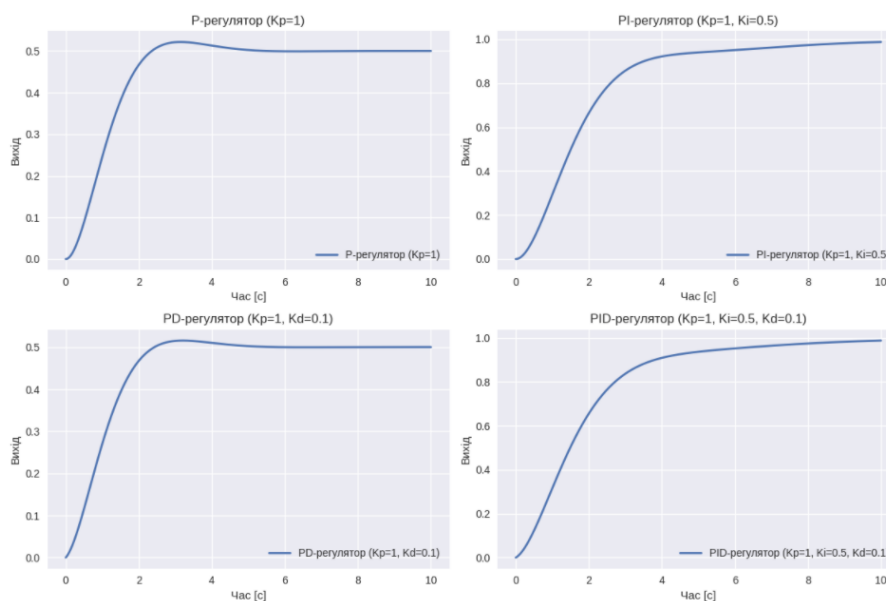


Рисунок 9.1 – Графіки реакції системи другого порядку на одиничний стрибок для чотирьох типів регуляторів

9.3 Практичні приклади застосування регуляторів у промислових і побутових системах

Класичні регулятори (P, I, D, PID) широко застосовуються як у промислових, так і в побутових системах для забезпечення точного, стабільного та енергоефективного керування. Їхнє використання охоплює теплотехніку, автоматизацію, електроприводи, водопостачання, клімат-контроль та інші сфери.

Приклади в промисловості та енергетиці:

1. Індивідуальні теплові пункти (ІТП).

PID-регулятори керують температурою теплоносія залежно від зовнішніх умов і графіка споживання. Вони забезпечують енергоефективне регулювання з урахуванням інерційності системи.

2. Промислові ПЛК-системи (Siemens, Schneider, OMRON).

Вбудовані PID-регулятори керують тиском, рівнем, витратою, температурою в технологічних процесах – наприклад, у харчовій, хімічній або фармацевтичній промисловості.

3. Системи дозування та змішування.

PI-регулятори забезпечують точне дозування компонентів у виробництві фармпрепаратів, лаків, напоїв, де важлива стабільність концентрації.

4. Електроприводи та серводвигуни.

PD-регулятори використовуються для стабілізації швидкості, моменту або положення валу. Наприклад, у верстатах з ЧПК – застосовуються PID-регулятори з адаптивним налаштуванням.

5. Автоматизовані системи водопостачання

PID-регулятори керують тиском у магістралях, рівнем у резервуарах, витратою насосів, забезпечуючи безперебійне постачання та захист обладнання.

Побутові приклади:

- клімат-контроль у будівлях (BMS-системи). PID-регулятори керують температурою, вологістю, вентиляцією, забезпечуючи комфорт і енергоефективність. Наприклад, у системах «розумного будинку» або офісних центрах;

- побутові термостати. P-регулятори використовуються в простих термостатах для керування нагрівальними елементами (електрокотли, теплові панелі). PID – у більш складних моделях з прогнозуванням;

- пральні машини та посудомийки. PID-регулятори керують температурою води, швидкістю обертання барабана, дозуванням миючих засобів;

- системи кондиціонування та теплові насоси. PI-регулятори забезпечують плавне регулювання температури та тиску холодоагенту, зменшуючи енергоспоживання;

- 3D-принтери та побутові CNC-пристрої. PID-регулятори стабілізують температуру екструдера, положення осей, забезпечуючи точність друку.

Класичні регулятори залишаються незамінними в автоматизованих системах завдяки своїй простоті, надійності та гнучкості. У побуті вони забезпечують комфорт і енергоефективність, а в промисловості – точність, стабільність і безпеку технологічних процесів.

Питання для самоконтролю

1. Яка основна функція пропорційного (P) регулятора?
2. Який тип регулятора найкраще усуває залишкову похибку в системі?
3. Який компонент PID-регулятора відповідає за згладжування перерегулювання?
4. Що потрібно визначити для налаштування PID-регулятора методом Зіглера – Ніколса?
5. У якій побутовій системі найчастіше застосовується PI-регулятор?
6. Який тип регулятора найчастіше використовується для стабілізації швидкості обертання двигуна?
7. Що відбувається при надмірному збільшенні коефіцієнта у PID-регуляторі?
8. Який регулятор самостійно не здатен стабілізувати систему?
9. У чому полягає роль інтегрального компонента в PID-регуляторі?
10. Який регулятор найчутливіший до вимірювальних шумів?

10 КОНЦЕПЦІЇ БУДІВЕЛЬ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

10.1 Поняття Net Zero Energy Building

Будівля з майже нульовим споживанням енергії (NZEB) – це об’єкт, що характеризується дуже високими енергетичними показниками, при яких кількість енергії, необхідної для забезпечення його функціонування, є дуже низькою або близькою до нуля. Згідно з [31], така енергія повинна надходити переважно з поновлюваних джерел, зокрема вироблених на місці або поблизу будівлі. NZEB поєднує в собі комплекс пасивних і активних заходів, спрямованих на мінімізацію енергоспоживання, а також інтеграцію систем генерації енергії з відновлюваних джерел. Це поняття є ключовим елементом європейської політики декарбонізації будівельного сектору, сприяє досягненню кліматичних цілей, підвищенню енергетичної незалежності та забезпеченню сталого розвитку. Визначення NZEB є обов’язковим для всіх нових будівель у ЄС з 2021 року, а в Україні поступово інтегрується через адаптацію національних нормативів до європейських стандартів.

Основні характеристики NZEB включають: надвисоку енергоефективність, використання відновлюваних джерел енергії та досягнення енергетичного балансу між споживанням і генерацією. Ці принципи закладені в [31] та адаптовані в українських нормативних документах.

Будівлі з майже нульовим енергоспоживанням (NZEB) мають відповідати трьом ключовим характеристикам:

1. Енергоефективність:

- якісній теплоізоляції огорожувальних конструкцій;
- герметичності оболонки будівлі;
- ефективним системам вентиляції з рекуперацією тепла;
- енергоощадному освітленню та автоматизованому управлінню енергоспоживанням (BMS);
- мінімізації втрат енергії через пасивні архітектурні рішення (орієнтація, інсоляція, затінення).

2. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ):

- сонячна енергія (фотовольтаїка, геліоколектори);
- геотермальні системи;
- біомаса;
- вітрова енергія (у разі доступності);
- перевага надається локальним джерелам – тобто тим, що виробляються на місці або поблизу будівлі.

3. Баланс споживання та генерації енергії:

- кількість енергії, спожитої будівлею протягом року, повинна бути компенсована еквівалентною кількістю енергії, виробленої з ВДЕ;
- баланс враховується на рівні первинної енергії (з урахуванням коефіцієнтів перетворення);
- допускається використання зовнішніх джерел ВДЕ, якщо вони розташовані поблизу (наприклад, муніципальні сонячні станції).

Існують різні рівні енергоефективності будівель, що відображають поступовий перехід до повної декарбонізації будівельного сектору. Основна різниця полягає в обсязі енергоспоживання, джерелах енергії та нормативних вимогах, це – NZEB, ZEB, Nearly-Zero та Low-Energy Buildings. Порівняння рівнів енергоефективності наведені у таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Порівняння рівнів енергоефективності будівель

Показник	Low-Energy Building	NZEB / Nearly-Zero	ZEB
Енергоспоживання	Знижене	Майже нульове	Нульове
Джерела енергії	Змішані	Переважно ВДЕ	Винятково ВДЕ
Викиди CO ₂	Знижені	Мінімальні	Відсутні
Нормативна вимога в ЄС	Не обов'язкова	З 2021 року	З 2030 року
Баланс споживання / генерації	Частковий	Річний баланс	Повна компенсація

ZEB (Zero Emission Building).

Будівля з нульовими викидами. Це новий стандарт, який замінює NZEB у ЄС з 2030 року. Відповідно до оновленої EPBD, ZEB не повинна спричиняти жодних викидів CO₂ під час експлуатації, а вся енергія має надходити з поновлюваних джерел. Включає також вимоги до матеріалів, води та циркулярності.

Nearly-Zero Energy Building.

Термін, ідентичний NZEB, використовується в англomовних джерелах. В українському контексті – «будівля з майже нульовим споживанням енергії». Визначення, методологія та нормативна база збігаються з NZEB.

Low-Energy Building.

Будівля з низьким енергоспоживанням. Це проміжний рівень між стандартною будівлею та NZEB. Вона має покращену теплоізоляцію, ефективні системи, але не обов'язково використовує ВДЕ або досягає енергетичного балансу. Часто застосовується як перехідний етап у реконструкції.

Енергетичний баланс у контексті NZEB – це концепція, яка передбачає узгодження між кількістю енергії, яку будівля споживає протягом року, та кількістю енергії, яку вона виробляє з поновлюваних джерел. Основними складовими такого балансу є первинна енергія, енергія з ВДЕ та механізми компенсації.

Первинна енергія – це енергія, що надходить з природних джерел у незмінному вигляді (газ, нафта, вугілля, сонячне світло, вітер тощо). У розрахунках енергоефективності NZEB враховується саме первинна енергія, тобто з урахуванням втрат на транспортування, перетворення та розподіл. Для кожного виду енергії застосовуються коефіцієнти перетворення (primary energy factors), які визначають її вплив на загальний енергетичний баланс.

Енергія з відновлюваних джерел (ВДЕ) – це енергія, що виробляється з джерел, які природно відновлюються: сонячна, геотермальна, біомаса, вітрова. У NZEB перевага надається локальним ВДЕ – тобто тим, що виробляються на місці або поблизу будівлі. Вони можуть покривати частину або всю потребу в енергії, залежно від технічних рішень.

Компенсація споживання – це механізм, за яким річне споживання енергії будівлею компенсується еквівалентною кількістю енергії, виробленої з ВДЕ. Такий баланс може бути досягнутий:

- шляхом прямого споживання виробленої енергії (on-site use);
- через мережеву компенсацію (наприклад, надлишок енергії подається в мережу, а в інший час споживається з неї);
- за допомогою сертифікатів походження або договорів на постачання зеленої енергії.

У нормативному контексті енергетичний баланс NZEB визначається як річний баланс первинної енергії, де споживання $\leq$ виробництво з ВДЕ. Це забезпечує не лише енергоефективність, а й зниження викидів CO₂, що відповідає цілям Європейського зеленого курсу.

Показники енергетичної ефективності будівель виражаються у вигляді питомого споживання первинної енергії на одиницю площі за рік – у кіловат-годинах на квадратний метр на рік: kWh/(m² · рік). Цей показник є ключовим критерієм для класифікації будівель за рівнем енергоефективності, зокрема для NZEB.

Типові орієнтовні значення питомого споживання енергії на одиницю площі за рік, kWh/(m² · рік), наведені у таблиці 10.2.

Для будівель NZEB встановлюються підвищені вимоги до огорожувальних конструкцій, вентиляції, освітлення та систем гарячого водопостачання (ГВП), які забезпечують мінімізацію тепловтрат і ефективне використання енергії.

Таблиця 10.2 – Типові орієнтовні значення питомого споживання енергії на одиницю площі за рік, kWh/(m² · рік)

Клас будівлі	Питоме споживання первинної енергії, kWh/(m ² · рік)
Стандартна будівля (старий фонд)	> 250
Реконструйована будівля	120–180
Low-Energy Building	70–100
NZEB	40–60 (або нижче, залежно від типу будівлі)
ZEB	≈ 0

Огороджувальні конструкції.

Опір теплопередачі має перевищувати мінімальні нормативні значення, встановлені [3].

Наприклад:

- зовнішні стіни $R \geq 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$;
- покриття мансард $R \geq 4,95 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$;
- світлопрозорі конструкції $R \geq 0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$;
- теплові мости повинні бути усунені або мінімізовані згідно з [32];

герметичність оболонки – підтверджується тестом на повітропроникність (Blower Door Test), значення $n_{50} \leq 1,0 \text{ год}^{-1}$ для житлових будівель.

Вентиляція.

Механічна вентиляція з рекуперацією тепла є обов'язковою для NZEB.

ККД рекуператора – не менше 75 % (згідно з [33]).

Управління вентиляцією – автоматизоване, з датчиками CO₂, вологості, присутності.

Баланс припливу / витяжки – забезпечує комфорт і енергоефективність.

Освітлення.

Світлодіодні джерела світла з високим світловим потоком на одиницю потужності ($\geq 100 \text{ лм/Вт}$).

Автоматичне керування освітленням – датчики руху, освітленості, таймери.

Денне освітлення – максимальне використання природного світла через архітектурні рішення.

Системи гарячого водопостачання (ГВП) та опалення.

Інтеграція з ВДЕ – сонячні колектори, теплові насоси, біомаса.

Теплоізоляція трубопроводів – згідно з [34].

Зменшення втрат – циркуляційні контури з таймером або керуванням за потребою.

Температурне регулювання – системи з автоматичним контролем температури подачі.

Сонячні панелі (PV): для генерації електроенергії, інтегруються в дах або фасад.

Геліоколектори: для нагріву води в системах ГВП.

Геотермальні системи: використання тепла ґрунту через зонди або колектори.

10.2 Світові стандарти та нормативна база (ЄС, США, Україна)

Вимоги до будівель NZEB в Україні регламентуються двома основними документами [3, 28].

Мінімальні теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій, вимоги до герметичності оболонки, вентиляції, освітлення, систем гарячого водопостачання, а також класифікацію будівель за рівнем енергоефективності встановлює [3]. Документ передбачає обов'язкову сертифікацію енергетичних характеристик для нових і реконструйованих об'єктів, визначає граничні значення питомого споживання первинної енергії та забезпечує відповідність Закону України [2].

Норматив [28] є адаптацією європейського стандарту, що регламентує методику розрахунку енергетичного балансу будівлі. Він охоплює всі енергетичні потоки – опалення, охолодження, вентиляцію, освітлення, ГВП – та враховує коефіцієнти перетворення енергії для різних джерел. Стандарт дозволяє моделювати річний енергетичний баланс з урахуванням виробництва енергії на місці або поблизу, що є основою для класифікації NZEB. Обидва документи гармонізовані з [31] і є обов'язковими для проєктування, сертифікації та експлуатації енергоефективних будівель в Україні.

Основні положення ключових нормативних документів ЄС, що регламентують енергетичні характеристики будівель у контексті NZEB:

1. Директива [31] встановлює загальні вимоги до енергетичної ефективності будівель у ЄС. Визначає поняття NZEB як будівлі з дуже високими енергетичними характеристиками, де майже вся необхідна енергія надходить з поновлюваних джерел, зокрема вироблених на місці або поблизу. Директива зобов'язує держави-члени розробити національні плани переходу до NZEB, впровадити енергетичну сертифікацію та мінімальні вимоги до нових і реконструйованих будівель.

2. Базовий стандарт [28], який визначає загальну методологію оцінки енергетичних характеристик будівель. Він охоплює всі енергетичні потоки – опалення, охолодження, вентиляцію, освітлення, гаряче водопостачання – та

враховує енергію, вироблену на місці або поблизу. Встановлює правила розрахунку первинної енергії, викидів CO₂, а також критерії для класифікації NZEB і ZEB.

3. Стандарт [35] регламентує енергоефективність систем автоматизації та управління будівлями (BACS). Визначає класи енергоефективності систем управління, їх вплив на загальне енергоспоживання, а також вимоги до інтеграції BMS (Building Management Systems) у проекти NZEB.

4. Стандарт [36] стосується енергоспоживання освітленням у будівлях. Встановлює методи розрахунку енергетичних витрат на штучне освітлення, враховуючи тип джерел світла, керування, денне освітлення та сценарії використання. Є обов'язковим для оцінки енергетичного балансу NZEB.

5. Стандарт [37] містить методику розрахунку теплового навантаження на опалення. Враховує кліматичні умови, тепловтрати через огорожувальні конструкції, інфільтрацію, вентиляцію. Застосовується для визначення потужності систем опалення в NZEB.

6. Стандарт [38] надає спрощену та динамічну методику розрахунку енергоспоживання на опалення та охолодження. Враховує внутрішні теплові надходження, сонячну радіацію, поведінку користувачів. Є основою для попереднього енергетичного моделювання будівель.

7. Стандарт [7] визначає загальне енергоспоживання будівлі та методи перетворення кінцевої енергії в первинну. Встановлює правила обчислення енергетичного балансу, що включає всі системи будівлі, а також дозволяє порівнювати енергоефективність різних об'єктів.

Ці документи формують нормативну основу для проектування, оцінки та сертифікації NZEB у Європейському Союзі та є обов'язковими для гармонізації національних стандартів, зокрема в Україні.

Нормативна база США:

- ASHRAE 90.1 – це міжнародний стандарт, розроблений Американським товариством інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE), який встановлює мінімальні вимоги до енергоефективного проектування нових нежитлових будівель, а також реконструкції та модернізації існуючих. Стандарт охоплює огорожувальні конструкції, системи опалення, вентиляції, кондиціонування повітря (HVAC), освітлення, гаряче водопостачання та енергоспоживання вбудованого обладнання. Він передбачає два підходи до перевірки відповідності: прескриптивний (за конкретними параметрами) та модельний (на основі енергетичного моделювання). ASHRAE 90.1 є основою для енергетичних кодів у США, використовується в міжнародних сертифікаційних системах (зокрема LEED), регулярно оновлюється відповідно до технологічного прогресу та є ключовим

інструментом для зменшення енергоспоживання, експлуатаційних витрат і викидів парникових газів у будівельному секторі;

- ASHRAE 189.1 – це міжнародний стандарт, який встановлює мінімальні вимоги до проєктування, будівництва та експлуатації вискоефективних і сталих нежитлових будівель, окрім малоповерхових житлових. Він охоплює широкий спектр аспектів сталого будівництва, включаючи енергоефективність, водозбереження, якість внутрішнього середовища, вибір екологічно чистих матеріалів, управління відходами та зменшення впливу на довкілля. Стандарт визначає вимоги до огорожувальних конструкцій, систем HVAC, освітлення, відновлюваних джерел енергії, автоматизації та моніторингу, а також інтегрує положення щодо експлуатаційної ефективності будівель. ASHRAE 189.1 є основою для Міжнародного зеленого будівельного кодексу (IgCC) і використовується як нормативна база у багатьох країнах для досягнення цілей сталого розвитку, зменшення викидів парникових газів і підвищення якості життя в будівлях;

- IECC (International Energy Conservation Code) – це міжнародний енергетичний кодекс, розроблений Міжнародною радою з кодексів (ICC), який встановлює мінімальні вимоги до енергоефективного проєктування, будівництва та реконструкції будівель. Кодекс охоплює житлові та нежитлові будівлі, регламентуючи теплоізоляцію огорожувальних конструкцій, ефективність систем опалення, вентиляції, кондиціонування повітря (HVAC), освітлення, гарячого водопостачання та автоматизації. IECC регулярно оновлюється (наприклад, версії 2012, 2015, 2018, 2021, 2024) відповідно до технологічного прогресу та змін у політиці енергоефективності. У США IECC прийнятий як обов'язковий енергетичний кодекс у багатьох штатах і муніципалітетах, а також використовується як нормативна база для сертифікації будівель, зменшення енергоспоживання та досягнення цілей сталого розвитку;

- LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) – це міжнародна система сертифікації сталих будівель, розроблена U.S. Green Building Council (USGBC), яка оцінює екологічну ефективність та сталий підхід у проєктуванні, будівництві, експлуатації та обслуговуванні будівель. Вона базується на бальній системі, що охоплює ключові аспекти сталого розвитку: енергоефективність, водозбереження, якість внутрішнього середовища, вибір матеріалів, інновації та вплив на довкілля. Будівлі можуть отримати один із чотирьох рівнів сертифікації – Certified, Silver, Gold або Platinum – залежно від кількості набраних балів. LEED застосовується до нових і існуючих житлових, комерційних, громадських та інфраструктурних об'єктів, сприяючи зменшенню викидів парникових газів, підвищенню енергоефективності та створенню

комфортного середовища для користувачів. Система широко використовується у понад 180 країнах і є одним із найвпливовіших інструментів сталого будівництва у світі;

- ZNE Ready Guidelines – це рекомендації, розроблені Міністерством енергетики США (DOE) та Національною лабораторією з відновлюваної енергії (NREL), які визначають принципи проектування будівель, готових до досягнення нульового чистого енергоспоживання (NZEB). Документ охоплює архітектурні стратегії, енергоефективні системи HVAC, освітлення, гаряче водопостачання, інтеграцію відновлюваних джерел енергії (зокрема сонячної), а також автоматизацію, моніторинг і управління енергоспоживанням. Рекомендації спрямовані на створення будівель, які споживають мінімум енергії та здатні компенсувати її завдяки власному виробництву, відповідаючи цілям декарбонізації, енергетичної незалежності та сталого розвитку. Вони застосовуються в державних, освітніх, комерційних і громадських проєктах як основа для переходу до NZEB-рішень.

10.3 Переваги та виклики реалізації NZEB

NZEB є ключовим інструментом реалізації Європейського зеленого курсу, спрямованого на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Вони поєднують енергоефективність, використання ВДЕ та низькі викиди CO₂, що відповідає принципам сталого розвитку.

NZEB втілює концепцію сталого розвитку через:

- раціональне використання ресурсів: мінімізація споживання енергії завдяки пасивним та активним рішенням;
- зменшення екологічного сліду: скорочення викидів парникових газів через використання поновлюваних джерел енергії;
- комфорт і здоров'я мешканців: забезпечення якісного мікроклімату, природного освітлення, чистого повітря;
- економічну ефективність: зниження витрат на енергію протягом життєвого циклу будівлі;
- інтеграцію в циркулярну економіку: використання екологічних матеріалів, можливість повторного використання елементів.

Європейський зелений курс (European Green Deal) – це стратегія ЄС, що передбачає:

- кліматичну нейтральність до 2050 року;
- скорочення викидів CO₂ на 55 % до 2030 року;
- реновацію будівельного фонду – ініціатива «Renovation Wave»;
- перехід до Zero Emission Buildings (ZEB) з 2030 року;

- інтеграцію NZEB у національні плани енергетики та клімату (NECP).
- Цілі зеленого курсу ЄС та внески NZEB наведені у таблиці 10.3.

Таблиця 10.3 – Цілі зеленого курсу ЄС та внески NZB

Ціль ЄЗК	Внесок NZEB
Кліматична нейтральність	Зниження енергоспоживання та викидів CO ₂
Енергоефективність	Використання пасивних і активних рішень
Відновлювана енергетика	Інтеграція сонячних, геотермальних, біоенергетичних систем
Циркулярна економіка	Екоматеріали, повторне використання, мінімізація відходів
Здорове середовище	Якісний мікроклімат, природне освітлення, низький рівень шуму

NZEB відіграє ключову роль у декарбонізації будівельного сектора, забезпечуючи зниження енергоспоживання, перехід на відновлювані джерела енергії та скорочення викидів CO₂ протягом життєвого циклу будівлі:

1. Зменшення споживання первинної енергії.

NZEB споживають на 60–90 % менше енергії, ніж стандартні будівлі.

Завдяки теплоізоляції, герметичності, рекуперації та BMS, зменшуються втрати енергії.

2. Перехід на ВДЕ.

NZEB використовують сонячні панелі, геотермальні системи, біомасу, що замінює викопне паливо.

Виробництво енергії на місці або поблизу зменшує залежність від централізованих джерел з високими викидами.

3. Скорочення викидів CO₂.

NZEB забезпечують річний енергетичний баланс, що дозволяє компенсувати споживання енергії з ВДЕ.

Викиди CO₂ під час експлуатації наближаються до нуля, особливо в моделях ZEB (Zero Emission Buildings).

4. Вплив на життєвий цикл будівлі.

NZEB враховують екологічність матеріалів, енерговитрати на будівництво, реконструкцію та утилізацію.

Це дозволяє зменшити вуглецевий слід будівлі на всіх етапах її існування.

5. Системний ефект.

Масове впровадження NZEB сприяє трансформації будівельного ринку, розвитку технологій, підвищенню кваліфікації фахівців.

Це створює ланцюгову реакцію декарбонізації в суміжних секторах: енергетика, матеріалознавство, логістика.

Український контекст.

Впровадження NZEB в Україні з 2025 року [40] є частиною стратегії енергонезалежності та декарбонізації.

За оцінками [54], NZEB дозволяють зменшити залежність від імпортного газу, особливо в громадських будівлях.

Будівлі NZEB відіграють стратегічну роль у процесі євроінтеграції України, оскільки їх впровадження є прямою вимогою гармонізації з європейським законодавством у сфері енергоефективності, кліматичної політики та сталого розвитку, саме:

1. Виконання зобов'язань за Угодою про асоціацію з ЄС.

Україна зобов'язалася імплементувати положення Директиви [31] про енергетичні характеристики будівель.

NZEB є ключовим елементом цієї директиви, а їх впровадження – частина національного плану дій з енергоефективності.

2. Гармонізація нормативної бази.

Прийняття стандартів [7, 28, 35 – 38] та інших у формі ДСТУ забезпечує технічну сумісність з ЄС.

Впровадження [3] та енергетичної сертифікації відповідає європейським підходам до оцінки будівель.

3. Доступ до фінансування та технічної допомоги ЄС.

NZEB є пріоритетом для програм ENI, LIFE, Horizon Europe, ЄІБ, ЄБРР, що фінансують енергоефективні проєкти.

Впровадження NZEB відкриває доступ до зелених облігацій, фондів декарбонізації та технічної підтримки.

4. Сприяння виконанню Європейського зеленого курсу.

NZEB відповідають цілям кліматичної нейтральності, зниження викидів CO₂, сталого будівництва.

Україна інтегрується в Renovation Wave, Fit for 55, Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) через декарбонізацію будівельного сектору.

5. Підвищення інституційної спроможності.

Розвиток системи енергетичної сертифікації, підготовки енергоаудиторів, BIM-моделювання – це частина адаптації до європейських практик.

NZEB стимулює реформу будівельних норм, цифровізацію проєктування, інтеграцію екологічних критеріїв.

У Європі реалізовано сотні NZEB-проєктів, серед яких особливо показовими є школа в Данії та офісні будівлі в Німеччині. Вони демонструють практичне втілення принципів енергоефективності, ВДЕ та сталого будівництва.

Школа в Данії – Hellerup School, Копенгаген.

Тип будівлі: початкова школа, реконструйована за стандартом NZEB.

Пасивні рішення:

- високоефективна теплоізоляція та герметичність оболонки;
- орієнтація класів на південь для максимального денного освітлення.

Активні системи:

- вентиляція з рекуперацією тепла (ККД > 80 %);
- BMS для керування освітленням, температурою та вентиляцією.

ВДЕ:

- сонячні панелі на даху (покривають до 60 % потреби в електроенергії);
- геотермальні зонди для опалення.

Результат: річне споживання первинної енергії < 40 kWh/(m²·рік), викиди CO₂ знижено на 70 % порівняно з типовою школою.

Офісні будівлі в Німеччині – EDGE Grand Central Berlin.

Тип будівлі: комерційний офіс, сертифікований за стандартами NZEB і LEED Platinum.

Пасивні рішення:

- фасад з потрійним склінням і автоматичними жалюзі;
- високий коефіцієнт теплового опору огорожувальних конструкцій.

Активні системи:

- теплові насоси «повітря-вода» з сезонним накопиченням;
- розумна система управління BMS з датчиками присутності, CO₂, освітленості.

ВДЕ:

- фотовольтаїка на даху та фасаді (≈ 200 МВт · год/рік);
- контракти на постачання зеленої енергії з локальних джерел.

Результат: енергоспоживання < 55 kWh/(m² · рік), нульові викиди CO₂ під час експлуатації.

В Україні також реалізуються пілотні проекти NZEB, зокрема реконструкція дитячих садків і муніципальних будівель, що демонструють практичне впровадження стандартів майже нульового енергоспоживання в контексті євроінтеграції та декарбонізації.

Дитячі садки, відповідно до даних [55]:

1. Львівська область – реконструкція дитсадка з утепленням фасаду, заміною вікон, встановленням рекупераційної вентиляції та сонячних колекторів для ГВП.

2. Житомирська область – проєкт за підтримки GIZ: встановлено тепловий насос, BMS, LED-освітлення, досягнуто класу енергоефективності «А».

3. Київська область – пілотний проєкт у межах програми «Енергоефективна школа»: інтеграція фотовольтаїки, автоматичного освітлення, утеплення згідно з [3].

Муніципальні будівлі, відповідно до даних [56]:

1. ЦНАП у Славутичі – реконструкція з досягненням NZEB: фасад з високим опором теплопередачі, рекуперація, сонячні панелі, сертифікація за ISO 52000.

2. Міська рада в Кам'янці-Бузькій – модернізація систем опалення, вентиляції, освітлення, встановлення BMS, теплового насоса та фотовольтаїки.

3. Бібліотека в Івано-Франківську – NZEB-реконструкція з геотермальним опаленням, утепленням, LED-освітленням, енергетичним моніторингом.

Пасивні та активні заходи, які використовувались при реконструкції дозволили:

- знизити енергоспоживання до 40 – 60 kWh/(м² · рік);
- скоротити витрати на комунальні послуги до 60 %;
- зменшити викиди CO₂ на 50–80 % порівняно з довоєнними будівлями;
- підвищити комфорт та якість середовища для дітей і працівників.

Питання для самоконтролю

1. Що означає термін NZEB і які основні характеристики таких будівель?
2. Які типи енергії враховуються при розрахунку енергетичного балансу NZEB?
3. Чим відрізняється NZEB від ZEB (Zero Emission Building)?
4. Які компоненти будівлі найбільше впливають на досягнення нульового енергоспоживання?
5. Які положення містить Директива 2010/31/ЄС щодо NZEB?
6. Які стандарти ISO та EN застосовуються для оцінки енергетичних характеристик NZEB?
7. Які національні нормативи регламентують NZEB в Україні?
8. Як підходи до NZEB у США (ASHRAE, IECC, LEED) відрізняються від європейських?
9. Які основні переваги NZEB для користувачів, довкілля та економіки?
10. Які технічні, фінансові та нормативні бар'єри існують при впровадженні NZEB в Україні?

11 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (BMS) У NZEB

11.1 Призначення та функціональність Building Management Systems

Building Management System (BMS) – це інтегрована автоматизована система, призначена для централізованого управління, моніторингу та оптимізації інженерних систем будівлі, таких як опалення, вентиляція, кондиціонування повітря, освітлення, енергопостачання, водопостачання, безпека та інші. У контексті будівель з майже нульовим енергоспоживанням (NZEB) BMS відіграє ключову роль у досягненні високої енергоефективності та сталого функціонування. Вона забезпечує динамічне регулювання параметрів мікроклімату, адаптацію до змін зовнішніх умов, інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії, а також збір і аналіз даних для ухвалення рішень щодо оптимізації споживання ресурсів. Завдяки BMS NZEB може досягати балансу між комфортом користувачів, мінімізацією енергетичних витрат і відповідністю сучасним екологічним стандартам. Система також підтримує функції прогностичного управління, автоматичного реагування на аварійні ситуації та формування звітності для енергоаудиту, що робить її невід’ємною складовою інтелектуальної інфраструктури сучасних енергоефективних будівель.

Енергоефективність, автоматизація та сталий розвиток утворюють взаємопов’язану тріаду, де автоматизовані системи управління (зокрема BMS) виступають інструментом досягнення енергоефективності, яка, своєю чергою, є фундаментом сталого розвитку в будівельному секторі.

В умовах посилення глобальних викликів, пов’язаних зі зміною клімату, енергетичною нестабільністю та зростанням антропогенного навантаження на довкілля, концепція сталого розвитку ґрунтується на системній інтеграції економічної доцільності, екологічної безпечності та соціальної відповідальності. Енергоефективність у цьому контексті розглядається як базовий компонент, оскільки вона забезпечує зменшення обсягів використання природних ресурсів, скорочення викидів парникових газів і зниження експлуатаційних витрат. Автоматизація, у свою чергу, виступає інструментом реалізації інтелектуального управління технологічними процесами, що дає змогу досягати енергоефективності як на рівні окремих систем, так і на масштабі будівельного комплексу або інфраструктури.

Інтелектуальні системи управління, зокрема системи типу BMS, забезпечують автоматизацію шляхом безперервного моніторингу, аналітичної обробки даних та адаптивного регулювання параметрів мікроклімату, освітлення, вентиляції та споживання енергоресурсів. Такий підхід дає змогу оперативно реагувати на зміну зовнішніх умов, поведінкових характеристик

користувачів та варіативність тарифної політики, забезпечуючи оптимальне функціонування будівлі з мінімальними втратами енергії та ресурсів. Таким чином, автоматизація виступає каталізатором підвищення енергоефективності, а рівень енергоефективності – індикатором досягнення критеріїв сталого розвитку.

У контексті будівель класу NZEB цей взаємозв'язок набуває особливої актуальності. Саме завдяки застосуванню автоматизованих систем управління стає можливим комплексне поєднання відновлюваних джерел енергії, реалізація концепції гнучкого енергетичного навантаження, забезпечення часткової або повної енергетичної автономності та відповідності чинним екологічним стандартам. У підсумку формується нова парадигма сталого будівництва, у межах якої технологічні рішення спрямовані на досягнення балансу між комфортом, ресурсною ефективністю та екологічною відповідальністю.

Однією з провідних функцій BMS є оптимізація енергоспоживання. Вона реалізується шляхом адаптивного керування інженерними системами на основі аналізу реальних потреб, поточних зовнішніх умов та запрограмованих сценаріїв функціонування. Система опрацьовує дані з численних сенсорів (температура, рівень освітленості, присутність людей, концентрація CO₂ тощо) та автоматично коригує режими роботи обладнання: зменшує інтенсивність вентиляції за відсутності людей, використовує природне освітлення, активує режими нічного охолодження, інтегрує відновлювані джерела енергії. Такий принцип роботи дозволяє знизити енергетичні втрати, скоротити експлуатаційні витрати та забезпечити відповідність вимогам сучасних стандартів енергоефективності, зокрема для будівель класу NZEB.

Забезпечення безпеки та надійності є ще однією фундаментальною функцією BMS. Система інтегрує підсистеми контролю доступу, відеоспостереження, пожежної сигналізації, аварійного оповіщення та резервного живлення, що дозволяє оперативно виявляти загрози та запобігати критичним ситуаціям. BMS також виконує функції діагностики, прогнозування несправностей і технічного моніторингу, підвищуючи загальну надійність інженерної інфраструктури.

Крім того, система підтримує процеси експлуатації та технічного обслуговування будівлі, здійснюючи автоматизований збір даних, формування звітності, нагадування про регламентні роботи та інтеграцію з системами управління технічними ресурсами. Це сприяє оптимізації графіків обслуговування, зменшенню витрат на ремонт та продовженню терміну експлуатації обладнання.

Система керування будівлею – це комплексна платформа, що об'єднує моніторинг, автоматизацію та аналітику для ефективної експлуатації будівлі. Її функціональність охоплює не лише контроль мікроклімату, а й взаємодію з іншими цифровими системами, енергоменеджмент, безпеку та оптимізацію ресурсів.

BMS також підтримує інтеграцію з IoT-пристроями, BIM-моделями будівель, ERP-системами та хмарними сервісами, що забезпечує централізоване управління навіть на рівні кількох об'єктів. Для підвищення безпеки система включає модулі кіберзахисту: контроль доступу до даних, шифрування, резервне копіювання та захист від несанкціонованого втручання.

Звіти та візуалізації формуються для операторів, технічних спеціалістів і керівників, щоб допомогти у прийнятті рішень та оптимізації витрат. У разі аварійних ситуацій система активує сценарії реагування – сповіщує персонал, вмикає резервні джерела живлення, блокує небезпечні зони або запускає план евакуації.

Складові BMS формують технічну платформу для інтегрованого, енергоефективного та безпечного управління будівлею. Кожен компонент відіграє специфічну роль, а їх взаємодія забезпечує стабільну роботу систем у режимі реального часу.

1. Контролери (PLC, DDC, ECU):

- PLC (Programmable Logic Controllers) – промислові контролери, що керують складними технологічними процесами та відзначаються високою надійністю;
- DDC (Direct Digital Control) – контролери прямої дії, що часто використовуються в HVAC-системах для локального регулювання температури, вентиляції та тиску;
- ECU (Edge Control Units) – сучасні контролери з можливістю попередньої обробки даних та роботи з IoT-пристроями;
- вони реалізують алгоритми регулювання (PID, Fuzzy Logic), логіку сценаріїв, реагують на події та передають дані на сервер або SCADA.

2. Сенсори та виконавчі механізми.

2.1 Сенсори (датчики):

- температура, вологість, CO₂, освітленість, рух/присутність, тиск, рівень шуму, витрата води та електроенергії;
- сучасні IoT-сенсори можуть працювати бездротово (LoRaWAN, Zigbee).

2.2 Виконавчі пристрої:

- електричні приводи, клапани, заслінки, реле, інвертори, димери освітлення;

- забезпечують фізичне виконання команд контролера (змінюють потоки повітря, води, електроенергії).

3. Комунікаційні протоколи. Забезпечують взаємодію між усіма елементами системи:

- BACnet – найбільш поширений відкритий протокол для будівельної автоматизації;
- Modbus (RTU/TCP) – простий і надійний протокол для промислових пристроїв;
- KNX, LonWorks, M-Bus, OPC UA, MQTT – використовуються для освітлення, лічильників, IoT, хмар і промислових систем;
- використання стандартів підвищує сумісність між обладнанням різних виробників та дозволяє будувати масштабовані системи.

4. Людсько-машинні інтерфейси (HMI) та SCADA:

- HMI-панелі забезпечують локальний доступ до керування – часто встановлюються у котельних, вентиляційних камерах або диспетчерських;
- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):
 - дозволяє здійснювати нарядний контроль, візуалізацію будівлі у вигляді 2D/3D-схем або BIM-моделей;
 - підтримує дистанційне керування, тривожні сповіщення, налаштування сценаріїв роботи та інтеграцію з мобільними додатками.

5. Сервери, бази даних та аналітика:

- зберігають історичні дані, журнали тривоги, сценарії, тренди споживання;
- підтримують Big Data, машинне навчання, прогнозне обслуговування (Predictive Maintenance) ;
- дають змогу проводити енергоаудит, аналіз KPI, сертифікацію за LEED/BREEAM;
- можуть розташовуватись локально (On-premise) або у хмарі (Cloud BMS).

6. Кібербезпека та інфраструктура:

- система включає захист від несанкціонованого доступу, шифрування даних, VPN, багаторівневу авторизацію, резервне копіювання;
- розмежування ролей: оператор, технік, адміністратор, енергоменеджер;
- важливо для критичної інфраструктури (аеропорти, лікарні, дата-центри).

Інтеграція BMS у NZEB є ключовим елементом, що забезпечує узгоджену роботу всіх енергетичних систем, стабільність мікроклімату та досягнення високої енергоефективності.

1. Роль BMS у NZEB. BMS виступає як «енергетичний мозок» будівлі, що:

- координує роботу всіх технічних систем;
- забезпечує безперервний моніторинг параметрів середовища та енергоспоживання;
- адаптує режими роботи обладнання до змін попиту, погодних умов та присутності людей;
- забезпечує відповідність будівлі стандартам NZEB, LEED, BREEAM тощо.

2. Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії. BMS взаємодіє з:

- сонячними колекторами (для підігріву води та теплопостачання);
- фотоелектричними панелями (PV) (генерація електричної енергії);
- тепловими насосами (перетворення низькопотенційної енергії з ґрунту, повітря або води), вітровими турбінами, геотермальними системами – за можливості.

Система в режимі реального часу порівнює поточну генерацію із потребами будівлі та оптимізує використання енергії, спрямовуючи надлишки на зберігання або у мережу.

3. Управління накопиченням енергії та мікромережею. BMS контролює:

- акумуляторні батареї, буферні ємності, теплові акумулятори;
- локальну мікромережу (microgrid), що може працювати як автономно, так і в синхронізації зі Smart Grid;
- баланс між генерацією, споживанням і зберіганням, уникаючи перевантажень та втрат енергії;
- сценарії автономної роботи у разі відключення від зовнішньої мережі.

4. Гнучкість енергоспоживання та Smart Grid. Завдяки Demand Response (DR) та функції гнучкого навантаження BMS:

- змінює режими роботи обладнання відповідно до тарифів на електроенергію (день / ніч, пікові / непікові години);
- мінімізує пікове навантаження на мережу;
- взаємодіє зі смарт-мережами, забезпечуючи двосторонній обмін даними та енергією.

5. Прогнозування та аналітика. BMS використовує алгоритми прогнозування на основі:

- метеорологічних даних;
- історичних даних про споживання енергії;
- поведінки користувачів та графіків використання приміщень.

Це дозволяє:

- активно управляти системами вентиляції, опалення, освітлення;

- планувати роботу відновлюваних джерел та генераторів;
- впроваджувати predictive maintenance – прогнозне технічне обслуговування.

6. Переваги інтеграції BMS у NZEB:

- мінімізація енергоспоживання та викидів CO₂;
- автономність та енергетична незалежність;
- комфортні умови для користувачів при мінімумі витрат;
- сталий розвиток та відповідність «зеленим» стандартам;
- готовність до майбутніх технологій: Smart City, IoT, V2G (Vehicle-to-Grid).

Функціональні сценарії роботи BMS демонструють її здатність до адаптивного управління інженерними системами будівлі на основі реальних умов та потреб користувачів.

11.2 Автоматизація опалення, вентиляції, освітлення, ГВП

BMS в автоматизації систем опалення.

Building Management System відіграє центральну роль у керуванні системами опалення, забезпечуючи ефективне, адаптивне та енергозберігаюче функціонування теплових процесів. Її впровадження є особливо важливим для будівель з майже нульовим енергоспоживанням (NZEB), де необхідно поєднати комфорт, мінімальні втрати енергії та використання відновлюваних джерел.

1. Автоматичне регулювання температури:

- BMS безперервно отримує дані з температурних датчиків, встановлених у різних зонах будівлі;
- Порівнюючи ці дані із заданими температурними уставками та графіками використання приміщень, система:
 - підвищує або знижує подачу тепла;
 - вмикає або вимикає опалювальні прилади;
 - регулює температуру теплоносія.

Результат: уникнення перегріву, стабільний мікроклімат і економія енергії.

2. Часові графіки та сценарії використання:

- BMS враховує розклад експлуатації будівлі:
 - зниження температури вночі або у вихідні дні;
 - попередній підігрів приміщень перед початком робочого дня;
 - зниження потужності під час відсутності людей.

Це дозволяє синхронізувати опалення з реальним графіком роботи будівлі.

3. Інтеграція з джерелами тепла. BMS керує роботою різних теплогенераторів, забезпечуючи їх оптимальну взаємодію. Функції BMS у джерелах тепла наведено у таблиці 11.1.

4. Погодозалежне регулювання:

- температура теплоносія автоматично коригується залежно від температури зовнішнього повітря;
- у холодну погоду вона підвищується, в міжсезоння – знижується;
- це забезпечує комфорт без перевитрат та зменшує навантаження на обладнання.

5. Зональне управління теплом:

- кожна зона або приміщення може мати індивідуальні температурні режими;
- у кімнатах, де відсутні люди або відбувається мінімальна активність, температура знижується;
- У робочих або житлових зонах підтримується комфортний рівень.

Переваги: економія до 20–30 % енергії, гнучкість та підвищення комфорту.

6. Значення для NZEB. У будівлях категорії NZEB ефективність системи опалення напряму впливає на досягнення майже нульового енергоспоживання. Завдяки BMS:

- мінімізуються теплові втрати;
- поєднується робота відновлюваних та традиційних джерел енергії;
- забезпечується раціональне використання енергоресурсів;
- виконується відповідність сучасним екостандартам та європейським нормам (EPBD, EN ISO 52120).

Таблиця 11.1 – Функції BMS у джерелах тепла

Джерела тепла	Функції BMS
Котли (газові, електричні, твердопаливні)	Запуск, модуляція потужності, контроль ККД
Теплові насоси	Вибір режиму, перемикання між обігрівом / охолодженням
Сонячні колектори та геліосистеми	Використання сонячного тепла перед увімкненням основних джерел
Буферні ємності та теплові акумулятори	Накопичення та розподіл надлишкового тепла

BMS в автоматизації систем вентиляції.

Building Management System забезпечує інтелектуальне управління вентиляцією, створюючи здоровий та комфортний мікроклімат у приміщеннях

із мінімальними енерговитратами. Це є ключовим елементом для досягнення стандартів NZEB.

1. Контроль якості повітря в реальному часі. BMS постійно аналізує параметри внутрішнього повітря за допомогою мережі сенсорів:

- рівень CO₂ (викиди від людей та обладнання);
- відносна вологість;
- VOC (леткі органічні сполуки) та інші забруднювачі;
- температура та тиск повітря.

При перевищенні встановлених граничних значень система автоматично змінює інтенсивність вентиляції або активує додаткові сценарії очищення.

2. Інтелектуальне керування вентиляційним обладнанням. На основі сенсорних даних BMS:

- регулює швидкість вентиляторів припливу та витяжки;
- змінює об'єм повітрообміну залежно від поточних потреб;
- управляє повітряними заслінками та клапанами для балансування потоків;
- підтримує задану кратність повітрообміну у різних зонах будівлі.

Результат: оптимальне споживання електроенергії та стабільна якість повітря.

3. Рекуперація тепла та енергоефективність. BMS інтегрується з системами рекуперації, забезпечуючи функції, які наведені у таблиці 11.2.

Таблиця 11.2 – Функції BMS у системах рекуперації

Компонент	Функції в системі
Рекуператори (пластинчасті, роторні)	Передача тепла від витяжного повітря до припливного
Підігрівачі / охолоджувачі повітря	Автоматичне вмикання при недостатності рекуперації
Буферні ємності / теплові насоси	Використання відновлюваних джерел для вентиляції

Такий підхід дозволяє знизити до 50 % тепловтрат під час вентиляції.

4. Керування фільтрами та технічним обслуговуванням:

- моніторинг ступеня забруднення фільтрів (різниця тиску до / після фільтра);
- сповіщення про необхідність заміни або очищення;
- контроль відповідності санітарно-гігієнічним нормам відповідно до [41, 42].

5. Адаптивні режими залежно від присутності людей. BMS враховує:

- присутність людей (датчики руху, CO₂, системи доступу);
- час доби та розклад роботи будівлі;
- призначення приміщень (офіси, спортзали, лабораторії, житлові зони).

Приклади:

Вночі чи у вихідні – перемикання в режим мінімального повітрообміну. При підвищенні CO₂ > 800 ppm – інтенсивне провітрювання. У критичних приміщеннях (лабораторії, медичні заклади) – забезпечення постійної фільтрації та стерильності.

6. Важливість для NZEB. Для будівель з майже нульовим енергоспоживанням BMS у вентиляції забезпечує:

- мінімізацію тепловтрат без шкоди для якості повітря;
- інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії;
- відповідність європейським нормам (EPBD, EN ISO 52120, сертифікація BREEAM/LEED);

- підвищення комфорту, здоров'я та продуктивності споживачів.

BMS в автоматизації систем освітлення.

Building Management System в автоматизації освітлення забезпечує інтелектуальне, енергоефективне та адаптивне управління світловими системами будівлі, орієнтоване на комфорт користувачів і мінімізацію енергоспоживання. У сучасних енергоефективних спорудах, зокрема NZEB, система освітлення є невід'ємною складовою загальної стратегії керування енергетичними потоками.

1. Основні принципи роботи системи. BMS здійснює централізований моніторинг і керування освітленням на основі даних від сенсорів:

- датчики освітленості вимірюють рівень природного світла, дозволяючи системі адаптувати штучне освітлення відповідно до поточних умов;
- датчики руху та присутності виявляють перебування людей у приміщенні, активуючи або деактивуючи освітлення лише в зайнятих зонах;
- часові графіки регулюють освітлення залежно від розкладу експлуатації будівлі (робочий день, ніч, вихідні, святкові дні).

Завдяки інтеграції цих компонентів система автоматично підтримує необхідний рівень освітленості відповідно до норм [17] та міжнародних стандартів [43].

2. Інтелектуальні режими керування. BMS підтримує різні сценарії освітлення, що дозволяють адаптувати роботу системи до функціонального призначення приміщень:

- робочий режим – підтримання нормативного рівня освітленості;

- енергозберігаючий режим – часткове вимкнення світильників у малозайнятих зонах;
- нічний режим – зниження яскравості або активація лише евакуаційного освітлення;
- сценарії подій – налаштування світла для конференцій, презентацій, відпочинку тощо.

Таке сценарне керування підвищує функціональність будівлі та дозволяє досягти до 40 % економії електроенергії порівняно з традиційними системами освітлення.

3. Технологія димування та зональне управління.

Димування (dimming) – регулювання яскравості світильників, що дозволяє плавно змінювати рівень освітленості відповідно до потреб користувачів або рівня природного світла.

Зональне управління забезпечує індивідуальне керування освітленням у кожній зоні будівлі – офісах, коридорах, залах, технічних приміщеннях. Це підвищує енергоефективність і створює персоналізований комфорт.

4. Технологія «Daylight Harvesting» (використання денного світла).

Однією з ключових функцій BMS є daylight harvesting – автоматичне використання природного освітлення для зменшення навантаження на штучні джерела світла. Система вимірює інтенсивність денного світла, що потрапляє через вікна або світлові ліхтарі, та:

- зменшує яскравість світильників у разі достатнього природного освітлення;
- повністю вимикає частину освітлення, коли природне світло перевищує норматив;
- забезпечує плавний перехід між природним і штучним освітленням без різких змін рівня яскравості.

Ця технологія не лише знижує енергоспоживання, але й покращує візуальний комфорт користувачів.

5. Інтеграція з іншими системами будівлі. BMS синхронізує роботу освітлення з іншими інженерними системами – опаленням, вентиляцією, кондиціонуванням (HVAC) та системою безпеки. Наприклад:

- при активації сигналізації освітлення може переходити у режим евакуації;
- при відсутності людей у зоні система вимикає не лише світло, а й скорочує подачу повітря або тепла;
- у режимі «нічної охорони» підтримується мінімальний рівень освітлення для камер відеоспостереження.

6. Значення для будівель NZEB. В умовах будівель з майже нульовим енергоспоживанням, автоматизація освітлення через BMS забезпечує:

- раціональне використання електроенергії та зменшення пікових навантажень;
- підвищення енергетичного класу будівлі;
- забезпечення сталого, комфортного та безпечного середовища;
- інтеграцію з системами відновлюваної енергії (PV) для живлення освітлення.

BMS в автоматизації систем гарячого водопостачання.

BMS в управлінні системами гарячого водопостачання, забезпечує енергоефективність, безперебійну роботу, гігієну та безпеку подачі гарячої води у будівлі. Завдяки інтегрованому підходу система дозволяє оптимізувати виробництво, розподіл і споживання теплової енергії для потреб ГВП.

1. Керування температурою та циркуляцією. Основною функцією BMS є підтримання стабільної температури та ефективної циркуляції Гарячої води, що досягається шляхом:

- регулювання роботи циркуляційних насосів;
- контролю температури води у трубопроводах, бойлерах, буферних ємностях;
- управління змішувальними клапанами та термостатичними регуляторами;
- корекції температурних режимів відповідно до заданих уставок і потреб користувачів.

Це дозволяє уникати перегріву, зменшувати теплові втрати і гарантувати швидку подачу гарячої води в усіх точках розбору без необхідності тривалого очікування.

2. Інтеграція з джерелами тепла. BMS забезпечує координацію роботи різних джерел теплової енергії, таких як:

- сонячні колектори;
- електричні та газові бойлери;
- теплові насоси;
- централізовані теплові мережі.

Система автоматично перемикається між джерелами або працює в комбінованому режимі, враховуючи тарифи на енергію, поточне навантаження, погодні умови та наявність відновлюваних джерел. Це забезпечує максимальну енергоефективність і зменшення операційних витрат.

3. Графіки роботи та оптимізація навантаження. BMS аналізує споживання гарячої води в реальному часі та формує динамічні графіки подачі ГВП:

- в години пікового навантаження підвищується продуктивність теплогенераторів і насосів;
- у нічний час, вихідні або періоди малої активності система переходить у режим енергозбереження;
- можливе прогнозування споживання на основі історичних даних та поведінки користувачів.

Такий підхід сприяє зменшенню втрат енергії та продовженню терміну експлуатації обладнання.

4. Безпека та гігієна (антилегіонельні режими). Одним із критично важливих аспектів є забезпечення санітарної безпеки системи. BMS реалізує:

- антилегіонельні цикли – періодичне підвищення температури води до 60–70 °C для знищення бактерій *Legionella pneumophila*;
- контроль часу перебування води в трубопроводах, щоб уникнути застою;
- автоматичну або ручну промивку контурів;
- формування записів і звітів для санітарно-гігієнічного аудиту.

5. Значення в умовах NZEB. У будівлях з майже нульовим енергоспоживанням (NZEB) автоматизація ГВП через BMS має особливе значення, оскільки дозволяє:

- мінімізувати використання невідновлюваних енергоресурсів;
- інтегрувати сонячну теплову енергію та відновлювані системи;
- забезпечити баланс між комфортом, енергоефективністю та безпекою;
- виконувати вимоги сучасних екологічних стандартів і сертифікацій (LEED, BREEAM, DGNB).

Технічна реалізація BMS.

Технічна реалізація BMS ґрунтується на взаємодії апаратних компонентів, мережевих протоколів зв'язку та програмного забезпечення, що разом забезпечують комплексне управління інженерними системами будівлі, збір даних і ухвалення рішень у режимі реального часу.

1. Сенсори, виконавчі пристрої та контролери. Сенсори здійснюють безперервний моніторинг параметрів мікроклімату та технічного стану систем:

- температура, вологість, CO₂, VOC, освітленість;
- тиск у трубопроводах, витрати теплоносія, рівень води;
- рух, присутність людей, відкриття дверей / вікон.

Виконавчі пристрої реалізують команди, сформовані системою:

- електричні приводи клапанів, дроселів, заслінок;
- реле, контактори, частотні перетворювачі насосів і вентиляторів;
- приводи жалюзі, світлодіодні світильники, нагрівальні елементи.

Контролери (PLC, DDC) є ядром локального керування:

- здійснюють обробку сигналів від сенсорів;
- виконують алгоритми регулювання (PID, логічне керування, таймери);
- підтримують автономну роботу у разі втрати зв'язку з сервером;
- передають дані на центральний сервер BMS.

2. Комунікаційні протоколи та мережі.

Надійність і масштабованість BMS досягається завдяки використанню стандартизованих протоколів обміну даними. Протоколи обміну даними наведені у таблиці 11.3. Ці протоколи забезпечують інтероперабельність⁶ між обладнанням різних виробників, масштабування системи та гнучку інтеграцію з вже існуючою інфраструктурою.

3. Програмна частина: SCADA та HMI

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – головний інструмент диспетчеризації та аналітики. Вона забезпечує:

- збір і архівацію даних від усіх контролерів;
- відображення у вигляді графіків, трендів, 3D-планів будівлі;
- автоматичне формування звітів, журналів подій та аварій.

HMI (Human-Machine Interface) – локальні або вебінтерфейси для оператора:

- дозволяють змінювати уставки, запускати сценарії, виконувати діагностику;
- передають аварійні повідомлення на екрани, мобільні додатки, e-mail або SMS;
- іноді інтегруються із системами доступу та безпеки (наприклад, через OPC UA або MQTT).

Таблиця 11.3 – Стандартизовані протоколи обміну даними

Протокол	Сфера застосування	Особливості
BACnet	HVAC, освітлення, безпека	Стандарт ASHRAE 135; підтримка об'єктної моделі, автоматичне виявлення пристроїв
Modbus (RTU/TCP)	Датчики, лічильники, промислове обладнання	Простота реалізації; робота по RS-485 або Ethernet
KNX	Освітлення, штори, клімат-контроль	Європейський стандарт, підтримка шинної та IP-структури
LonWorks, M-Bus, OPC UA	Спеціалізовані системи	Використовуються у лічильниках, енергомоніторингу та промисловій автоматизації

⁶ Інтероперабельність – це здатність різних пристроїв, систем або програмного забезпечення працювати разом, обмінюватися даними та коректно взаємодіяти між собою, навіть якщо вони створені різними виробниками.

Нижче наведено приклади функціональних сценаріїв, які демонструють, як BMS адаптується до умов реальної експлуатації будівлі:

1. Зменшення вентиляції при низькій концентрації CO₂.

Умова: рівень CO₂ у приміщенні опускається нижче заданого значення (наприклад, < 600 ppm).

Дія: система автоматично знижує подачу свіжого повітря або переводить вентиляцію в енергозберігаючий режим.

Результат: менше споживання електроенергії вентиляційним обладнанням при збереженні належної якості повітря.

2. Автоматичне регулювання освітлення залежно від денного світла.

Умова: рівень природного освітлення змінюється протягом дня (хмарність, сутінки тощо).

Дія: датчики освітленості передають дані до BMS, яка коригує яскравість світильників або вимикає їх за потреби (димування).

Результат: нормативна освітленість з мінімальним використанням електроенергії (технологія daylight harvesting).

3. Нічне охолодження шляхом природної вентиляції.

Умова: нічна температура зовні нижча, ніж у приміщенні, та погодні умови дозволяють провітрювання.

Дія: система відкриває автоматизовані фрамуги або вмикає вентиляцію без нагрівання, використовуючи холодне зовнішнє повітря.

Результат: зменшення навантаження на кондиціонування вдень та економія енергії.

4. Оптимізація роботи опалення у вихідні дні.

Умова: будівля або окремі її зони не експлуатуються у вихідні.

Дія: BMS знижує температуру до економного рівня (наприклад, з 21 °C до 16 °C), а перед початком робочого дня – поступово підвищує її до комфортної.

Результат: скорочення витрат на опалення без негативного впливу на умови перебування людей.

Ці приклади відображають, як BMS забезпечує енергоощадне, гнучке та ситуаційно орієнтоване управління інженерними системами будівель, особливо актуальне для концепції NZEB.

11.3 Взаємодія з датчиками температури, CO₂, присутності

Сенсори – це основа інтелектуального реагування BMS, що дозволяє будівлі функціонувати як адаптивна, енергоефективна та комфортна система, повністю узгоджена з вимогами NZEB.

Температурні датчики – дозволяють точно регулювати системи опалення, охолодження та гарячого водопостачання, запобігаючи перегріву або надмірному охолодженню приміщень.

Датчики CO₂ – контролюють якість повітря та активують вентиляцію лише тоді, коли це необхідно, зменшуючи витрати енергії.

Датчики освітленості – дають змогу реалізувати daylight harvesting: знижувати яскравість або вимикати штучне освітлення, коли природного світла достатньо.

Датчики присутності – вмикають освітлення, вентиляцію чи опалення лише у зайнятих зонах, запобігаючи марному використанню енергії.

Датчики вологості, тиску та витрат – оптимізують роботу вентиляційних, водяних та теплових систем.

Сенсори в контексті NZEB і адаптивного управління:

1. Відповідність принципам NZEB: будівлі з майже нульовим енергоспоживанням потребують точного контролю ресурсів. Сенсори дозволяють подавати тепло, повітря, світло та воду саме тоді й у тій кількості, коли та скільки це потрібно.

2. Адаптивне керування: на основі поточних даних BMS автоматично змінює режими роботи обладнання, враховуючи присутність людей, час доби, погоду та тарифи на енергію.

3. Прогнозне управління: зібрані сенсорами дані накопичуються, аналізуються та використовуються для прогнозування навантажень, поведінки користувачів та погодних змін.

4. Інтеграція з мікромережею: сенсори допомагають збалансувати виробництво, споживання та накопичення енергії в будівлі.

5. Контроль енергоефективності: сенсорні дані дозволяють перевіряти ефективність роботи систем, формувати звіти та забезпечувати відповідність стандартам (наприклад, [35, 39]).

Температурні сенсори – це один із ключових елементів Building Management System (BMS), які забезпечують точний контроль теплових процесів у будівлі. Вони дають змогу системі в режимі реального часу регулювати опалення, вентиляцію, кондиціонування та гаряче водопостачання, підтримуючи комфорт і енергоефективність.

Типи температурних датчиків (сенсорів) наведені у таблиці 11.4.

Місця встановлення температурних датчиків:

1. У приміщеннях – контроль температури повітря у зонах перебування людей (офіси, аудиторії, житлові кімнати).

2. На трубопроводах – вимірювання температури теплоносія в системах опалення або гарячого водопостачання.

3. У теплообмінниках, бойлерах, буферних ємностях – контроль процесів нагріву, акумулювання та передачі тепла.

4. Зовні будівлі (фасад, дах) – для реалізації погодозалежного регулювання.

Застосування температурних сенсорів у BMS.

1. Опалення: підтримання заданої температури, зональне керування, регулювання подачі тепла.

2. Гаряче водопостачання (ГВП): контроль температури у бойлерах і циркуляційних контурах, виконання антилегіонельних циклів.

3. Кондиціонування: керування охолодженням, контроль температури припливного повітря, балансування між зонами.

Таблиця 11.4 – Типи температурних датчиків

Тип сенсора	Принцип дії	Особливості використання
NTC (Negative Temperature Coefficient)	Опір зменшується зі зростанням температури	Дешеві, компактні, використовуються в побутових системах
Pt100 (платиновий терморезистор)	Лінійна зміна опору з температурою	Висока точність, стабільність, застосовуються в промислових BMS
Цифрові сенсори (наприклад, DS18B20)	Передають дані у цифровому форматі	Просте підключення, інтеграція з мікроконтролерами, менш чутливі до шумів

Погодозалежне керування та температурні графіки.

Погодозалежне регулювання: температура теплоносія автоматично коригується залежно від зовнішньої температури, що запобігає перегріву в міжсезоння та знижує споживання енергії.

Добові та тижневі графіки: BMS задає температурні сценарії – зниження температури вночі чи у вихідні та попереднє нагрівання перед початком робочого дня.

Датчики вуглекислого газу є однією з найважливіших складових систем розумного управління будівлею. Вони забезпечують постійний контроль якості повітря та дозволяють BMS автоматично регулювати вентиляцію, підтримуючи здоровий мікроклімат і раціональне споживання енергії.

Тип сенсора, принцип дії, особливості застосування датчиків наведено у таблиці 11.5.

Таблиця 11.5 – Принцип роботи датчиків CO₂

Тип сенсора	Принцип роботи	Особливості застосування
Інфрачервоні (NDIR)	Вимірюють поглинання ІЧ-випромінювання молекулами CO ₂	Висока точність, стабільність, довговічність
Електрохімічні	Реакція CO ₂ з електродами → зміна електричного сигналу	Компактні, дешевші, менш точні

Роль CO₂ як індикатора якості повітря.

CO₂ є показником інтенсивності повітрообміну та рівня присутності людей у приміщенні.

Висока концентрація CO₂ → недостатня вентиляція, накопичення продуктів дихання → BMS збільшує подачу свіжого повітря.

Низька концентрація CO₂ → приміщення порожнє або добре вентильоване → система знижує інтенсивність вентиляції або переходить у економний режим.

Таке динамічне керування дозволяє підтримувати баланс між комфортом, безпекою та енергозбереженням.

Орієнтовні порогові значення CO₂ наведені у таблиці 11.6.

Таблиця 11.6 – Орієнтовні порогові значення CO₂

Рівень CO ₂ (ppm)	Інтерпретація	Дія BMS
< 600	Висока якість повітря	Вентиляція мінімальна або вимкнена
600–1 000	Нормальний рівень	Стандартний режим вентиляції
> 1 000	Погіршення якості повітря	Активується інтенсивна вентиляція
> 1 500	Недопустимий рівень	Тривожне сповіщення, примусова вентиляція

Вплив на енергоефективність та здоров'я.

Енергозбереження: вентиляція працює лише за потреби – менше витрат на електроенергію та нагрів / охолодження припливного повітря.

Комфорт та гігієна: підтримання оптимального рівня CO₂ запобігає втомі, головному болю, зниженню концентрації, що важливо для шкіл, офісів, лікарень.

Адаптивність: система автоматично реагує на зміну кількості людей у приміщенні, підлаштовуючи повітрообмін у режимі реального часу.

Датчики присутності дозволяють системі BMS реагувати на фактичне використання приміщень, забезпечуючи адаптивне керування освітленням, вентиляцією та опаленням. Це сприяє зниженню енергоспоживання без втрати комфорту.

Тип датчика, принцип дії, особливості застосування датчиків наведено у таблиці 11.7.

Застосування в системах.

Освітлення: автоматичне вмикання / вимикання світильників при вході / виході з приміщення.

Вентиляція: активація вентиляції лише при присутності людей, зниження витрат на електроенергію.

Опалення: перехід у економний режим при відсутності користувачів, зональне регулювання температури.

Таблиця 11.7 – Принцип роботи датчиків присутності

Тип датчика	Принцип роботи	Особливості застосування
PIR (Passive Infrared)	Реєструє інфрачервоне випромінювання від тіла людини	Найпоширеніші, ефективні для освітлення
Ультразвукові	Виявляють рух через зміну відбитого ультразвуку	Чутливі до дрібних рухів, застосовуються в офісах
Комбіновані	Поєднують PIR та ультразвук для підвищення точності	Використовуються в критичних зонах (переговорні, аудиторії)

Адаптація режимів роботи:

1. BMS змінює режими експлуатації систем залежно від фактичної присутності:

- активний режим – при виявленні людей;
- економний режим – при короткочасній відсутності;
- Standby або вимкнення – при тривалій відсутності.

2. Можлива інтеграція з графіками використання приміщень, наприклад, розкладом занять або робочим календарем.

Приклади функціональних сценаріїв:

1. Вимкнення світла в аудиторії через 5 хвилин після виходу останнього студента.

2. Зниження вентиляції в офісі при відсутності персоналу протягом обідньої перерви.

3. Перехід у standby-режим опалення в конференц-залі після завершення заходу.

4. Активація освітлення та вентиляції при вході в санвузол або коридор.

Інтеграція сенсорів у систему BMS є ключовим етапом технічної реалізації автоматизованого управління інженерними системами будівлі. Сенсори – температури, CO₂, вологості, освітленості, присутності тощо – підключаються до контролерів типу PLC (програмовані логічні контролери) або DDC (цифрові контролери прямої дії), які виконують локальну обробку сигналів, реалізують алгоритми регулювання та передають дані на верхній рівень системи. Зв'язок між сенсорами, контролерами та іншими пристроями здійснюється через стандартизовані протоколи передачі даних, зокрема Modbus (поширений у промислових системах), BACnet (спеціалізований для будівельної автоматизації) та KNX (європейський стандарт для освітлення, клімату, жалюзі). Ці протоколи забезпечують інтероперабельність між обладнанням різних виробників, гнучкість масштабування та стабільність комунікації.

Зібрані сенсорами дані надходять до SCADA-платформ (Supervisory Control and Data Acquisition) або HMI-інтерфейсів (Human-Machine Interface), де вони візуалізуються у вигляді графіків, таблиць, діаграм, а також використовуються для оперативного керування, налаштування параметрів та отримання сповіщень про відхилення чи аварії. SCADA / HMI дозволяють операторам контролювати стан систем у реальному часі, змінювати уставки, запускати сценарії та формувати звіти. Дані з сенсорів зберігаються у базах даних, що дає змогу формувати аналітичні звіти, проводити енергоаудит, прогнозувати навантаження та оптимізувати режими роботи систем. Така інтеграція забезпечує адаптивне, енергоефективне та нормативно узгоджене управління будівлею, що є основою для досягнення стандартів NZEB та сталого розвитку.

Алгоритми реагування та сценарне керування в системах BMS є основою для адаптивного, енергоефективного та контекстно-залежного управління інженерними системами будівлі. Вони дозволяють автоматично змінювати режими роботи обладнання залежно від поточних умов, заданих уставок і поведінки користувачів.

1. Логіка «якщо – то» (IF–THEN). Це фундаментальний принцип автоматизації, за яким система виконує дію при виконанні певної умови.

Приклади:

- якщо CO₂ > 1000 ppm, → увімкнути вентиляцію;
- якщо температура < 20 °C, → активувати опалення;
- якщо немає руху 15 хв, → вимкнути освітлення.

Такі правила можуть бути:

- простими (одна умова – одна дія);

- або складними (врахування часу доби, графіків роботи, зони приміщення).

2. Комбіноване реагування на кілька параметрів. BMS здатна враховувати одночасно кілька сенсорних показників для ухвалення рішень:

- температура + присутність: якщо в приміщенні є люди і температура $< 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, активується опалення; якщо людей немає – система переходить у standby⁷;

- CO₂ + вологість: при перевищенні обох параметрів активується інтенсивна вентиляція з осушенням;

- освітленість + присутність: якщо природного світла недостатньо і виявлено рух – вмикається штучне освітлення.

Це дозволяє досягати точного балансування між комфортом і енергоефективністю.

3. Прогнозне управління (Predictive Control).

Сучасні BMS використовують накопичені історичні дані для прогнозування подій і оптимізації роботи систем.

Функції:

- аналіз добових і тижневих графіків навантаження (наприклад, максимальне споживання тепла о 8:00);

- адаптація до сезонних змін, поведінки людей та погодних умов;

- попереднє нагрівання приміщень перед приходом людей;

- машинне навчання та AI: система самостійно оптимізує уставки та режими без участі оператора.

Алгоритми IF–THEN, комбіноване реагування та прогнозне управління формують інтелектуальну основу BMS. Вони дозволяють: забезпечити комфорт і безпеку; мінімізувати енерговитрати; автоматизувати роботу обладнання відповідно до принципів NZEB.

⁷ Standby – це режим очікування або готовності до використання. Він означає, що пристрій, система чи людина не працюють активно, але залишаються готовими швидко перейти до дії за потреби.

Питання для самоконтролю

1. Що таке Building Management System (BMS) і яку роль вона відіграє в будівлях типу NZEB?
2. Які основні функції виконує BMS у контексті енергоефективного управління будівлею?
3. Які переваги інтеграції BMS для досягнення стандартів майже нульового енергоспоживання?
4. Як BMS регулює температуру в приміщеннях залежно від графіків та зовнішніх умов?
5. Як BMS забезпечує адаптивне управління вентиляцією на основі якості повітря?
6. Що таке daylight harvesting і як BMS реалізує цю функцію в системі освітлення?
7. Які механізми використовує BMS для забезпечення гігієни та безпеки в системі гарячого водопостачання?
8. Які типи температурних сенсорів використовуються в BMS і де вони розміщуються?
9. Як датчики CO₂ впливають на керування вентиляцією та енергоспоживанням?
10. Які сценарії реагування BMS можливі при виявленні або відсутності присутності людей у приміщенні?

12 ІНТЕГРАЦІЯ BMS З АКТИВНИМИ ТА ПАСИВНИМИ СИСТЕМАМИ

12.1 Зв'язок з рекуперацією, тепловими насосами, сонячними колекторами

12.1.1 Рекуперація тепла: принципи та інтеграція з BMS

Рекуперація тепла – це технологія повернення теплової енергії, яку система вентиляції зазвичай виводить назовні разом із відпрацьованим повітрям. Завдяки теплообміну між витяжним і припливним повітрям відбувається частковий або повний нагрів (або охолодження влітку) свіжого повітря, що дозволяє:

- скоротити витрати енергії на 30–60 % у системах опалення або кондиціонування;
- підвищити комфорт – свіже повітря подається без значних коливань температури;
- зменшити екологічний вплив – менше споживання електроенергії та газу означає зниження викидів CO₂.

Основні типи рекуператорів наведені у таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 – Основні типи рекуператорів

Тип рекуператора	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Пластинчастий	Тепло передається через пластинчастий теплообмінник між потоками повітря	Висока ефективність (до 90 %), без рухомих частин	Не передає вологу, можливе обмерзання
Роторний (ентальпійний)	Обертювий ротор переносить тепло та вологу	Передача тепла і вологи, ефективність 70–85 %	Наявність рухомих частин, можливе змішування повітря
Теплова труба (Heat Pipe)	Фреон або інший агент переносить тепло у замкненій трубі	Простота, надійність	Ефективність нижча, не переносить вологу
Водяний (гліколевий контур)	Тепло передається теплоносієм між двома теплообмінниками	Гнучкість монтажу	Потребує насосів та автоматики, нижча ефективність
Комбіновані системи	Поєднання різних типів теплообміну	Висока адаптивність	Складність конструкції та обслуговування

Інтеграція рекуператорів у BMS (Building Management System) передбачає використання сенсорів та алгоритмів для адаптивного керування.

Сенсори:

- CO₂: контроль якості повітря та визначення рівня присутності людей;
- температура: регулювання теплообміну залежно від зовнішніх та внутрішніх умов.

12.1.2 Теплові насоси: принцип роботи та інтеграція з BMS

Тепловий насос – це енергоефективний пристрій, який переносе тепло від джерела з низькою температурою (повітря, вода, ґрунт) до системи опалення або гарячого водопостачання. Він працює за принципом зворотного циклу холодильника: тепло поглинається випарником і передається конденсатором у систему споживача.

Ключовий показник – COP (Coefficient of Performance): показує, скільки кВт тепла вироблено на 1 кВт спожитої електроенергії. Наприклад, COP = 4 означає, що система генерує 4 кВт тепла при споживанні 1 кВт електроенергії.

Основні режими роботи:

- опалення – передача тепла у радіатори, фанкойли, теплі підлоги;
- охолодження – робота в реверсивному режимі як кондиціонер;
- гаряче водопостачання – нагрівання води для побутових потреб.

Переваги:

- висока енергоефективність (COP 3–5 і більше);
- низькі викиди CO₂, використання відновлюваної енергії;
- можливість комбінування із сонячними панелями, колекторами, рекуператорами.

Типи теплових насосів наведено у таблиці 12.2.

Інтеграція теплових насосів у систему BMS дозволяє автоматизувати:

1. Перемикання режимів:

- опалення: активується при зниженні температури нижче встановленого рівня;
- охолодження: влітку або при перегріві приміщень;
- ГВП: працює за пріоритетом у лікарнях, готелях, басейнах.

2. Керування за графіками:

- денне та нічне зниження потужності;
- зменшення продуктивності у вихідні та непікові години.

3. Взаємодія з іншими системами:

- вентиляція та рекуперація;

- фанкойли, теплі підлоги, буферні ємності;
- аварійні алгоритми (перегрів, низький тиск, відмова компресора).

Таблиця 12.2 – Основні типи теплових насосів

Тип системи	Джерело тепла → Споживач	Особливості	Ефективність
Повітря-повітря	Зовнішнє повітря → внутрішнє	Найдоступніший, як кондиціонер з функцією тепла	COP 2.5–4
Повітря-вода	Повітря → система опалення	Підходить для радіаторів, теплих підлог	COP 3–4.5
Вода-вода	Ґрунтові або поверхневі води → опалення	Стабільна температура джерела	COP 4–6
Ґрунт-вода (геотермальний)	Ґрунт (зондами або колекторами) → вода	Висока ефективність, потребує буріння	COP 4–6
Гібридні насоси	Комбінація теплового насоса та котла	Автоматичний вибір джерела тепла	Залежить від умов

BMS здійснює аналітику та контроль енергоефективності насоса.

Моніторинг:

- вимірювання електроспоживання та кількості виробленого тепла;
- візуалізація на графіках у SCADA-панелях;
- контроль температури теплоносія, фреону, тиску та частоти компресора.

Оптимізація:

- адаптивне регулювання компресора (інверторне керування) ;
- порівняння фактичного COP з проєктним;
- виявлення неефективної роботи (часті пуски / зупинки, обмерзання).

Звітність:

- енергетичні звіти (для аудитів, ESG-звітності);
- аналіз сезонної ефективності SCOP, SEER;
- інтеграція з погодними станціями та зовнішніми джерелами енергії.

Погодні станції:

- отримання даних про температуру, вологість, вітер, сонячну радіацію;
- прогнозування навантаження та оптимізація роботи компресора.

Зовнішні джерела енергії:

- сонячна електростанція (PV) – використання надлишкової електрики для роботи насоса;

- сонячні колектори – підігрів теплоносія перед тепловим насосом;
- електромережа (тарифи) – перевага роботи в нічний тариф;
- електричні або газові котли – резервне джерело тепла при низьких температурах.

Сценарії BMS:

- пріоритет «сонце → тепловий насос → електричний котел»;
- балансування пікових навантажень;
- акумуляція тепла у буферних накопичувачах.

Теплові насоси у поєднанні з BMS – це гнучка, енергетично ефективна та екологічна система. Вона дозволяє автоматизувати роботу HVAC-комплексу, зменшити витрати, підвищити комфорт та забезпечити аналітичний контроль енергоефективності.

12.1.3 Сонячні колектори: BMS-керування та моніторинг

Типи сонячних колекторів наведені у таблиці 12.3.

Таблиця 12.3 – Типи сонячних колекторів

Тип колектора	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
Плоскі колектори	Абсорбер у термоізованому корпусі під склом акумулює сонячне тепло та передає теплоносію	Простота, доступність, довговічність	Нижчий ККД взимку, втрати тепла при низьких температурах	ГВП, басейни, допоміжне опалення
Вакуумні (трубчасті)	Скляні трубки з вакуумом, що мінімізує теплові втрати	Висока ефективність у холодну пору, менші втрати тепла	Вища вартість, складніше обслуговування	Опалення, ГВП, промислові системи

Обидва типи можуть працювати спільно з тепловими насосами, котлами та накопичувачами тепла.

Керування циркуляційними насосами та тепловими акумуляторами через BMS. Інтеграція колекторів у BMS забезпечує:

1. Автоматичне керування насосами:

- увімкнення циркуляційного насоса, коли температура в колекторі вища, ніж у накопичувачі;
- модуляція швидкості насоса (інверторне керування) для підтримання оптимальної різниці температур;
- вимкнення при досягненні заданої температури або падінні сонячної активності.

2. Робота з накопичувачами тепла:

- розподіл накопиченої енергії між зонами: ГВП, опалення, басейни, резерв;
- пріоритет використання сонячного тепла перед запуском котлів або ТЕНів.

3. Безпека та захист:

- відключення системи при перегріві (стагнація) або замерзанні теплоносія;
- контроль рівня, тиску та витрати теплоносія;
- аварійні повідомлення диспетчеру через BMS.

Прогнозування продуктивності за погодними даними. BMS використовує локальні метеостанції або онлайн-прогнози для:

1. Оцінки сонячної активності:

- прогноз сонячної радіації й хмарності;
- обчислення очікуваної теплової продуктивності колекторів.

2. Оптимізації енерговикористання:

- зменшення роботи електричних нагрівачів у сонячні періоди;
- перенесення роботи теплових насосів на час пікової інсоляції;
- адаптація роботи насосів для попереднього нагріву буферного бака.

Інтеграція з системами ГВП та опалення.

Гаряче водопостачання (ГВП):

- пріоритетне використання сонячного тепла для нагріву побутової води;
- перемикання на резервний котел або електронагрівач при нестачі сонячної енергії.

Опалення та низькотемпературні системи:

- використання надлишкового тепла для підігріву теплих підлог, фанкойлів, буферів;
- балансування між колекторами, тепловим насосом і котлом.

Типові сценарії BMS:

- антилегіонела – періодичне нагрівання бака до 80 °C для знищення бактерій;
- економія – максимальне використання сонячного тепла, мінімізація роботи електрообладнання;
- вимкнення при перегріві або ризику замерзання системи.

Інтеграція сонячних колекторів у BMS дозволяє:

- підвищити енергоефективність будівлі на 20–40 %.
- забезпечити повністю автоматизоване керування та моніторинг.
- відповідати міжнародним стандартам [31, 44, 45].

12.2 Керування жалюзі, вентиляційними клапанами, освітленням залежно від зовнішніх умов

12.2.1 Керування жалюзі та сонцезахистом

Системи жалюзі та сонцезахисту знижують теплові надходження влітку, зменшують потребу в кондиціонуванні та дозволяють використовувати природне світло (daylight harvesting). Типи жалюзі та сонцезахисних систем наведені у таблиці 12.4.

Основні типи сенсорів, інтегрованих у BMS.

Сенсори освітленості (lux):

- вимірюють рівень природного світла у приміщенні;
- дозволяють автоматично зменшувати яскравість штучного освітлення (димування) або вимикати його.

Сенсори сонячної радіації (W/m^2):

- встановлюють на фасадах або дахах;
- фіксують інтенсивність прямого сонячного випромінювання;
- на основі даних система вирішує, чи потрібно опустити жалюзі.

Астрономічні алгоритми (сенсори положення сонця):

- використовують дату, час і геолокацію для обчислення кута сонця;
- дозволяють прогнозно налаштовувати жалюзі, навіть до появи сліпучого світла або перегріву.

Адаптивні сценарії керування жалюзі:

- автоматичне відкриття / закриття – відбувається з урахуванням положення сонця, рівня освітленості та часу доби;
- ранкове відкриття – жалюзі відкриваються для максимального природного освітлення;
- денне затінення (Solar Shielding) – у години пікової інсоляції жалюзі частково або повністю закриваються;
- захист від перегріву та бліків – при досягненні критичного рівня освітленості/температури система знижує положення ламелей;
- Cooling Priority – якщо HVAC працює на охолодження, жалюзі утримують у затемненому положенні для зменшення теплового навантаження.

Енергозбереження: інтеграція з HVAC знижує витрати енергії на охолодження до 15–25 %.

Переваги автоматизованого керування сонцезахистом:

- зниження енергоспоживання – менше витрат на кондиціонування та штучне освітлення;
- покращення комфорту – постійний рівень освітленості та відсутність прямих відблисків;

- пасивна терморегуляція – влітку захист від перегріву; взимку можливість пропускати сонячне тепло в приміщення.

Таблиця 12.4 – Типи жалюзі та сонцезахисних систем

Тип системи	Опис	Переваги	Застосування
Внутрішні жалюзі	Розташовані всередині приміщення (горизонтальні, вертикальні, рулонні)	Легке керування, дешеві, естетичність	Офіси, житлові будівлі
Зовнішні жалюзі (фасадні)	Кріпляться з зовнішнього боку вікна, ламелі з алюмінію	Високий захист від перегріву, ефективне відбиття сонця	Бізнес-центри, пасивні будівлі
Маркізи та сонцезахисні екрани	Тканинні або перфоровані конструкції, що розгортаються над вікнами або фасадами	Захист від прямих променів, комфортне розсіювання світла	Балкони, вітрини, зимові сади
Розумні склопакети (електрохромні, фотохромні)	Скло змінює прозорість залежно від напруги або освітленості	Пасивне керування, мінімальне обслуговування	Наукові центри, преміальні будівлі

Системи керування жалюзі та сонцезахистом через BMS дозволяють:

- знизити споживання енергії будівлі;
- підвищити комфорт користувачів і якість освітлення;
- захистити приміщення від перегріву без додаткових витрат електроенергії;
- забезпечити інтеграцію з HVAC, освітленням і стандартами «розумної будівлі».

12.2.2 Керування вентиляційними клапанами через BMS

Типи вентиляційних клапанів наведені у таблиці 12.5, а сенсори керування клапанами у таблиці 12.6.

Сценарії керування вентиляційними клапанами.

Нічне охолодження (Night Purge):

- клапани відкриваються вночі, коли зовнішнє повітря холодніше;

- природне охолодження конструкцій будівлі;
- зменшення навантаження на кондиціонери вранці.

Природна вентиляція (Free Cooling / Natural Airflow):

1. Автоматичне відкриття клапанів при сприятливих умовах:

- температура зовні < всередині;
- низький рівень вологості та швидкості вітру.

2. Зниження використання механічної вентиляції.

Захист та безпека. Автоматичне закриття клапанів при:

- сильному вітрі;
- низькій температурі (ризик замерзання);
- високому забрудненню повітря (PM2.5, NOx);
- сигналі пожежної тривоги (для димових / пожежних клапанів).

Таблиця 12.5 – Типи вентиляційних клапанів

Тип клапана	Призначення	Особливості	Приклади застосування
Приточні (supply dampers)	Подача зовнішнього повітря	Часто оснащені фільтрами, можуть працювати у природній або примусовій вентиляції	Офісні будівлі, склади
Витяжні (exhaust dampers)	Видалення повітря з приміщення	Регулюють тиск та рівень CO ₂	Кухні, санвузли, технічні кімнати
Регулювальні (VAV – Variable Air Volume)	Змінюють об'єм повітря в повітроводі	Оснащені сервоприводами, працюють на основі CO ₂ , температури	Офісні приміщення, конференц-зали
Протипожежні / димові клапани	Перекривають повітроводи при пожежі	Сертифіковані за нормами пожежної безпеки	Евакуаційні шляхи, шахти вентиляції
Фасадні / автоматичні клапани	Природна вентиляція через фасад	Керуються погодними умовами, сенсорами вітру	«Розумні» фасади, атріуми

Таблиця 12.6 – Типи сенсорів керування клапанами

Тип сенсора	Параметр	Роль у системі
Температури (°C)	Внутрішня/зовнішня температура	Визначення потреби у вентиляції, охолодженні або обігріві
CO ₂ (ppm)	Концентрація CO ₂	Активація вентиляції при перевищенні норми (наприклад, 1 000 ppm)
Вологості (%)	Вологість повітря	Запобігання конденсації, керування комфортом
Швидкості вітру (м/с)	Стан погодних умов	Захист фасадних клапанів та оптимізація природної вентиляції
PM _{2.5} , NO _x	Якість повітря	Закриття клапанів при високому забрудненні

Інтеграція: моторизовані клапани з сервоприводами підключаються до BMS через Modbus, BACnet, KNX.

Інтеграція BMS з іншими системами.

1. HVAC (вентилятори, рекуператори, чилери, теплові насоси):

- клапани координуються з подачею повітря та тепловою енергією.

2. Фасадні системи (жалюзі, сонцезахист):

- узгодження відкриття клапанів із положенням жалюзі для оптимального мікроклімату.

3. Погодні станції:

- дані про вітер, дощ, температуру для адаптивної роботи.

Ефективність та нормативна відповідність:

- енергоефективність – економія енергії на вентиляцію та охолодження до 15–30 %;
- комфорт – стабільний рівень CO₂, температури, вологості; відсутність протягів.

Автоматизоване керування вентиляційними клапанами через BMS забезпечує:

- енергозбереження без втрати комфорту;
- свіже повітря та якісний мікроклімат;
- гнучку інтеграцію з HVAC, фасадом та погодними станціями;
- відповідність європейським стандартам енергоефективності.

12.2.3 Керування освітленням через BMS

Типи освітлення та можливості інтеграції наведені у таблиці 12.7, а типи сенсорів у таблиці 12.8.

Таблиця 12.7 – Типи освітлення та можливості інтеграції

Тип освітлення	Опис	Можливість керування через BMS
Загальне (ambient)	Основне освітлення приміщення	Увімк. / вимк., димування, таймери
Робоче (task lighting)	Локальне освітлення робочих зон	Сенсори присутності, сценарії роботи
Аварійне (emergency)	Освітлення при відключенні живлення	Моніторинг стану, автоматичне увімкнення
Декоративне / архітектурне	Підсвітка фасадів, інтер'єрів	Астрономічні таймери, сценарії фасадної підсвітки
Зовнішнє (вуличне)	Паркінги, територія, фасади	Астрономічні години, погодні умови

Алгоритми керування.

Димування залежно від природного світла: сенсор освітленості → BMS регулює яскравість; плавне керування від 0 % до 100 %; економія електроенергії: до 30 %.

Автоматичне вмикання / вимикання по зонах.

В основі – сенсори руху / присутності. Типові зони: коридори, офіси, санвузли, паркінги.

Сценарії:

- Comfort Mode – комфортний рівень освітлення.
- Energy Saving – мінімальна яскравість.
- Emergency Lighting – аварійне світло при тривозі.

Daylight Harvesting – максимальне використання денного світла: природне світло є основним джерелом; штучне світло лише компенсує нестачу; інтеграція з жалюзі, фасадними системами, щоб уникнути відблисків та перегріву.

Зв'язок з іншими системами:

- HVAC – зменшення теплового навантаження від освітлення.
- Система безпеки – включення світла при тривозі.
- Жалюзі / сонцезахист – синхронізація з положенням сонця.
- Система присутності – вентиляція + освітлення в активних зонах.

Таблиця 12.8 – Типи сенсорів

Тип сенсора	Призначення	Застосування
Освітленості (lux)	Вимірює рівень природного світла	Daylight harvesting, димування
Присутності/руху (PIR, ультразвук)	Виявляє людей у приміщенні	Автоматичне увімк. / вимк. світла
Астрономічні таймери	Розрахунок часу сходу / заходу сонця	Зовнішнє та фасадне освітлення
Датчики часу / погодні станції	Інформація про хмарність, дощ, туман	Адаптивне освітлення зовні та всередині

Керування освітленням через BMS дозволяє:

- зменшити споживання енергії до 30–50 %;
- підвищити комфорт та адаптивність простору;
- забезпечити динамічне освітлення залежно від людей, сонця та часу доби;
- інтегрувати освітлення з HVAC, безпекою, фасадом і аналітикою.

12.3 Сценарії енергозбереження: нічний режим, відсутність користувачів, пікове навантаження

12.3.1 Нічний режим у BMS

Нічний режим – це енергоощадний сценарій, який активується після завершення робочого часу або за відсутності людей у будівлі. Його основне завдання – мінімізувати споживання енергії, водночас зберігаючи безпеку, стабільність інженерних систем і комфортні умови для ранкового початку роботи.

Основні функції нічного режиму наведені у таблиці 12.9.

Однією з важливих функцій є нічне провітрювання або Night Purge:

- BMS відкриває припливні та витяжні клапани;
- використовується прохолодне зовнішнє повітря для охолодження внутрішніх конструкцій – стін, перекриття, меблів;
- зниження температури конструкцій забезпечує менше навантаження на чилери та кондиціонери наступного дня;
- найбільший ефект – у літній період, особливо в офісних та громадських будівлях.

BMS використовує комбінацію джерел даних для активації нічного режиму:

- графіки роботи об'єкта – робочі години, вихідні, святкові дні;

- астрономічні таймери – час заходу та сходу сонця;
- сенсори присутності (PIR, ультразвукові) – виявлення людей;
- погодні дані – температура, напрямок і швидкість вітру, прогноз погоди;
- системи доступу та охорони – факт закриття будівлі.

Нічний режим координується з такими підсистемами:

• охоронна сигналізація та контроль доступу – активується разом із закриттям будівлі;

• протипожежна система – зберігає повну функціональність;

• жалюзі, вентиляційні клапани, освітлення, HVAC – централізовано керуються через BACnet, KNX, Modbus або OPC UA;

• енергомоніторинг – збирання даних про енергоспоживання для аналізу.

Ефективність та нормативна відповідність:

• енергозбереження – зниження споживання електроенергії та тепла до 30–40 % у нічний час;

• комфорт – будівля не перегрівається та не переохолоджується до ранку;

• відповідність стандартам [28, 35, 46].

Таблиця 12.9 – Основні функції нічного режиму

Система	Стан у нічному режимі
Освітлення	Вимикається в коридорах, санвузлах, конференц-залах. У зонах охорони залишається мінімальний рівень освітленості
Вентиляція	Переходить у режим зниженого повітрообміну (reduced flow) або повністю вимикається у порожніх зонах
Кондиціонування / HVAC	Працює в режимі очікування (Standby), або вимикається, якщо не потрібне підтримання температури
Опалення	Температурні уставки знижуються, наприклад, з 21 °C до 16 °C у нежитлових зонах
Системи безпеки	Залишаються активними – охоронна сигналізація, пожежна безпека, контроль доступу

Нічний режим у системах BMS – це не просто вимкнення освітлення, а комплексний алгоритм, який: знижує енергоспоживання без шкоди для безпеки, скорочує експлуатаційні витрати, використовує природні ресурси для охолодження, забезпечує ефективну готовність будівлі до нового дня.

12.3.2 Режим «Відсутність користувачів»

Режим «Відсутність користувачів» – це автоматизований сценарій енергозбереження в системах Building Management System, який активується при виявленні, що в приміщенні або зоні немає людей. Його головна мета – мінімізувати споживання енергоресурсів, не порушуючи вимог безпеки та мікроклімату.

BMS використовує декілька джерел інформації для визначення присутності людей:

- сенсори руху (PIR), присутності, ультразвукові датчики – виявлення активності або її відсутності в реальному часі;
- системи контролю доступу (карти, зчитувачі, турнікети) – фіксують факт покидання будівлі або зони;
- таймери неактивності – запускають сценарій після визначеного часу без руху або входів / виходів.

Зміни, які відбуваються в роботі систем при активації режиму наведені у таблиці 12.10.

Таблиця 12.10 – Зміни, які відбуваються в роботі систем при активації режиму «Відсутність користувачів»

Система	Дія в режимі «Відсутність користувачів»
Освітлення	Вимикається або знижується до 10–30 % (димування), залежно від зони
HVAC (опалення, вентиляція, кондиціонування)	Переходить у режими Standby, Eco, або Setback: температура знижується / підвищується на 2–5 °C від комфортної
Вентиляція	Працює на мінімальному повітрообміні, лише для дотримання санітарних норм
Жалюзі / сонцезахист	Можуть автоматично закриватися для захисту від перегрівання або тепловтрат
Системи безпеки	Охоронна сигналізація переходить у підвищену чутливість, активується контроль вторгнень
Пожежна безпека	Усі системи залишаються повністю активними, з можливістю дистанційного керування

Перехід в режим енергозбереження відбувається після фіксації відсутності руху, неактивності датчиків доступу або за розкладом.

Повернення в робочий режим – при виявленні руху, зчитуванні карти доступу, відкритті дверей або відповідно до графіка.

BMS веде логування подій: час активації / деактивації, рівень спожитої енергії, роботу систем.

Переваги впровадження:

- зменшення енергоспоживання на 20–40 % у нежитлових зонах;
- подовження ресурсу обладнання (освітлення, вентилятори, компресори);
- підтримання санітарної якості повітря на мінімально допустимому рівні;
- підвищення безпеки будівлі, завдяки координації з охоронними системами;
- відповідність міжнародним стандартам [28, 35, 46].

12.3.3 Керування піковим навантаженням (Peak Shaving)

Peak Shaving – це інтелектуальна стратегія енергозбереження, яка дозволяє зменшити споживання електроенергії у години максимальних тарифів або перевантаження енергосистеми. BMS автоматично аналізує споживання, визначає пікові періоди та керує навантаженнями, щоб уникнути штрафів, підвищених тарифів та перевищення договірної потужності.

BMS використовує два підходи:

1. Тарифний (заздалегідь заданий графік) – пікові години визначаються згідно з тарифними планами енергопостачальної компанії.

2. Динамічний (реальний час) – система отримує сигнали від енергомережі: про перевантаження, високі тарифи, Demand Response-події.

Дії, які виконує BMS у режимі Peak Shaving наведені у таблиці 12.11.

Таблиця 12.11 – Дії, які виконує BMS у режимі Peak Shaving

Сфера	Сценарій дії
Освітлення	Вимкнення / димування декоративного та некритичного освітлення
HVAC, вентиляція	Зменшення потужності вентиляторів, насосів, компресорів через частотні перетворювачі або тимчасове вимкнення
Офісне обладнання	Відключення частини розеткових груп, зарядних станцій, рекламних дисплеїв
Теплові системи	Тимчасова зупинка або зменшення продуктивності котлів / чилерів у нежитлових зонах
Накопичувачі енергії	Перехід на акумулятори, теплові баки, використання акумульованого холоду/тепла
Відновлювані джерела	Максимальне використання енергії від сонячних панелей, теплових насосів, гібридних систем

BMS може брати участь у програмах Demand Response, де будівля реагує на запити енергокомпаній:

- зменшує споживання протягом кількох хвилин після сигналу;
- забезпечує стабільність мережі під час пікових навантажень;
- отримує фінансову компенсацію за участь у програмі.

Переваги впровадження Peak Shaving:

- зниження витрат на електроенергію – уникнення пікових тарифів та штрафів за перевищення договірної потужності;
- зменшення навантаження на обладнання (плавне керування частотою обертів, оптимізація роботи насосів і компресорів);
- підвищення енергоефективності будівлі та відповідність стандартам [28, 35];
- інтеграція з зеленою енергетикою та Smart Grid;
- забезпечення енергетичної стабільності та безперебійності роботи критичних систем.

Питання для самоконтролю

1. Які типи рекуператорів використовуються в системах вентиляції, і як BMS керує їх роботою?
2. Як BMS забезпечує оптимальну роботу теплового насоса в режимах опалення, охолодження та гарячого водопостачання?
3. Які сенсори використовуються для моніторингу ефективності рекуперації та як вони впливають на алгоритми керування?
4. У чому полягає принцип daylight harvesting, і як BMS реалізує керування освітленням залежно від природного світла?
5. Як працює нічне охолодження (Night Purge) і які умови необхідні для його активації через BMS?
6. Які переваги має інтеграція сонячних колекторів у BMS з точки зору енергозбереження та керування ГВП?
7. Як BMS реагує на відсутність користувачів у приміщенні, і які системи переходять у економний режим?
8. Які типи вентиляційних клапанів використовуються в будівлях, і як BMS керує ними залежно від зовнішніх умов?
9. Що таке Peak Shaving і як BMS реалізує сценарії зниження пікового навантаження?
10. Як сценарії нічного режиму та пікового навантаження взаємодіють із системами вентиляції, освітлення та опалення для досягнення енергозбереження?

13 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ І АНАЛІТИКА

13.1 Збір даних з усіх систем будівлі та побудова енергетичного профілю

Енергетичний профіль будівлі – це систематизований опис її енергоспоживання, сформований на основі даних, отриманих від інженерних систем: HVAC, освітлення, гарячого водопостачання, електроживлення, систем безпеки та відновлюваних джерел енергії. Інформація надходить від лічильників, датчиків, систем автоматизації (BMS, SCADA) та IoT-пристроїв і містить кількісні показники споживання та їхні часові коливання.

Енергетичний профіль дає змогу визначити зони неефективності, пікові навантаження, аномалії та встановити базовий рівень споживання (baseline), що є основою для оптимізації та планування модернізації. Він є обов'язковим елементом енергетичного сертифіката відповідно до [6] та використовується в межах ISO 50001, LEED і BREEAM. З позиції управління профіль забезпечує прозорість витрат, прогнозування споживання й підґрунтя для систем енергоменеджменту. Згідно зі стандартами [7, 28], він визначає базовий рівень енергетичної ефективності, а [35] – роль автоматизації у зниженні споживання. Профіль також застосовується для оцінювання класу енергоефективності та підтримує реалізацію політики декарбонізації відповідно до Європейської зеленої угоди та директиви EPBD.

Джерела даних охоплюють усі інженерні системи будівлі. Найбільші масиви формує HVAC, що вимірює температуру, вологість, витрати теплоносія та режими роботи обладнання. Системи освітлення, електроживлення та водопостачання надають інформацію про електроспоживання, навантаження, витрати води та параметри ресурсів. Відновлювані джерела (PV, сонячні колектори, теплові насоси) передають дані про виробництво енергії та ефективність. BMS, SCADA та IoT-мережі забезпечують збір і передачу даних у реальному часі, включаючи сигнали про присутність, аварійні стани та працездатність обладнання. Уся інформація інтегрується в платформу моніторингу, що забезпечує створення повного енергетичного профілю відповідно до [7, 28, 35].

Технологічна інфраструктура збору даних ґрунтується на сенсорах (температури, вологості, тиску, витрат, CO₂, освітленості тощо) та комунікаційних протоколах. Найпоширеніші з них – BACnet, Modbus, KNX і MQTT. BACnet інтегрує системи HVAC, освітлення та безпеки у BMS; Modbus використовується для збору даних з лічильників та датчиків; KNX забезпечує автоматизацію освітлення й опалення; MQTT застосовується у бездротових IoT-системах та для синхронізації з цифровими двійниками. Шлюзи дають

змогу об'єднувати дані різних протоколів для інтеграції з хмарними платформами. Перспективним напрямом є використання цифрових двійників і BIM-моделей, що об'єднують технічні та геометричні характеристики для підвищення точності аналітики.

Стандартизація та нормування даних забезпечують їхню сумісність і коректність. Використовуються формати CSV, XML, JSON та протокол OPC UA. Частота збору залежить від системи: для HVAC і освітлення достатньо 5–15 хвилин, для фіксації піків або аварій – до 1 секунди. Вимоги до точності визначаються нормативами, зокрема [47] для електролічильників. Синхронізація часових міток здійснюється через NTP або GPS. Дані архівуються не менше ніж на 3–5 років із забезпеченням резервного копіювання та контролю цілісності. Безпека гарантується використанням TLS/SSL, автентифікації, контролю доступу та відповідності вимогам [48, 49].

Фінальним етапом є аналітика та формування baseline згідно з [28]. Основні показники ефективності – EUI, питомі витрати електроенергії (kWh/m^2) та питомі викиди CO_2 . Значення порівнюються з нормативами [6, 7] і еталонними будівлями (LEED, BREEAM). На основі профілю оцінюється потенціал енергозбереження шляхом моделювання сценаріїв модернізації, автоматизації та оптимізації режимів роботи. Економічна доцільність визначається за терміном окупності, економією коштів і впливом на викиди CO_2 .

Для підготовки до енергетичного аудиту формується звіт відповідно до [28, 50], який містить опис профілю, baseline, KPI, виявлені аномалії та рекомендації. Це забезпечує підвищення енергоефективності, скорочення вуглецевого сліду та відповідність сучасним вимогам сталого розвитку.

13.2 Виявлення втрат, неефективних зон, аномалій

Аналітика в системах енергетичного моніторингу є ключовим інструментом управління ресурсами, оскільки забезпечує виявлення втрат, аномалій і неефективних зон, що підвищує енергоефективність та відповідність нормативним вимогам. Її завдання – перетворення великих масивів даних HVAC, освітлення, електроживлення, водопостачання, а також платформ BMS, SCADA й IoT-мереж на структуровану інформацію для технічних та управлінських рішень. Завдяки алгоритмам агрегації та нормалізації аналітика дає змогу виявляти теплові втрати, перевантаження, нераціональні режими та приховані несправності, що не фіксуються традиційним контролем. Для підвищення енергоефективності визначаються зони надмірного споживання, оцінюється потенціал економії та оптимізуються режими роботи систем, а у

сфері безпеки – ідентифікуються аномалії, які можуть спричинити аварії або порушення експлуатації. З управлінської точки зору аналітика забезпечує прозорість витрат, підтримку бюджетування та планування модернізації.

Аналітичні дані формують основу енергетичного аудиту: визначається енергетичний профіль будівлі, baseline, показники EUI, kWh/m^2 та CO_2/m^2 відповідно до стандартів [7, 28, 50], а також забезпечуються вимоги сертифікацій LEED, BREEAM, EDGE.

Джерела втрат включають технічні, технологічні й поведінкові фактори. Основні з них – теплові втрати через конструкції будівлі, неефективність електромереж і насосно-теплого обладнання, гідравлічні дисбаланси, зношення теплообмінних поверхонь. Значну частку становлять поведінкові втрати: неконтрольоване освітлення, робота вентиляції без потреби, витоки води, відсутність регулювання. Також важливими є втрати через некоректні налаштування BMS, дисбаланс HVAC, помилки калібрування та зношення обладнання.

Методи виявлення неефективності ґрунтуються на поєднанні аналітичних і цифрових підходів. Аналіз відхилень від baseline дозволяє фіксувати надмірне споживання й технічні збої, а KPI (EUI, kWh/m^2 , CO_2/m^2) – оцінювати ефективність порівняно з нормативами [7, 28] та еталонними будівлями. Візуалізаційні інструменти: теплові карти, зональний аналіз, трендові графіки – дають змогу локалізувати проблеми та ідентифікувати нестабільні режими. Алгоритмічні методи включають пороговий аналіз, регресійні моделі, кластеризацію та ML-алгоритми, що автоматично виявляють аномалії й прогнозують ризики.

Класифікація аномалій охоплює три групи.

Технічні – витоки, перевантаження, зниження ККД, несправності насосів, вентиляторів, термостатів; виявляються пороговим аналізом, трендами, тепловізією та даними BMS/SCADA.

Поведінкові – порушення експлуатації (залишене освітлення, кондиціонування при відкритих вікнах); виявляються аналізом зонального споживання та даними контролю доступу; усуваються технічними й організаційними заходами.

Системні – помилки конфігурації, дублювання команд, конфлікти логіки, неузгодженість HVAC і BMS; потребують ревізії автоматизації та відповідності стандартам [35].

Програмні інструменти для аналізу включають Power BI (дашборди, KPI), Grafana (моніторинг у реальному часі), а також платформи ISO 50001 для аудиту, аналізу baseline і формування звітності. Об'єднання цих рівнів створює цифровий енергетичний контур будівлі, що підтримує прогнозування,

оптимізацію, безпеку та підготовку до аудиту відповідно до [50]. На основі отриманої аналітики формуються сценарії модернізації, автоматизації та переходу до відновлюваних джерел енергії.

13.3 Звітність для сертифікації NZEB

Структура звітності для сертифікації NZEB (будівлі з майже нульовим енергоспоживанням) формується відповідно до стандартів [7, 28, 35] і охоплює ключові блоки, що підтверджують енергоефективність та екологічність будівлі. Основним елементом звіту є енергетичний профіль, який визначає джерела енергії (електрика, тепло, газ, вода, ВДЕ), системи споживання (HVAC, вентиляція, освітлення, ГВП, ІТ-обладнання) та структуру навантажень у розрізі зон, систем і періодів. Дані для профілю отримують з BMS, EMS, SCADA, IoT-сенсорів і цифрових моделей BIM або Digital Twin.

До обов'язкових показників належать:

- EUI – річна інтенсивність енергоспоживання ($\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік}$);
- питомі витрати електроенергії, тепла та води;
- $\text{CO}_2/\text{м}^2$ – питомі викиди парникових газів;
- частка ВДЕ у загальному енергобалансі.

Важливим елементом звітності є визначення baseline, який формує еталонне енергоспоживання будівлі з урахуванням типу об'єкта, кліматичних умов і режимів експлуатації. Baseline використовується для порівняння поточних значень, оцінки ефективності заходів та формування прогнозів.

Для підвищення наочності застосовуються графіки трендів, теплові карти, зональні та секторні діаграми, що формуються у Power BI, Grafana або EMS з можливістю інтеграції у BIM.

Звітність NZEB також висуває вимоги до даних, включно з точністю, стандартизованими форматами, синхронізацією та тривалим архівуванням (не менше 3–5 років). Особливу увагу приділяють інформаційній безпеці: шифруванню передачі, автентифікації доступу, резервуванню та відповідності стандарту [48]. У разі використання цифрових двійників дані мають узгоджуватися зі стандартами інформаційного моделювання [51].

Важливим інструментом досягнення NZEB є автоматизація будівлі відповідно до класів BACS за [35]. Вона забезпечує оптимізацію роботи систем, підвищення точності контролю, зниження енерговитрат та підготовку до сертифікації.

Класи автоматизації наведені у таблиці 13.1.

Інтеграція автоматизації охоплює HVAC (погодозалежне та адаптивне керування, балансування контурів), освітлення (датчики руху, димування),

сонцезахист (керування за інсоляцією), вентиляцію (DCV, керування за CO₂ та вологістю). Такі рішення забезпечують зменшення енергоспоживання та підвищення комфорту.

Таблиця 13.1 – Класи автоматизації будівель

Клас	Рівень автоматизації	Характеристика системи	Типові функції
A	Висока енергоефективність (Advanced BACS)	Повна інтеграція систем автоматизації з оптимізованим управлінням і самонавчанням. Системи реагують на зміни зовнішніх умов, присутність користувачів, тарифи енергії.	Інтелектуальні BMS, адаптивне керування HVAC, зональне освітлення, прогнозне керування, інтеграція з системами прогнозу погоди.
B	Енергоефективна автоматизація (Enhanced BACS)	Автоматизовані системи із зональним керуванням і координацією між підсистемами.	Автоматичне регулювання температури, керування освітленням за присутністю, часові графіки роботи, моніторинг енергоспоживання.
C	Стандартна автоматизація (Standard BACS)	Базовий рівень управління без інтеграції систем. Управління здійснюється вручну або за простими таймерами.	Термостати, ручне вмикання / вимикання обладнання, локальні регулятори без централізованого контролю.
D	Без автоматизації (Non-energy efficient BACS)	Відсутнє централізоване управління або контроль. Енергоспоживання не оптимізується.	Постійна робота систем незалежно від потреб, відсутність сенсорів, ручне керування.

Формування рекомендацій на основі енергетичного моніторингу охоплює визначення зон пріоритетного втручання, розроблення технічних заходів (модернізація обладнання, автоматизація, балансування систем, підвищення теплоізоляції) та організаційних змін (навчання персоналу, політика енергозбереження, гнучкі графіки роботи систем). Реалізація цих заходів знижує споживання енергії, експлуатаційні витрати, викиди CO₂ та сприяє підготовці будівлі до сертифікацій ISO 50001, LEED, BREEAM і EDGE.

Питання для самоконтролю

1. Які типи даних збираються для формування енергетичного профілю будівлі, і які джерела їх постачають?
2. Що таке нормалізація енергетичних даних і чому вона важлива для порівняльного аналізу?
3. Які графічні засоби використовуються для візуалізації енергетичного профілю, і які типи інформації вони відображають?
4. Як визначається базовий рівень енергоспоживання (baseline) і яку роль він відіграє в енергоменеджменті?
5. Які основні джерела енергетичних втрат у будівлі, і як вони класифікуються?
6. Які методи використовуються для виявлення аномалій у споживанні енергії? Наведіть приклади алгоритмів.
7. Чим відрізняються технічні, поведінкові та системні аномалії, і як їх виявити?
8. Яку роль відіграють KPI (EUI, kWh/m², CO₂/m²) у виявленні неефективних зон?
9. Які ключові компоненти включає звітність для сертифікації NZEB згідно з ISO 52000-1?
10. Як класи автоматизації (A–D) за [35] впливають на енергоспоживання та відповідність NZEB?

14 ВЗАЄМОДІЯ З ЗОВНІШНІМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ТА МЕРЕЖЕЮ

14.1 Керування фотовольтаїкою, акумуляторами, біомасою

Децентралізовані джерела енергії стають ключовими у сучасних енергосистемах, оскільки підвищують енергетичну безпеку, зменшують залежність від централізованих електростанцій і втрати під час передачі. Вони забезпечують гнучкість, швидку реакцію на зміни попиту та сприятливі умови для інтеграції відновлюваних джерел. Ефективне керування включає регулювання напруги й частоти, оптимізацію навантаження, синхронізацію з мережею та використання гнучких режимів взаємодії (Net Metering, Feed-in Tariff, Demand Response). Основою таких систем є цифрові технології – SCADA, EMS, IoT, Smart Grid та алгоритми ШІ.

Керування фотовольтаїчними системами забезпечує стабільність роботи сонячних електростанцій та якість електроенергії. На ефективність генерації впливають інсоляція, температура, орієнтація та стан панелей. Для максимізації продуктивності застосовують MPPT-алгоритми (P&O, Incremental Conductance, адаптивні методи з ШІ). Центральну роль відіграють інвертори – автономні, мережеві та гібридні – що здійснюють перетворення струму, синхронізацію з мережею, захист і контроль якості. Прогнозування генерації на основі метеоданих дозволяє балансувати навантаження та планувати заряд акумуляторів.

Керування акумуляторними системами є критичним у балансуванні між генерацією і споживанням, особливо в системах з відновлюваними джерелами. Найпоширенішими є літій-іонні батареї, що відзначаються високою енергоемністю й ефективністю; також застосовують Pb-acid, NaS, NiMH та твердотільні акумулятори. Роботу забезпечує система BMS, яка контролює напругу, струм, температуру, SoC і SoH, запобігає перевантаженням та деградації. Стратегії заряджання можуть бути статичними або динамічними (на основі ШІ та прогнозування). Акумулятори виконують функції резервування, згладжування піків, підтримання частоти та напруги, що робить їх основою Smart Grid і Microgrid.

Керування установками на біомасі забезпечує стабільність і гнучкість у гібридних енергосистемах. Біоенергетика охоплює анаеробне зброджування, піроліз і спалювання. Особливості керування визначаються властивостями палива та режимами реактора. Автоматизовані системи подачі палива підтримують оптимальний режим для стабільної генерації. На відміну від сонячних і вітрових джерел, біомаса є керованою генерацією, що забезпечує балансування та роботу в резервному режимі. Інтеграція біоенергетики з PV,

аккумуляторами й мережею підвищує ефективність та дозволяє застосовувати інтелектуальні алгоритми оптимізації. Когенерація (CHP) збільшує загальний ККД та сприяє розвитку локальних енергокластерів.

Інтеграція децентралізованих джерел енергії вимагає застосування EMS та SCADA для оптимізації потоків енергії, моніторингу, прогнозування та оперативного реагування. Дотримання міжнародних стандартів (IEEE 1547, IEC 61727) гарантує узгодженість параметрів і безпечну роботу з мережею. Енергетичні системи можуть працювати в автономному, мережевому, резервному та гібридному режимах, що потребує адаптивних алгоритмів керування інверторами й накопичувачами. Оптимізація роботи ДЖЕ передбачає розподіл навантаження з урахуванням потужності, вартості й екологічних характеристик, використання методів математичного програмування та ШІ.

Гібридні мікромережі поєднують PV, аккумулятори, біоенергетику та інтелектуальні системи керування. PV-аккумуляторні комплекси забезпечують накопичення надлишкової енергії та незалежність від мережі. Біоустановки в агросекторі та комунальному господарстві працюють як регулюючі й резервні джерела, сприяють утилізації відходів і розвитку циркулярної економіки. У закладах охорони здоров'я, освіти, аграрних господарствах такі системи забезпечують надійність, енергоефективність і зниження вуглецевого сліду, формуючи нову модель локальної енергетичної незалежності та сталого розвитку.

14.2 Балансування між споживанням і генерацією

Балансування між споживанням і генерацією є одним із ключових принципів функціонування будь-якої енергетичної системи. На відміну від більшості інших ресурсів, електроенергія повинна споживатися одночасно з її виробництвом. Порушення цього балансу призводить до коливань частоти в електричній мережі, що може викликати нестабільність системи, аварійні відключення або пошкодження обладнання. Тому здатність енергосистеми підтримувати миттєву рівновагу між попитом і генерацією визначає її надійність, безпеку та ефективність.

У централізованих енергосистемах балансування традиційно забезпечується зміною потужності великих електростанцій відповідно до диспетчерських команд.

У децентралізованих системах цю функцію виконують локальні джерела енергії, накопичувачі та керовані споживачі, які працюють під управлінням інтелектуальних алгоритмів. Така структура потребує більшої гнучкості, високої швидкодії та здатності реагувати на зміни у режимі реального часу.

Зростання частки варіабельних відновлюваних джерел (сонячних і вітрових електростанцій) значно ускладнює процес балансування. Генерація від ВДЕ нестабільна та залежить від погодних умов: сонячні електростанції виробляють максимум енергії в обід, коли споживання помірне, тоді як вітрові установки часто генерують надлишкову енергію вночі. Це створює нерівномірність виробітку та підвищує навантаження на системи управління.

Для забезпечення рівноваги між виробництвом і споживанням застосовується комплекс технічних рішень:

1. Гнучка генерація:

- гідроелектростанції – найбільш маневрові, здатні швидко підвищувати або знижувати потужність, покриваючи піки споживання;
- теплові електростанції – забезпечують базове навантаження та беруть участь у вторинному й третинному регулюванні;
- біоенергетичні установки – можуть швидко коригувати рівень потужності завдяки керуваній подачі палива.

2. Системи накопичення енергії (ESS).

- акумуляторні системи (Li-ion, свинцево-кислотні) забезпечують швидку реакцію на зміну балансу, згладжують коливання та дають резервне живлення;
- гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС) – використовуються для масштабного балансування, мають високий ККД і довгий строк експлуатації.

3. Керування навантаженням (Demand Side Management, DSM).

DSM передбачає активне залучення споживачів шляхом:

- зміни графіків споживання;
- обмеження неключових навантажень у пікові періоди;
- застосування стимулюючих тарифів;
- автоматизованого керування обладнанням.

Це зменшує потребу у додатковій генерації та підвищує гнучкість системи.

Сучасні енергосистеми трансформуються у кіберфізичні комплекси, де ключову роль відіграють цифрові платформи управління.

Типи алгоритмів балансування:

- Rule-based – використовують фіксовані правила, наприклад заряд накопичувачів при надлишку генерації;
- оптимізаційні алгоритми – одночасно враховують технічні, економічні та екологічні критерії;
- AI/ML-алгоритми – здійснюють прогнозування, виявлення аномалій та адаптивне управління.

Ці системи забезпечують високоточне, оперативне та гнучке управління потоками енергії у Smart Grid.

Децентралізовані системи можуть працювати у трьох режимах:

1. Автономний (off-grid) – повна незалежність від мережі.
2. Мережевий (on-grid) – паралельна робота із централізованою енергосистемою.
3. Гібридний – комбінований режим з можливістю автономної роботи при аваріях.

Передача енергії у мережу регулюється економічними моделями:

- Net Metering – залік енергії між генерацією та споживанням;
- Feed-in Tariff (FiT) – гарантована оплата за кожну кВт·год, відпущену в мережу.

Підключення обладнання здійснюється відповідно до міжнародних стандартів, що регламентують вимоги до синхронізації, безпеки, інверторів, якості напруги та частоти.

Ефективне функціонування енергосистеми забезпечується через:

1. Ринок балансуючих потужностей – учасники (генератори, споживачі, агрегатори) надають послуги з регулювання, а ОСП закуповує їх для підтримання частоти.

2. Тарифи на небаланси – вони стимулюють учасників точно прогнозувати свої обсяги. За відхилення від графіка учасник сплачує фінансову компенсацію.

3. Роль оператора системи передачі (ОСП) – ОСП відповідає за:

- технічне управління балансом;
- координацію всіх учасників ринку;
- розрахунок небалансів;
- впровадження стандартів і нормативів;
- розвиток інфраструктури цифрового моніторингу.

Балансування в сучасних енергосистемах набуває стратегічного значення. Це вже не просто технічний процес – він охоплює цифрові, економічні та нормативні аспекти, забезпечуючи стійкість, гнучкість і ефективність енергетичної інфраструктури майбутнього. Завдяки поєднанню гнучкої генерації, накопичувачів, DSM, цифрових систем та ринкових механізмів стає можливою інтеграція великих обсягів ВДЕ та формування повноцінних Smart Grid.

14.3 Виведення надлишкової енергії в мережу (Smart Grid)

Концепція Smart Grid виникла як відповідь на децентралізацію генерації, зростання частки ВДЕ та потребу в цифровізації енергетики. Розумна мережа інтегрує традиційну інфраструктуру з автоматизованими системами керування

та двостороннім обміном даними. Ключові властивості Smart Grid: самодіагностика, інтеграція розподілених джерел, гнучкість, кіберстійкість і активна роль споживача-виробника (prosumer).

Децентралізовані джерела – фотовольтаїка, вітрові турбіни, біомаса, накопичувачі – формують надлишок енергії, який може передаватися в мережу. PV зазвичай створює профіцит удень; вітрові установки – уночі; біомаса генерує надлишок при низькому попиті; накопичувачі стають джерелом профіциту після повного заряду.

Виведення надлишкової енергії є центральним аспектом Smart Grid, що забезпечує ефективну взаємодію генерації зі споживанням. Двосторонній обмін дозволяє користувачам не лише покривати власні потреби, а й передавати енергію в мережу через механізми Net Metering і Feed-in Tariff, підвищуючи енергетичну автономію та гнучкість системи.

Визначення надлишку може бути технічним (перевищення генерації над споживанням, обмеження інверторів, повний заряд батарей, дисбаланси напруги та частоти) або економічним (доцільність продажу енергії). Для безпечної інтеграції профіциту застосовують grid-tie інвертори, що забезпечують синхронізацію, контроль потужності та захист від островного режиму.

Вимоги приєднання: 230/400 В, 49,5–50,5 Гц, THD $\leq$ 5 %, сумісність із автоматикою захисту.

Цифрове керування реалізується через EMS, SCADA, смарт-лічильники та IoT-протоколи (Modbus, MQTT, OPC UA), що забезпечують моніторинг і оптимізацію потоків енергії.

Економічні моделі компенсації:

1. Net Metering – зарахування надлишку як кредиту на майбутнє споживання.
2. Feed-in Tariff – гарантована оплата за передану енергію.
3. Peer-to-peer платформи – локальний обмін енергією з використанням цифрових контрактів.

Профіцит енергії впливає на стабільність мережі: може спричиняти перенапруги, підвищення частоти та перевантаження обладнання. Для балансування використовують акумулятори та Demand Side Management. Накопичувачі згладжують коливання генерації та підтримують частоту, а DSM узгоджує навантаження з доступною генерацією.

Кібербезпека – важливий елемент Smart Grid: використовуються шифрування, автентифікація, сегментація мереж і виявлення аномалій, оскільки порушення роботи інтерфейсів інверторів може спричинити аварії.

Приклади впровадження:

- мікромережі з PV та Net Metering у домогосподарствах, де інтелектуальні лічильники та EMS керують обміном;
- аграрні об'єкти з сезонним профіцитом, що реалізують peer-to-peer продаж або використовують акумуляцію;
- муніципальні проекти з PV, SCADA та накопичувачами, інтегровані в міську мережу через FiT або Net Billing.

Smart Grid формує нову парадигму енергетики, у якій генерація, споживання та керування об'єднані в єдину інтелектуальну, стійку та ефективну систему.

14.4 Прогнозування енергоспоживання на основі погодних даних

Прогнозування енергоспоживання з урахуванням погодних параметрів є одним із ключових інструментів сучасного енергетичного менеджменту, особливо для децентралізованих систем, Smart Grid та мереж із високою часткою ВДЕ. Температура, інсоляція, вологість і швидкість вітру істотно впливають на динаміку споживання як у побутовому, так і в промисловому секторах.

Найбільш значущим параметром є температура: у спеку різко зростає навантаження на системи кондиціонування, а взимку – на опалення та теплові насоси. Сонячна інсоляція визначає як виробіток сонячних електростанцій, так і потреби в освітленні та додатковому нагріванні. Вітровий режим впливає на тепловтрати будівель і роботу вентиляційних систем, а вологість – на експлуатацію кондиціонерів, осушувачів та технологічного обладнання.

Споживання має виражені добові, сезонні та погодні коливання: літні піки припадають на денний час, зимові – на ранкові та вечірні години. Екстремальні явища (спека, морози, бурі) здатні спричинити різкі зміни навантаження, що потребує адаптивних прогнозних моделей.

Для прогнозування використовуються дані:

- метеостанцій – температура, вологість, вітер, опади;
- супутникових платформ (Copernicus, NOAA, MeteoBlue) – хмарність, сонячне випромінювання, вітрові характеристики;
- IoT-сенсорів – локальні параметри мікроклімату в режимі реального часу.

Метододані інтегруються у цифрові системи EMS, SCADA та BMS через API, CSV, JSON або OPC-протоколи. Це забезпечує автоматизовану оптимізацію роботи обладнання, корекцію режимів HVAC та оперативне балансування споживання.

Методи прогнозування енергоспоживання.

1. Статистичні моделі:

- лінійна та множинна регресія;
- кореляційний аналіз.

Вони прості у реалізації, але менш ефективні при складних нелінійних залежностях.

2. Методи машинного навчання:

- штучні нейронні мережі;
- дерева рішень і ансамблеві методи (Random Forest, Gradient Boosting);
- кластеризація споживачів.

ML-алгоритми забезпечують високу точність та здатні працювати з великими часовими рядами.

Гібридні моделі:

Поєднують статистичні підходи з ML-корекцією в реальному часі, враховують календарні фактори та використовують цифрові двійники для моделювання поведінки об'єктів. Це оптимальний варіант для складних енергетичних систем.

Сегментування споживачів.

Різні типи об'єктів мають різну чутливість до погоди:

1. Побутовий сектор – найбільша залежність від температури; пікові навантаження вранці та ввечері.

2. Комерційні об'єкти – значний вплив температури, вологості та інсоляції, високе літнє навантаження на HVAC.

3. Промисловість – складні профілі споживання, залежні від технологій та умов мікроклімату.

4. Аграрний сектор – максимальна залежність від інсоляції, температури, вологості та опадів.

Сегментація дає можливість підвищити точність прогнозів і покращити управління навантаженнями.

Прогнозування, що враховує погодні умови, дозволяє:

- синхронізувати генерацію та споживання;
- зменшувати небаланси та фінансові витрати;
- оптимізувати роботу накопичувачів;
- уникати пікових навантажень;
- готуватися до екстремальних погодних ситуацій.

У системах Smart Grid прогнози напряму використовуються EMS для автоматичної оптимізації режимів роботи обладнання та взаємодії з мережею.

Приклади застосування.

1. Тепличні господарства: використання прогнозу сонячної активності та IoT-сенсорів дає змогу оптимізувати освітлення, вентиляцію та обігрів. Результат – до 20 % економії енергії.

2. Міські системи теплопостачання: прогноз температури на 1–3 доби дозволяє коригувати температуру теплоносія з урахуванням теплової інерційності будівель. Ефект складає 10–15 % економії палива.

3. Офісні будівлі: BMS використовує прогноз високих температур для раннього охолодження та зменшення полуденного піку навантаження. Економія електроенергії складає 15–25 %.

Прогнозування енергоспоживання на основі погодних даних є фундаментальним елементом сучасного енергетичного планування. Воно забезпечує точність балансування, оптимізацію роботи обладнання та підвищення енергоефективності в умовах нестабільних кліматичних впливів і розвитку Smart Grid.

Питання для самоконтролю

1. Які функції виконує інвертор з підтримкою Grid-tie у системі фотовольтаїки?

2. Як акумуляторні системи сприяють балансуванню між генерацією та споживанням у мікромережах?

3. У чому полягає принцип роботи біоенергетичних установок як балансуючих джерел?

4. Які технічні умови повинні бути виконані для безпечного виведення надлишкової енергії в мережу?

5. Поясніть різницю між моделями Net Metering та Feed-in Tariff у контексті компенсації за надлишкову енергію.

6. Які погодні фактори найбільше впливають на енергоспоживання побутових та комерційних об'єктів?

7. Як прогнозування енергоспоживання на основі температури може допомогти в оптимізації роботи систем опалення?

8. Які типи споживачів мають найвищу чутливість до погодних змін і чому?

9. Які цифрові платформи використовуються для інтеграції погодних даних у енергетичне планування?

10. Як гібридні моделі прогнозування поєднують метеоаналіз з історичними даними для точного передбачення навантаження?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21 жовтня 2021 р. № 1818-IX // Відомості Верховної Ради. – 2022. – № 2. – ст. 8. – 28 с.
2. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22 червня 2017 р. № 2118-VIII // Відомості Верховної Ради. – 2017. – № 33. – ст. 359. – 12 с.
3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Чинний від 2022-01-09. – Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. – 27 с.
4. ДБН В.1.2-11:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. – Чинний від 2022-01-09. – Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2021. – 21 с.
5. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. – Чинний від 2023-01-03. – Київ : Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд», 2022. – 63 с.
6. ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015. Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель. – Чинний від 2016-01-01. – Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2015. – 29 с.
7. ДСТУ EN ISO 52000-1:2023. Енергоефективність будівель. Комплексна оцінка енергоефективності будівель. Частина 1. Загальна структура та методики. – Чинний від 2023-01-10. – Київ : Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд», 2023. – 117 с.
8. ДСТУ Б В.2.6-36:2008. Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатурками. Загальні технічні умови. – Чинний від 2009-01-06. – Київ : Технічний комітет стандартизації ТК 305 «Будівельні вироби і матеріали», 2008. – 35 с.
9. Методика визначення енергетичної ефективності будівель [Електрон. ресурс] : Наказ № 169 затв. М-вом розвитку громад та територій України від 11 липня 2018. Зареєстровано у Міністерстві юстиції України 16.07.2018 за № 822/32274. – Чинний від 2018-07-11. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text>, вільний (дата звернення: 05.11.2025). – Назва з екрана.

10. ДСТУ EN ISO 10456:2022. Матеріали та вироби будівельні. Характеристики гігротермічні. Розрахункові значення в таблицях і методики визначення декларативних та розрахункових значень теплових характеристик. – Чинний від 2024-01-05. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2023. – 28 с.
11. ДСТУ Б EN 13163:2012. Матеріали будівельні теплоізоляційні. Вироби зі спіненого полістиролу. Технічні умови. – Чинний від 2013-01-04. – Київ : «НТП-СТАНДАРТ», 2012. – 68 с.
12. ДСТУ EN 13162:2019. Матеріали будівельні теплоізоляційні. Промислові вироби з мінеральної вати. Технічні умови. – Чинний від 2020-01-01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. – 52 с.
13. ДСТУ EN 13914-1:2022. Проектування, готування та нанесення зовнішньої та внутрішньої штукатурки. Частина 1. Зовнішня штукатурка. – Чинний від 2023-31-12. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 72 с.
14. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – Чинний від 2022-01-09. – Київ : Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського (УкрНДІпроектстальконструкція), 2018. – 36 с.
15. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво. – Чинний від 2022-01-07. – Київ : Науково-дослідний інститут будівельного виробництва (НДІБВ), 2014. – 44 с.
16. ДБН В.2.2-15:2019. Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення. – Чинний від 2022-09-01. – Київ : Мінрегіон України, 2019. – 43 с.
17. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Чинний від 2019-03-01. – Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2018. – 137 с.
18. ДСТУ EN ISO 10077-1:2022. Теплотехнічні властивості вікон, дверей і жалюзі. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі. Частина 1. Загальні умови. – Чинний від 2022-07-15. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 89 с.

19. ДСТУ EN 1279-5:2019. Скло в будівництві. Склопакети. Частина 5. Оцінка відповідності. – Чинний від 2020–01–01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. – 46 с.

20. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. – Чинний від 2018–01–07. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 56 с.

21. Теплотехнічне обладнання [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://www.danfoss.com/uk-ua/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

22. Насосне обладнання Wilo [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://wilo.com/ua/uk>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

23. Облік теплової енергії і води. Системи диспетчеризації [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://antap.com.ua/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

24. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Чинний від 2014–01–01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. – 149 с.

25. Український виробник вентиляційного обладнання. ТМ AEROSTAR [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://aerostar.ua/ua>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

26. Електроприводи. Belimo [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://belimo.com.ua/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

27. Електричне обладнання. Shneider Electric [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

28. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. – Чинний від 2020–09–15. – Київ : ТК 48 «Енергозбереження», 2020. – 33 с.

29. Інтелектуальні продукти для виявлення витоків води. StreamLabs [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://streamlabswater.com/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

30. Світовий бренд комплексних рішень для ванної кімнати та кухні. GROHE [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: https://www.grohe.ua/uk_ua/, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

31. Директива Європейського парламенту і Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 року про енергетичні характеристики будівель [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text, вільний (дата звернення: 05.11.2025). – Назва з екрана.

32. ДСТУ EN ISO 10211:2022 Теплові мости в будівництві. Теплові потоки та температури поверхні. Детальні розрахунки. – Чинний від 2023–12–31. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 44 с.

33. ДСТУ EN 308-2001 Теплообмінники. Методи випробовування пристроїв регенерування теплоти повітря-повітря та повітря-відпрацьований газ для визначання експлуатаційних характеристик [Електрон. ресурс]. – Чинний від 2003–07–01. – Електрон. текст. дані. – Київ : Інститут енергетичних досліджень, 2022. – 18 с. – Режим доступу: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU3/dstu_EN_308-2001.pdf, вільний (дата звернення: 05.11.2025). – Назва з екрана.

34. ДСТУ EN 12828:2022 Системи опалення в будівлях. Проектування водяних систем опалення. – Чинний від 2023–12–31. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 84 с.

35. ДСТУ EN 15232-1:2017 Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями. Модулі М10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. – Чинний від 2017–08–01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2017. – 96 с.

36. ДСТУ EN 15193-1:2017 Енергоефективність будівель. Енергетичні вимоги до освітлення. Частина 1. Технічні характеристики, Модуль М9. – Чинний від 2017–12–17. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2017. – 108 с.

37. ДСТУ EN 12831-1:2017 Енергоефективність будівель. Метод розрахунку проектного теплового навантаження. Частина 1. Теплове навантаження, Модуль М3-3. – Чинний від 2017–12–15. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2017. – 108 с.

38. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 Енергетичні показники будівель. Потреби в енергії для опалення та охолодження, внутрішні температури, відчутні та приховані теплові навантаження. Частина 1. Процедури розрахунку. – Чинний від 2023–12–31. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 238 с.

39. ДСТУ EN ISO 52120-1:2022 Енергетичні характеристики будівель. Внесок автоматизації будівель, засобів контролю та управління будівлею. Частина 1. Загальні принципи та процедури. – Чинний від 2023–12–31. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2023. – 108 с.

40. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [Електрон. ресурс] : Наказ № 168 затв. М-вом розвитку громад та територій України від 06 лютого 2025. Зареєстровано у Міністерстві юстиції України 21.02.2025 за № 284/43690. – Чинний від 2025–02–06. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25/ed20250206#Text>, вільний (дата звернення: 05.11.2025). – Назва з екрана.

41. ДСТУ EN 16798-1:2022 Енергетична ефективність будівель. Вентиляція будівель. Частина 1. Вхідні параметри внутрішнього середовища для проектування та оцінювання енергетичної ефективності будівель, що стосуються якості повітря в приміщенні, теплового середовища, освітлення та акустики. Модуль М1-6. – Чинний від 2023–12–31. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 94 с.

42. ДСТУ EN ISO 16890-1:2019 Фільтри повітря для загальної вентиляції. Частина 1. Технічні умови, вимоги та система класифікації на основі ефективності зважених часток. – Чинний від 2020–01–01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. – 38 с.

43. ДСТУ EN 12464-1:2016 Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця. – Чинний від 2017–12–01. – Київ : Технічний комітет стандартизації ТК 137 «Лампи та відповідне обладнання», 2016. – 25 с.

44. ДСТУ EN 12975-2:2019 Установки сонячні термічні та їхні складники. Сонячні колектори. Частина 2. Методи випробувань. – Чинний від 2020–01–01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. – 90 с.

45. ДСТУ EN ISO 9806:2019 Енергія сонячна. Сонячні теплові колектори. Методи випробувань. – Чинний від 2020–01–01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. – 92 с.

46. ДСТУ EN ISO 16484-1:2014 Автоматизовані системи моніторингу та управління будівлями (АСМУБ). Частина 1. Характеристики проекту та реалізація. – Чинний від 2016–01–01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2014. – 32 с.

47. ДСТУ EN 50470-3:2022 Обладнання для вимірювання електроенергії. Частина 3. Особливі вимоги. Статичні лічильники активної енергії змінного струму. – Чинний від 2023–12–31. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 36 с.

48. ДСТУ ISO/IEC 27001:2023 Інформаційна безпека, кібербезпека та захист конфіденційності. Системи керування інформаційною безпекою. Вимоги. – Чинний від 2023–08–22. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 46 с.

49. ДСТУ EN IEC 62443-3-2:2022 Безпека систем промислової автоматизації та управління. Частина 3-2. Оцінювання ризиків безпеки для проектування системи. – Чинний від 2023–12–31. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022. – 88 с.

50. ДСТУ EN 16247-1:2015 Енергетичні аудити. Частина 1. Загальні вимоги. – Чинний від 2017–01–01. – Київ : Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем (ДП «НДІ «Система»), 2015. – 15 с.

51. ДСТУ ISO 19650-1:2020 Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням будівельного інформаційного моделювання. Частина 1. Концепції та принципи. – Чинний від 2020–07–01. – Київ : Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво» (ТК 301), 2020. – 60 с.

52. IEEE Std 1547-2018, «Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces» IEEE Standards Association, New York, NY, USA, 2018. – 27 p.

53. ДСТУ ІЕС 61727:2019 Системи фотоелектричні. Характеристики точок підключення до інженерних мереж. – Чинний від 2020–01–01. – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. – 28 с.

54. Відновлення будинків [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://rehouse.org.ua/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

55. Зелена трансформація України [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://greentransform.org.ua/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

56. Українська енергетика [Електрон. ресурс] : сайт. – Електрон. текст. дані. – Оновлюється постійно. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/>, вільний (дата звернення: 14.11.2025). – Назва з титул. екрана.

57. Немикіна О. В. Поновлювальні та альтернативні джерела енергії : навч. посіб. / О. В. Немикіна ; Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 188 с.

58. Приймак Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи : навч. посіб. / Б. І. Приймак ; Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 310 с.

59. Попов А. О. Теорія сигналів [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / А. О. Попов. – Електрон. текст. дані – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 270 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/33e5168f-721f-49e4-b109-3e42bd7b0a64/content>, вільний (дата звернення: 21.11.2025). – Назва з екрана.

60. Сохіна Ю. В. Теорія автоматичного керування [Електрон. ресурс] : конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Ю. В. Сохіна. – Електрон. текст. дані – Кам’янське, ДДТУ, 2019. – 200 с. – Режим доступу: https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/30/6-30-z_kl34.pdf, вільний (дата звернення: 21.11.2025). – Назва з екрана.

61. Теорія автоматичного керування [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / П. В. Леонтьєв, С. В. Соколов, Г. М. Худолей, В. О. Журба, А. В. Павлов ; за заг. ред. П. В. Леонтьєва. – Електрон. текст. дані – Суми : Сумський державний університет, 2024 – 296 с. – Режим доступу: <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/a6a617d2-40af-4bb6-8532-66f94c22864b>, вільний (дата звернення: 21.11.2025). – Назва з екрана.

62. Шовкалюк М. М. Енергоефективність та енергетична сертифікація будівель. Практикум [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / М. М. Шовкалюк. – Електрон. текст. дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 87 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a56e8485-c804-46df-b3bd-a8d378a48137/content>, вільний (дата звернення: 21.11.2025). – Назва з екрана.

63. Клименко В. В. Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / В. В. Клименко, В. І. Кравченко, Р. В. Телюта. – Електрон. текст. дані. – Кропивницький : ПП Ексклюзив-Систем, 2020. – 219 с. – Режим доступу: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050846.pdf>, вільний (дата звернення: 21.11.2025). – Назва з екрана.

64. Жесан Р. В. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії [Електрон. ресурс] : конспект лекцій з навчальної дисципліни «Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії» для студентів 4 курсу спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Р. В. Жесан, О. П. Голик. – Електрон. текст. дані. – Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – 62 с. – Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/6efe72ea-b516-4b1c-96ea-9d3c125ebd34/content>, вільний (дата звернення: 21.11.2025). – Назва з екрана.

Електронне навчальне видання

ГВОЗДЕЦЬКИЙ Олександр Вадимович,
ТКАЧЕНКО Роман Борисович,
БУРДА Юрій Олександрович

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СИСТЕМАХ
ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання
зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія,
галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво,
освітня програма «Промислове та цивільне будівництво»,
«Цивільна інженерія»)*

Відповідальний за випуск *О. В. Гвоздецький*
Редактор *О. В. Михаленко*
Комп'ютерне верстання *О. В. Гвоздецький, І. В. Волосожарова*

План 2026, поз. 24Л

Підп. до друку 20.03.2026. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 11,6.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 8386 від 14.07.2025.