

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

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

**«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ
В СИСТЕМАХ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД»**

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

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026

Методичні рекомендації до проведення практичних занять та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Інтелектуальні системи енергоспоживання в системах життєзабезпечення будівель і споруд» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво, освітні програми «Промислове та цивільне будівництво», «Цивільна інженерія») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. В. Гвоздецький, Р. Б. Ткаченко, Ю. О. Бурда. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 108 с.

Укладачі: 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 Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.....	5
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 1.....	10
2 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС БУДІВЛІ	11
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 2.....	16
3 ПАСИВНІ ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	17
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 3.....	19
4 АКТИВНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ.....	23
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 4.....	30
5 ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.....	31
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 5.....	37
6 АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ТА ЙОГО ФУНКЦІЇ	38
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 6.....	45
7 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	46
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 7.....	50
8 АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	51
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 8.....	58
9 КЛАСИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ.....	59
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 9.....	61
10 КОНЦЕПЦІЇ БУДІВЕЛЬ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ.....	65
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 10.....	68
11 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (BMS) У NZEB.....	69
12 ІНТЕГРАЦІЯ BMS З АКТИВНИМИ ТА ПАСИВНИМИ СИСТЕМАМИ	71
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 12.....	79
13 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ І АНАЛІТИКА.....	82
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 13	89
14 ВЗАЄМОДІЯ З ЗОВНІШНІМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ТА МЕРЕЖОЮ....	90
ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 14.....	96
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	97
ДОДАТОК А	104
ДОДАТОК Б.....	107

ВСТУП

Інтелектуальні системи енергоспоживання забезпечують ефективне використання ресурсів у будівлях шляхом автоматизації та оптимізації їх роботи. Вони дозволяють зменшити втрати енергії завдяки автоматичному вимкненню непотрібних приладів, регулюванню параметрів мікроклімату та врахуванню зовнішніх чинників, зокрема погодних умов. Це дає змогу досягати високого рівня енергоефективності без значних зусиль з боку користувача. У сучасних умовах проблема енергозбереження набуває особливої актуальності, оскільки зростає потреба у зниженні витрат на енергоресурси та підвищенні екологічності житлових і громадських будівель. Використання інноваційних технологій та автоматизованих рішень робить процес управління енергоспоживанням більш зручним, гнучким і контрольованим.

Досягнення високої енергоефективності потребує комплексного підходу, що поєднує інтелектуальні системи з енергоощадними рішеннями будівлі. Використання відновлюваних джерел енергії та ефективних конструкцій знижує витрати, а автоматизація на базі сенсорів і контролерів оптимізує споживання ресурсів, зокрема через автоматичне вимкнення освітлення. Крім того, системи можуть регулювати роботу опалення, вентиляції та кондиціонування залежно від умов експлуатації. Це дозволяє уникати перевитрат енергії та підтримувати комфортний мікроклімат. Важливим є також моніторинг і аналіз споживання, що дає змогу своєчасно виявляти неефективності. У результаті підвищується загальна енергоефективність будівлі та зменшуються експлуатаційні витрати.

Інтелектуальні технології також передбачають аналіз даних і прийняття рішень на основі отриманої інформації. Це можуть бути як прості алгоритми, так і більш складні моделі, зокрема з використанням елементів машинного навчання. Наприклад, сучасні термостати здатні вивчати поведінку користувачів і автоматично налаштовувати температурний режим, забезпечуючи комфортні умови проживання при мінімальному енергоспоживанні. Таким чином, поєднання автоматизації, аналітики та інноваційних технологій створює передумови для формування енергоефективного та екологічно безпечного середовища.

У межах практичних занять здобувачі набувають знань про принципи функціонування систем керування енергоспоживанням у будівлях. У результаті формується практичне розуміння ролі інтелектуальних технологій у підвищенні енергоефективності будівель і оптимізації витрат енергоресурсів.

1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Мета заняття – сформувати у студентів розуміння енергоспоживання як комплексної системи та навчити застосовувати системний аналіз для оцінки та підвищення енергоефективності будівель.

Теоретичні положення. У сфері енергоефективності будівель система розглядається як сукупність пов'язаних між собою елементів, що разом забезпечують вироблення, передачу, розподіл, споживання та контроль енергії. До такої системи належать інженерні підсистеми (опалення, вентиляція, кондиціонування, освітлення, ГВП), огорожувальні конструкції, джерела енергії, користувачі та засоби управління.

Кожна складова має власні параметри та впливає на інші, що дозволяє оцінювати енергоспоживання будівлі комплексно. Системний підхід передбачає аналіз будівлі як цілісного об'єкта, де ключову роль відіграє взаємодія підсистем. Наприклад, покращення теплоізоляції без урахування роботи вентиляції може негативно позначитися на мікрокліматі.

Системний аналіз – це метод дослідження енергетичних процесів із урахуванням усіх взаємозв'язків, зовнішніх умов і характеристик елементів. Його завдання – оптимізувати споживання енергії, визначити слабкі ланки та знайти резерви енергозбереження. Основні етапи включають постановку мети, визначення меж аналізу, збір даних, побудову енергетичної моделі, оцінку взаємодії підсистем, розробку варіантів підвищення ефективності та формування рекомендацій.

Застосування системного аналізу допомагає обирати оптимальні технічні та організаційні рішення, уникати суперечностей між підсистемами, підвищувати ефективність експлуатації будівель і обґрунтовувати інвестиції. Він формує наукову основу для проєктування, модернізації та управління енергоспоживанням будівель.

У сучасних умовах розвитку енергоефективних технологій головним чинником енергозбереження в будівлях є забезпечення високої здатності конструкцій утримувати тепло. Це пов'язано з тим, що витрати на теплопостачання значно перевищують витрати на освітлення, електроживлення та вентиляцію, тому саме збереження теплової енергії визначає ефективність усіх інших інженерних систем.

Для раціонального використання енергоресурсів застосовується широкий спектр технічних рішень та матеріалів, а важливою передумовою їхнього вибору є опанування теоретичних засад енергозбереження. Системи теплопостачання є найбільш енергоємними, тому в будівельній галузі активно

впроваджуються програми модернізації та технології, спрямовані на скорочення теплових втрат і підвищення ефективності їх роботи.

Основні заходи з економії теплової енергії включають:

- утеплення огорожувальних конструкцій (стіни, дахи, підвали);
- модернізацію вікон і дверей для зменшення інфільтраційних втрат;
- оптимізацію площі скління;
- встановлення тепловідбивних екранів за радіаторами;
- регулювання температури у нічний та неробочий час, що дає економію 5–10 %;
- оснащення теплових пунктів високоефективним обладнанням;
- впровадження систем моніторингу споживання тепла.

Найбільша частка енергоспоживання припадає на опалення, тоді як інші витрати пов'язані з виробництвом будівельних матеріалів та виконанням робіт. Для зменшення енерговитрат запроваджено оновлені вимоги до теплозахисту, що передбачають підвищення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій та зниження тепловтрат.

Проблема енергоефективності актуальна не лише для нового будівництва, а й для модернізації існуючих будівель, які часто не відповідають сучасним стандартам. Підвищення теплозахисних властивостей матеріалів та впровадження регульованих систем опалення дають змогу суттєво зменшити енергоспоживання в експлуатованих будівлях.

Під час термомодернізації важливу роль відіграють архітектурні та фасадні рішення, які повинні поєднувати естетику з високим рівнем теплозахисту. Оскільки такі роботи потребують значних ресурсів, вони мають виконуватися на основі професійно розроблених проєктів.

У міжнародній практиці модернізація будівель, особливо щодо покращення теплозахисних характеристик, є поширеним напрямом. Це зумовлено регулярним посиленням нормативів і впровадженням нових технологій, спрямованих на відновлення та підвищення теплоізоляційних властивостей конструкцій, зведених за застарілими будівельними нормами.

Приклад «Аналізу енергоспоживання житлового будинку».

Вихідні дані:

- житловий будинок;
- огорожувальні конструкції та втрати:
 - стіни – теплоізоляція непередбачена, втрати – 40 %;
 - вікна та двері – двокамерні склопакети, втрати – 20 %;
 - підлога – теплоізоляція непередбачена, втрати – 10 %;

- покрівля – утеплення мінеральною ватою, товщиною 100 мм, втрати – 15 %;
- система вентиляції без рекуперації, з втратами 15 %;
- система опалення – децентралізована:
 - газовий котел ККД 75 %, втрати – 15 %;
 - нагрівальні прилади конвектора «Акорд», втрати – 10 %;
 - термостатичні елементи на нагрівальних приладах – відсутні;
- освітлення – лампи накаливання, втрати – 12 %.

Завдання: провести аналіз втрат, надати рекомендації щодо підвищення енергоефективності, надати порівняльну діаграму теплових втрат до та після проведення термомодернізації будинку.

Відповідь.

1. Аналіз втрат.

1.1. Стіни – відсутність теплоізоляції призводить до високих тепловтрат.

1.2. Вікна – двокамерні склопакети є енергоефективнішими за старі вікна, але все ще суттєво пропускають теплову енергію.

1.3. Підлога – відсутність теплоізоляції призводить до високих тепловтрат.

1.4. Покрівля – утеплення 100 мм є недостатнім для сучасних норм (потрібно 200–250 мм).

1.5. Вентиляція – природна вентиляція без рекуперації виводить тепле повітря назовні.

1.6. Опалення – котел має низький ККД; нагрівальні прилади конвектора «Акорд» мають низький ККД та зазвичай використовуються у централізованих системах опалення, з підвищеною температурою теплоносія; відсутність термостатичних елементів на нагрівальних приладах не дає можливості приладового регулювання, що може привести к недогріву одних приміщень та перегріву інших.

1.7. Освітлення – лампи накаливання споживають більшу кількість електроенергії.

2. Рекомендації щодо підвищення енергоефективності

2.1. Модернізація огорожувальних конструкцій:

- утеплення стін;
- утеплення покрівлі;
- утеплення підлоги;
- заміна склопакетів з більшою кількістю камер та трійним склінням.

Після термомодернізації частка тепловтрат зазвичай суттєво знижується – умовні орієнтири для типового житлового будинку:

А. Стіни – середня термомодернізація (утеплення 100–150 мм, усунення містків холоду, ущільнення вікон): стіни $\approx$ 12–20 %.

Б. Покрівля – середня модернізація (утеплення 150–250 мм, усунення містків холоду): $\approx$ 4–10 %.

В. Підлога – середня модернізація (утеплення підлоги на місці / по перекриттю, ізоляція підвалу): $\approx$ 2–6 %.

Г. Вікна – Глибока модернізація (триплекс / пасивні склопакети, мінімізація мостів холоду, оптимізація площі скління): $\approx$ 5–10 %.

2.2. Модернізація системи опалення:

- заміна газового котла на котел конденсаційний з ККД 95–98 %;
- заміна нагрівальних приладів з більшою тепловіддачею та ККД (наприклад, біметалеві радіатори);
- встановлення термостатичних клапанів з терморегуляторними головками на нагрівальних приладах.

2.3. Модернізація системи вентиляції:

- встановлення рекуператора у системі вентиляції;
- встановлення датчиків (сенсорів) присутності людей.

2.4. Модернізація освітлення:

- заміна ламп накаливання на сучасні світлодіодні лампи (LED);
- встановлення датчиків «руху» або присутності.

Порівняльна діаграма теплових втрат до та після проведення термомодернізації будинку наведено на рисунку 1.1.

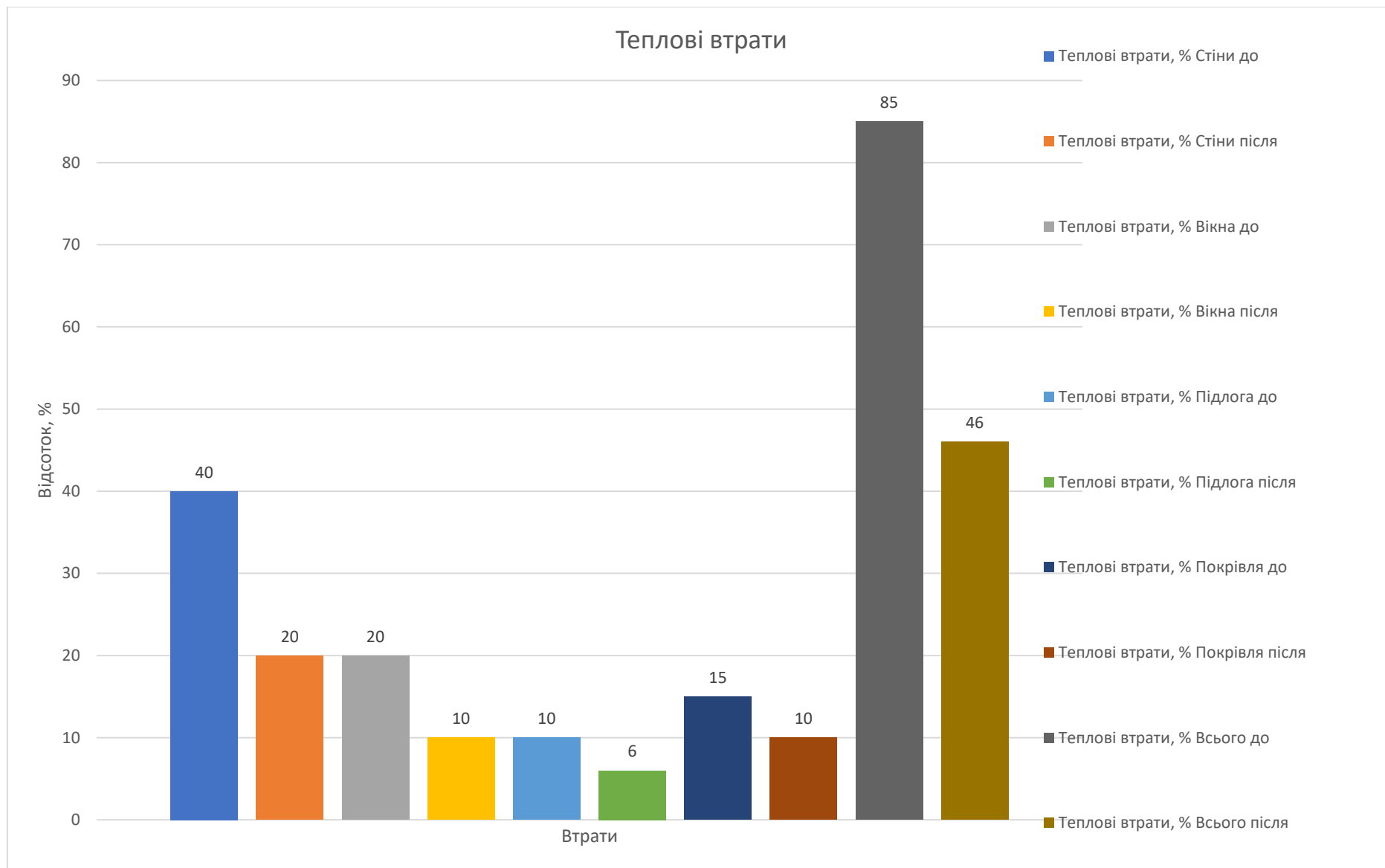


Рисунок 1.1 – Порівняльна діаграма теплових до та після термомодернізації

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 1

Відповідно до даних таблиці 1.1 провести аналіз втрат, надати рекомендації щодо підвищення енергоефективності, надати порівняльну діаграму теплових втрат до та після проведення термомодернізації будинку.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	Втрати, %								Рекуперація	Опалення			Освітлення ²
	Стіни		Вікна		Покрівля		Підлога			ККД котла, %	Нагрівальні прилади ¹	Наявність Термостатичних елементів	
	До	Після	До	Після	До	Після	До	Після					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	35	12	20	10	20	10	10	6	Так	75	1	Так	1
2	36	13	21	9	19	9	9	5	Ні	80	2	Ні	2
3	37	14	22	8	18	8	8	4	Так	85	3	Ні	1
4	38	15	23	7	17	7	7	3	Ні	90	1	Так	2
5	39	16	24	6	16	6	6	2	Так	92	2	Ні	1
6	40	17	25	5	15	5	5	6	Ні	95	3	Ні	2
7	41	18	26	10	14	4	10	5	Так	98	1	Так	1
8	42	19	27	9	13	10	9	4	Ні	75	2	Ні	2
9	43	20	28	8	12	9	8	3	Так	80	3	Ні	1
10	44	12	29	7	11	8	7	2	Ні	85	1	Так	2
11	45	13	30	6	10	7	6	6	Так	90	2	Ні	1
12	35	14	21	5	20	6	5	5	Ні	92	3	Ні	2
13	36	15	22	10	19	5	10	4	Так	95	1	Так	1
14	37	16	23	9	18	4	9	3	Ні	98	2	Ні	2
15	38	17	24	8	17	10	8	2	Так	75	3	Ні	1
16	39	18	25	7	16	9	7	6	Ні	80	1	Так	2
17	40	19	26	6	15	8	6	5	Так	85	2	Ні	1
18	41	20	27	5	14	7	5	4	Ні	90	3	Ні	2
19	42	12	28	10	13	6	10	3	Так	92	1	Так	1
20	43	13	29	9	12	5	9	2	Ні	95	2	Ні	2
21	44	14	30	8	11	4	8	6	Так	98	3	Ні	1
22	45	15	21	7	10	10	7	5	Ні	75	1	Так	2
23	35	16	22	6	20	9	6	4	Так	80	2	Ні	1
24	36	17	23	5	19	8	5	3	Ні	85	3	Ні	2
25	37	18	24	10	18	7	10	2	Так	90	1	Так	1
26	38	19	25	9	17	6	9	6	Ні	92	2	Ні	2

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
27	39	20	26	8	16	5	8	5	Так	95	3	Ні	1
28	40	12	27	7	15	4	7	4	Ні	98	1	Так	2
29	41	13	28	6	14	10	6	3	Так	75	2	Ні	1
30	42	14	29	5	13	9	5	2	Ні	80	3	Ні	2
Примітка. - Нагрівальні прилади: - конвектор «Акорд»; - біметалевий радіатор; - алюмінієвий радіатор. - Лампи освітлення: - світлодіодні лампи; - лампи накаливання.													

2 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС БУДІВЛІ

Мета заняття – сформувати у студентів компетентності щодо ідентифікації та аналізу складових тепловтрат і теплоприбутків будівлі, здійснення оцінки теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій та практичного застосування методики розрахунку загального енергетичного балансу будівлі.

Теоретичні положення. Внутрішнє середовище приміщень формується під впливом природних і антропогенних факторів, що визначають мікроклімат і безпеку людини. До природних чинників належать температура, вологість, рух повітря, сонячна радіація та електромагнітні поля. Додатковий вплив створюють технічні пристрої й побутова діяльність, що супроводжуються тепловиділенням, шумом, вібраціями та токсичними домішками. Регуляція цих компонентів відповідно до санітарних норм є ключем до безпечного мікроклімату.

Оптимальні умови перебування забезпечуються підтриманням нормативних параметрів температури, вологості, повітрообміну та освітлення. Вимоги визначаються функціями приміщення і характером діяльності, а якісне регулювання сприяє збереженню здоров'я, продуктивності та охороні праці. Мікроклімат формується взаємодією зовнішніх кліматичних умов і внутрішніх теплових та газових виділень. Основними керованими показниками є температура, вологість і швидкість руху повітря, що регулюються системами опалення, вентиляції та кондиціонування. На тепловий комфорт також впливають температура поверхонь і терморегуляція людини, пов'язана з

одягом. Комплексне керування цими факторами поєднує комфорт і енергоефективність.

Енергоспоживання будівель залежить від температури, стану огорожувальних конструкцій, вологості й чистоти повітря. Системи мають забезпечувати нормативні умови в робочій зоні при мінімальних витратах енергії. Комфорт досягається, коли людина не відчуває перегріву чи холоду, а системи працюють узгоджено. Приміщення з низьким тепловиділенням потребують додаткового обігріву взимку, а вирівнювання температури забезпечує раціональний повітрообмін.

Енергетичний баланс визначається співвідношенням теплоприбутків і тепловтрат. Втрати виникають через слабку теплоізоляцію, інфільтрацію та вентиляцію без рекуперації, а прибутки – завдяки сонячній радіації, побутовим приладам і присутності людей. Основні джерела тепловтрат: огорожувальні конструкції, інфільтрація, вентиляція без рекуперації, випромінювання через прозорі поверхні та низький опір матеріалів. Джерела теплоприбутків: сонячна радіація, прилади, люди, технологічні процеси та освітлення.

Глобальна енергетична криза загострила проблему низької енергоефективності будівель. Оскільки опалення становить найбільшу частку енергоспоживання, країни переглянули норми й підвищили вимоги до теплозахисту у 2–3,5 рази. Це скорочує тепловтрати, зменшує залежність від імпорту енергоносіїв і витрати на експлуатацію. В Україні нормативний опір теплопередачі зовнішніх стін зріс з $2,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ у 2010 році до $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ у чинній редакції [3]. Опір теплопередачі (R) визначає здатність конструкції утримувати тепло: чим більше значення R , тим менші втрати.

$$Q = (A \cdot \Delta T)/R = A \cdot U \cdot \Delta T, \quad (2.1)$$

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

A – площа огорожувальної конструкції, м^2 ;

ΔT – різниця температур, К;

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

Підвищення енергоефективності досягається застосуванням якісних утеплювачів і оздоблювальних шарів, що зберігають фасад. Термомодернізація включає утеплення перегородок, заміну вікон і дверей, герметизацію швів та оптимізацію вентиляції. Її проведення має враховувати призначення приміщень і тепловологісні умови, інакше можливі конденсат, надмірна вологість і погіршення мікроклімату.

Промерзання стін виникає через теплові «мости», слабку теплоізоляцію, заміну матеріалів чи відсутність вентиляції. Для запобігання застосовують

зовнішнє або внутрішнє утеплення. Внутрішнє використовують лише за неможливості зовнішнього, адже воно зменшує площу, потребує пароізоляції та може зміщувати точку роси. Його переваги – виконання робіт у будь-який сезон і відсутність захисту від атмосферних впливів.

Зовнішнє утеплення є найефективнішим: створює теплову оболонку, усуває містки холоду, не потребує пароізоляції, захищає стики, підвищує довговічність і не зменшує площу. Нормативи рекомендують саме цей спосіб, а внутрішній – лише у виняткових випадках (наприклад, пам'ятки архітектури).

Енергетичний баланс будівлі – це співвідношення між надходженням, споживанням і втратами енергії через конструкції, вентиляцію та інфільтрацію. Він визначає клас енергоефективності та заходи з енергозбереження. Баланс показує, скільки енергії потрібно для мікроклімату (опалення, охолодження, вентиляція, ГВП, освітлення), яку будівля отримує із зовнішніх джерел, генерує всередині та втрачає.

Основні елементи:

- тепловтрати (стіни, вікна, покрівля, підлога, вентиляція, інфільтрація);
- теплоприбутки (сонячна радіація, люди, прилади, освітлення);
- споживання енергії системами опалення, охолодження, вентиляції, ГВП, освітлення;
- втрати в мережах (трубопроводи, теплообмінники, обладнання);
- внесок ВДЕ (сонячні колектори, насоси, фотоелектричні системи).

Баланс визначають на місячній, сезонній чи річній основі з урахуванням клімату, експлуатації, характеристик конструкцій та ефективності обладнання. Розрахунок здійснюється за стандартизованими методиками, закріпленими у нормативах [5, 6, 7].

Результатом є питомі показники енергоспоживання ($\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік}$), що використовуються для присвоєння будівлі енергетичного сертифіката та встановлення класу енергоефективності (A–G). Це дає можливість порівнювати будівлі, планувати термомодернізацію та обґрунтовувати інвестиції в енергоощадні технології.

Клас енергоефективності визначають за показником ΔEP , %, який розраховують за формулою:

$$\Delta EP = \frac{EP_{use} - EP_p}{EP_p} \cdot 100, \quad (2.2)$$

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.

Загальний показник питомого енергоспоживання EP_{use} визначають за формулою:

$$EP_{use} = EP_{H,use} + EP_{C,use}, \quad (2.3)$$

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

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

Приклад розрахунку теплового балансу.

Вихідні дані:

- житловий будинок;
- м. Харків;
- об'єм будинку $V = 250 \text{ м}^3$;
- площа зовнішніх стін $A_c = 120 \text{ м}^2$;
- площа віконних прорізів $A_v = 20 \text{ м}^2$;
- площа покрівлі $A_{пок} = 100 \text{ м}^2$;
- площа підлоги $A_{під} = 100 \text{ м}^2$;
- термічний опір конструкцій:
 - стіни $R_c = 4 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$;
 - вікна $R_v = 0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$;
 - покрівля $R_{пок} = 4,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$;
 - підлога $R_{під} = 2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$;
- температура внутрішнього повітря $t_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- кратність повітрообміну $K = 0,5$;
- теплоємність повітря $c = 0,335 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;
- питома інсоляція взимку $Q_i = 20 \text{ Вт/м}^2$;
- теплоприбутки через тепловиділення (люди, прилади) $Q_m = 250 \text{ Вт}$.

Рішення:

1. Відповідно до даних таблиці А.1 (дод. А) визначаємо середню температуру зовнішнього повітря за опалювальний період, яка для м. Харкова складає $t_{сеп} = -1 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Визначаємо температури повітря у Кельвінах:

2.1. Температура зовнішнього повітря: $-1 + 273,15 = 272,15 \text{ К}$;

2.2. Температура внутрішнього повітря: $20 + 273,15 = 293,15 \text{ К}$;

2.3. Різниця температур: $\Delta T = 293,15 - 272,15 = 21 \text{ К}$.

3. За формулою 2.1 визначаємо теплові втрати огорожувальними конструкціями:

3.1. Стіни

$$Q_c = \frac{120 \times 21}{4} = 630 \text{ Вт.}$$

3.2. Вікна

$$Q_v = \frac{20 \times 21}{0,9} \approx 467 \text{ Вт.}$$

3.3. Покрівля

$$Q_{\text{пок}} = \frac{100 \times 21}{4,5} \approx 467 \text{ Вт.}$$

3.4. Підлога

$$Q_{\text{під}} = \frac{100 \times 21}{2,5} = 840 \text{ Вт.}$$

3.5. Сумарні втрати

$$Q_{\text{ск}} = Q_c + Q_v + Q_{\text{пок}} + Q_{\text{під}} = 630 + 467 + 467 + 840 = 2\,404 \text{ Вт.}$$

4. Визначаємо теплові втрати на вентиляцію, за формулою:

$$Q_v = c \cdot V \cdot K \cdot \Delta T = 0,335 \times 250 \times 0,5 \times 21 \approx 879,4 \text{ Вт.}$$

5. Визначаємо сумарні втрати системою вентиляції та огорожувальними конструкціями:

$$Q_{\Sigma \text{втр}} = Q_v + Q_{\text{ск}} = 879,4 + 2\,404 = 3\,283,4 \text{ Вт.}$$

6. Визначаємо теплоприбутки завдяки інсоляції:

$$Q_{\text{ін}} = Q_i \cdot A_v = 20 \times 20 = 400 \text{ Вт.}$$

7. Визначаємо загальні теплоприбуткі:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{ін}} + Q_t = 400 + 250 = 650 \text{ Вт.}$$

8. Визначаємо необхідну середню кількість теплової потужності для підтримання температури внутрішнього повітря +20 °C за заданих умов:

$$Q_{\text{сер}} = Q_{\Sigma \text{втр}} - Q_{\text{заг}} = 3\,283,4 - 650 = 2\,633,4 \text{ Вт.}$$

9. Визначаємо необхідну максимальну кількість теплової потужності для підтримання температури внутрішнього повітря +20 °С за заданих умов:

$$Q_{max} = Q_{сер} \cdot \frac{(t_i - t_o)}{(t_i - t_{сер})} = 2\,633,4 \cdot \frac{20 + 23}{20 + 1} = 5\,392,2 \text{ Вт},$$

де t_o – розрахункова опалювальна температура зовнішнього повітря, яку приймаємо відповідно даних таблиці А.2 (дод. А).

Відповідь: Необхідна максимальна кількість теплової потужності за опалювальний період складає 5,39 кВт.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 2

Відповідно до даних таблиці 2.1 визначити необхідну максимальну теплову потужність системи опалення житлового будинку, якщо теплоємність повітря складає 0,335 Вт · год/(м³ · К)

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	Місто	V, м³	A _с , м²	A _в , м²	A _{пок} , м²	A _{під} , м²	R _с , м²·К/Вт	R _в , м²·К/Вт	R _{пок} , м²·К/Вт	R _{під} , м²·К/Вт	t _i , °С	К	Q _i , Вт/м²	Q _т , Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Вінниця	210	105	21	84	84	2,6	0,4	4,0	2,0	18	0,5	20	200
2	Дніпро	220	110	22	88	88	2,7	0,5	4,1	2,1	19	0,6	21	205
3	Донецьк	230	115	23	92	92	2,8	0,6	4,2	2,2	20	0,7	22	210
4	Житомир	240	120	24	96	96	2,9	0,7	4,3	2,3	21	0,8	23	215
5	Запоріжжя	250	125	25	100	100	3,0	0,8	4,4	2,4	22	0,5	24	220
6	Івано-Франківськ	260	130	26	104	104	3,1	0,9	4,5	2,5	18	0,6	25	225
7	Київ	270	135	27	108	108	3,2	0,4	4,6	2,6	19	0,7	26	230
8	Кропивницький	280	140	28	112	112	3,3	0,5	4,7	2,7	20	0,8	27	235
9	Кривий Ріг	290	145	29	116	116	3,4	0,6	4,8	2,8	21	0,5	28	240
10	Луганськ	300	150	30	120	120	3,5	0,7	4,9	2,9	22	0,6	29	245
11	Луцьк	310	155	31	124	124	3,6	0,8	5,0	3,0	18	0,7	30	250
12	Львів	320	160	32	128	128	3,7	0,9	5,1	2,0	19	0,8	20	255
13	Миколаїв	330	165	33	132	132	3,8	0,4	5,2	2,1	20	0,5	21	260
14	Одеса	340	170	34	136	136	3,9	0,5	5,3	2,2	21	0,6	22	265
15	Полтава	350	175	35	140	140	4,0	0,6	5,4	2,3	22	0,7	23	270
16	Рівне	360	180	36	144	144	2,6	0,7	5,5	2,4	18	0,8	24	200
17	Ромни	210	110	28	86	86	2,7	0,8	5,6	2,5	19	0,5	25	205
18	Сімферополь	220	115	29	90	90	2,8	0,9	5,7	2,6	20	0,6	26	210
19	Суми	230	120	30	94	94	2,9	0,4	5,8	2,7	21	0,7	27	215
20	Тернопіль	240	125	31	98	98	3,0	0,5	5,9	2,8	22	0,8	28	220

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
21	Ужгород	250	130	32	102	102	3,1	0,6	6,0	2,9	18	0,5	29	225
22	Умань	260	135	33	106	106	3,2	0,7	4,0	3,0	19	0,6	30	230
23	Феодосія	270	140	34	110	110	3,3	0,8	4,1	2,0	20	0,7	20	235
24	Харків	280	145	35	114	114	3,4	0,9	4,2	2,1	21	0,8	21	240
25	Херсон	290	150	36	118	118	3,5	0,4	4,3	2,2	22	0,5	22	245
26	Хмельницький	300	155	37	122	122	3,6	0,5	4,4	2,3	18	0,6	23	250
27	Черкаси	310	160	38	126	126	3,7	0,6	4,5	2,4	19	0,7	24	255
28	Чернівці	320	165	39	130	130	3,8	0,7	4,6	2,5	20	0,8	25	260
29	Чернігів	330	170	40	134	134	3,9	0,8	4,7	2,6	21	0,5	26	265
30	Ялта	340	180	41	138	138	4,0	0,9	4,8	2,7	22	0,6	27	270

Примітка.

V – об’єм будинку; A_c – площа зовнішніх стін; A_v – площа віконних прорізів; $A_{пок}$ – площа покрівлі; $A_{під}$ – площа підлоги; R_c – термічний опір стіни; R_v – термічний опір вікна; $R_{пок}$ – термічний опір покрівлі; $R_{під}$ – термічний опір підлоги; t_i – температура внутрішнього повітря; K – кратність повітрообміну; Q_i – питома інсоляція взимку; Q_T – теплоприбутки через тепловиділення (люди, прилади).

3 ПАСИВНІ ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Мета заняття – закріпити знання про пасивні методи підвищення енергоефективності будівель шляхом аналізу матеріалів, планувальних рішень та сучасних огорожувальних конструкцій.

Теоретичні положення. У процесі експлуатації конструкції теплозахисту діють зовнішні (сонячна радіація, опади, вітер, температурні й вологісні коливання, хімічні та біологічні фактори) та внутрішні чинники (механічні навантаження, зміни мікроклімату, морозне обдимання, сейсмічні хвилі). Довговічність визначається здатністю протистояти цим впливам і відповідати вимогам міцності, герметичності та ремонтпридатності. Елементи мають бути вогнестійкими, стійкими до зволоження й пошкоджень, придатними до серійного виробництва, транспортування та простого монтажу.

Теплоізоляційні матеріали утримують тепло завдяки комірчастій структурі. Оптимальна щільність забезпечує низьку теплопровідність і стійкість до деформацій. У будівництві застосовують легкі бетони, «теплі» розчини, органічні, мінераловатні, скловолокнисті, полімерні та композиційні утеплювачі. Найпоширеніші в термомодернізації – пінополістирол, пінополіуретан, мінеральна вата й скловолокно. Товщина шару визначається нормативними розрахунками.

Системи теплозахисту класифікують за розташуванням ізоляції (зовнішнє/внутрішнє), типом матеріалу (мінеральний, полімерний, органічний,

композиційний) та видом захисного шару (штукатурка, облицювання, вентиляований фасад). Технології монтажу залежать від матеріалів: штукатурні методи для розчинів і легких бетонів, плитні утеплювачі кріплять стрижнями, мінераловатні плити – на напрямні. Захисно-декоративні покриття виконують цементними чи полімерними сумішами або облицювальними панелями.

Проектування систем теплозахисту включає чотири етапи:

1. Попередня оцінка доцільності та аналіз стану будівлі.
2. Технічне обстеження конструкцій і матеріалів.
3. Розробка рішень щодо утеплювача, монтажу та захисного шару.
4. Підготовка робочої документації, кошторису й організації робіт.

Архітектурне проектування враховує орієнтацію будівлі, що впливає на мікроклімат, енергоефективність та освітлення. Житлові й робочі приміщення орієнтують на південь чи південний схід, допоміжні – на північ. Для нормативної інсоляції застосовують сонцезахисні елементи, оптимальні відстані між будівлями та планування.

Світлопрозорі конструкції (вікна, балкони) займають до 50 % площі стін і мають забезпечувати теплоізоляцію, освітлення та комфорт. Взимку вони зберігають тепло й пропускають сонячну енергію, влітку – захищають від перегріву. Використовують енергоощадні склопакети, багатокамерні профілі, сонцезахисне скління та вентиляційні клапани.

До 30 % тепловтрат припадає на вікна, тому їх модернізація є ключовою для енергоефективності. Сучасні конструкції виготовляють з деревини, ПВХ, алюмінію або комбінованих систем, оснащують багатофункціональними склопакетами. Висока герметичність потребує контрольованої вентиляції з рекуперацією. Поєднання енергоощадного скління та вентиляції забезпечує теплозахист, акустичний комфорт і відповідність стандартам сталого будівництва (BREEAM, LEED, DGNB).

Приклад визначення товщини теплової ізоляції.

Вихідні дані:

- житловий будинок, м. Запоріжжя;
- стіна – силікатна цегла, кладка в півтора цеглі (товщина $\delta_s = 0,18$ м);
- коефіцієнт теплопровідності $\lambda_s = 0,7$ Вт/(м · К).

Завдання. Визначити товщину наступних видів теплової ізоляції:

- мінеральна (базальтова) вата, з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_m = 0,038$ Вт/(м · К);
- EPS (експандований пінополістирол), з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{EPS} = 0,036$ Вт/(м · К);
- целюлозна ековата, з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{ce} = 0,04$ Вт/(м · К).

Рішення.

1. Відповідно до даних рисунку А.1 (дод. А) визначаємо температурну зону, в якій розташовано м. Запоріжжя – II зона.

2. Відповідно до даних таблиці Б.1 (дод. Б) визначаємо мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції житлового будинку $R_{min} = 3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

3. Обчислюємо тепловий опір самої кладки (шар цегли):

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s} = \frac{0,18}{0,7} = 0,257 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

4. Знаходимо додатковий опір, який потрібно забезпечити утепленням:

$$R_{\text{дод}} = R_{min} - R_s = 3,5 - 0,257 = 3,243 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

5. Для кожного утеплювача знаходимо необхідну товщину:

- мінеральна (базальтова) вата:

$$\delta_m = R_{\text{дод}} \cdot \lambda_m = 3,243 \times 0,038 = 0,123 \text{ м}.$$

- EPS (експандований пінополістирол):

$$\delta_{\text{EPS}} = R_{\text{дод}} \cdot \lambda_{\text{EPS}} = 3,243 \cdot 0,036 = 0,1167 \text{ м}.$$

- целюлозна ековата:

$$\delta_{\text{се}} = R_{\text{дод}} \cdot \lambda_{\text{се}} = 3,243 \times 0,04 = 0,1297 \text{ м}.$$

Відповідь: товщина теплової ізоляції мінеральна (базальтова) вата складає 123 мм, EPS – 117 мм, целюлозна ековата – 130 мм.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 3

Задача 1. Відповідно до даних таблиці 3.1 визначити товщину теплової ізоляції.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	Місто	Матеріал стіни	Товщина стіни, м	λ_s^* , Вт/(м·К)	Матеріал теплової ізоляції	λ_{ti}^{**} , Вт/(м·К)
1	2	3	4	5	6	7
1	Вінниця	Силікатна цегла	0,12	0,7	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
2	Дніпро	Повнотіла керамічна цегла	0,25	0,6	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
3	Донецьк	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,18	0,3	Целюлозна ековата	0,04

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
4	Житомир	Газобетон D300	0,3	0,09	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
5	Запоріжжя	Газобетон D300	0,3	0,08	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
6	Івано-Франківськ	Пустотіла силікатна цегла	0,25	0,6	Целюлозна ековата	0,04
7	Київ	Повнотіла керамічна цегла	0,18	0,8	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
8	Кропивницький	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,375	0,35	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
9	Кривий Ріг	Силікатна цегла	0,25	0,8	Целюлозна ековата	0,04
10	Луганськ	Повнотіла керамічна цегла	0,12	0,65	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
11	Луцьк	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,24	0,4	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
12	Львів	Газобетон D300	0,3	0,085	Целюлозна ековата	0,04
13	Миколаїв	Газобетон D300	0,3	0,085	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
14	Одеса	Пустотіла силікатна цегла	0,12	0,65	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
15	Полтава	Повнотіла керамічна цегла	0,25	0,75	Целюлозна ековата	0,04
16	Рівне	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,18	0,45	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
17	Ромни	Силікатна цегла	0,24	28	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
18	Сімферополь	Повнотіла керамічна цегла	0,18	0,6	Целюлозна ековата	0,04
19	Суми	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,375	0,33	Мінеральна (базальтова) вата	0,038

Закінчення таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
20	Тернопіль	Газобетон D300	0,3	0,085	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
21	Ужгород	Газобетон D300	0,3	0,087	Целюлозна ековата	0,04
22	Умань	Силікатна цегла	0,25	0,65	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
23	Феодосія	Повнотіла керамічна цегла	0,18	0,65	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
24	Харків	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,12	0,37	Целюлозна ековата	0,04
25	Херсон	Повнотіла керамічна цегла	0,12	0,75	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
26	Хмельницький	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,18	0,42	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
27	Черкаси	Пустотіла силікатна цегла	0,25	0,38	Целюлозна ековата	0,04
28	Чернівці	Повнотіла керамічна цегла	0,18	0,75	Мінеральна (базальтова) вата	0,038
29	Чернігів	Пустотіла (щільна) керамічна цегла	0,375	0,38	EPS (експандований пінополістирол)	0,036
30	Ялта	Силікатна цегла	0,25	0,74	Целюлозна ековата	0,04
* λ_s – коефіцієнт теплопровідності стіни, Вт/(м·К). **λ_{Ti} – коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції, Вт/(м·К).						

Задача 2. Відповідно до даних таблиці 3.2 виконати порівняння типів віконних систем, визначити втрати та зробити висновок. Температуру зовнішнього повітря прийняти – середню за опалювальний період.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані

Номер варіанта	Місто	Ширина вікна, м	Висота вікна, м	Температура внутрішнього повітря, °С	Номер системи ¹	U_w^* , Вт/(м ² · К)
1	2	3	4	5	6	7
1	Вінниця	1,2	1,5	16	1	1,1
					2	1,2
2	Дніпро	1,25	1,45	18	2	1,2
					3	0,7
3	Донецьк	1,3	1,4	20	1	1,1
					3	0,7
4	Житомир	1,15	1,55	22	1	1,15
					2	1,2
5	Запоріжжя	1,35	1,6	16	2	1,25
					3	0,7
6	Івано-Франківськ	1,4	1,65	18	1	1,15
					3	0,75
7	Київ	1,45	1,45	20	1	1,2
					2	1,25
8	Кропивницький	1,35	1,35	22	2	1,25
					3	0,75
9	Кривий Ріг	1,5	1,55	14	1	1,4
					3	0,9
10	Луганськ	1,15	1,6	16	1	1,25
					2	1,3
11	Луцьк	1,25	1,6	16	2	1,6
					3	0,9
12	Львів	1,45	1,65	18	1	1,3
					3	0,75
13	Миколаїв	1,55	1,45	20	1	1,3
					2	1,35
14	Одеса	1,45	1,35	22	2	1,35
					3	0,8
15	Полтава	1,5	1,5	14	1	1,2
					3	0,8
16	Рівне	1,25	1,65	22	1	1,15
					2	1,2
17	Ромни	1,35	1,65	16	2	1,25
					3	0,7
18	Симферопіль	1,45	1,45	18	1	1,15
					3	0,75
19	Суми	1,45	1,45	20	1	1,2
					2	1,25
20	Тернопіль	1,15	1,15	22	2	1,25
					3	0,75
21	Ужгород	1,25	1,5	14	1	1,2
					3	0,75
22	Умань	1,5	1,6	16	1	1,25
					2	1,3

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
23	Феодосія	1,2	1,6	16	2	1,25
					3	0,75
24	Харків	1,35	1,45	18	1	1,3
					3	0,75
25	Херсон	1,15	1,45	20	1	1,3
					2	1,35
26	Хмельницький	1,05	1,45	22	2	1,35
					3	0,8
27	Черкаси	1,5	1,8	22	1	1,15
					2	1,2
28	Чернівці	1,35	1,75	16	2	1,55
					3	0,85
29	Чернігів	1,4	1,75	18	1	1,35
					3	0,85
30	Ялта	1,45	1,75	20	1	1,35
					2	1,25

* U_w – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К).

¹ Номер системи:

- система 1 – ПВХ-профіль (5-камерний) + двокамерний склопакет (двокамерний, low-E, аргону) – «сучасна стандартна» система;
- система 2 – алюмінієвий профіль з терморозривом + двокамерний склопакет – «алюмінієва з терморозривом» (типово для фасадів / високих конструкцій);
- система 3 – дерево-алюміній (alu-clad) або дерев'яний профіль з термоізоляційною вставкою + трикамерний склопакет (пасивний тип) – «високоєфективна (під пасивний дім)».

4 АКТИВНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

Мета заняття – сформувати в здобувачів освіти практичні навички аналізу, налаштування та оцінювання ефективності активних систем управління енергоспоживанням, зокрема HVAC-систем, автоматизованих та «розумних» систем контролю, інтелектуальних лічильників, а також систем виявлення витоків і розумних пристроїв водопостачання.

Теоретичні положення. HVAC-системи (опалення, вентиляція та кондиціонування) забезпечують підтримання комфортного мікроклімату в будівлях шляхом регулювання температури, вологості, чистоти та руху повітря. Активні системи працюють завдяки механічному обладнанню – вентиляторам, насосам, компресорам, тепловим насосам – яке керується автоматикою. Принцип роботи полягає у зборі даних із сенсорів (температури, вологості, CO₂, присутності людей), їх аналізі контролером та автоматичному керуванні

обладнанням для підтримання заданих параметрів. Сенсори відіграють ключову роль: температурні регулюють теплоносій і клапани, датчики вологості керують зволоженням чи осушенням, а датчики присутності дозволяють системі переходити між режимами «комфорт» і «економ». Автоматизація значно підвищує енергоефективність: контроль повітрообміну за CO₂ і присутністю знижує витрати на вентиляцію на 30–50 %, точне регулювання температури економить 10–25 % теплової енергії, додаткову ефективність дають нічні та вихідні режими, графіки роботи й дистанційний моніторинг.

Центральним елементом сучасної інфраструктури є BMS (Building Management System) – комплекс апаратних і програмних засобів для моніторингу та керування HVAC, електропостачанням, освітленням, безпекою й водопостачанням. BMS працює на основі датчиків, контролерів і виконавчих пристроїв, об'єднаних у мережу, що дозволяє оптимізувати роботу обладнання та запобігати аваріям. Алгоритми керування варіюються від простих логічних правил (вмикання вентиляції при підвищенні CO₂) до PID-регуляції, адаптивних методів, предиктивної аналітики та сценаріїв, які враховують час доби, присутність людей і погодні умови.

Важливою складовою є IoT-пристрої – сенсори, контролери, реле та модулі зв'язку, що передають дані у BMS чи хмарні системи. Вони забезпечують прогнозування, аналітику та точне налаштування сценаріїв. Smart-meters (інтелектуальні лічильники) вимірюють електроенергію, тепло, воду й газ, передають дані в реальному часі, підтримують багатотарифний облік і виявляють аварії. Системи візуалізації подають інформацію у вигляді графіків і діаграм, дозволяючи аналізувати споживання, виявляти аномалії та формувати прогнози.

Сучасні рішення охоплюють також «розумні» системи водопостачання: сенсори витоків і електроклапани запобігають затопленням, а сенсорні змішувачі з інфрачервоними чи ультразвуковими датчиками відкривають воду лише при потребі, скорочуючи її споживання на 30–60 %. Алгоритми автоматичного обмеження подачі води регулюють потік і час використання, інтегруються з BMS та IoT-платформами, забезпечуючи комплексний захист і оптимізацію витрат.

Таким чином, сучасні HVAC-системи у поєднанні з BMS, IoT, smart-meters та «розумними» водопостачальними пристроями створюють інтегровану інфраструктуру, яка забезпечує стабільний комфорт, високу енергоефективність, безпеку та довговічність інженерних систем будівель, відповідаючи вимогам сталого будівництва.

Приклад 1. Аналіз енергоспоживання HVAC-системи на основі заданих ситуацій.

Вихідні дані:

- площа приміщення: 60 м²;
- тепловтрати приміщення: 90 Вт/м²;
- зовнішня температура: 5 °С;
- бажана температура всередині: 22 °С;
- режими роботи:
 - економний (Eco) – 20 °С, знижена потужність;
 - комфортний (Comfort) – 22 °С;
 - інтенсивний (Boost) – швидкий нагрів із підвищеною потужністю.

Дані розрахунків наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Дані розрахунків

Режим	Потужність системи, кВт	Тривалість роботи за годину	Орієнтоване споживання кВт · год
Eco	1,5	30	0,75
Comfort	2,0	40	1,33
Boost	3,0	20	1,0

Споживання визначається за формулою:

$$P = W \cdot \frac{T}{60} \text{ кВт.}$$

де W – потужність системи, кВт;

T – тривалість роботи, хвилин.

Порівняльна діаграма наведена на рисунку 4.1.

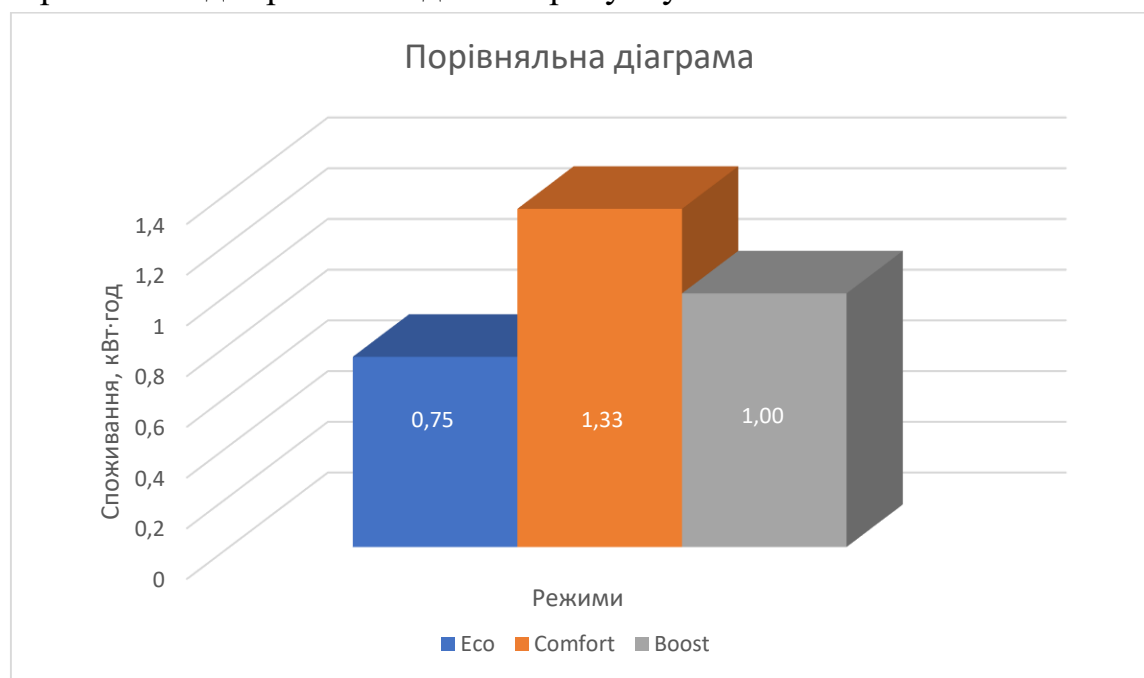


Рисунок 4.1 – Порівняльна діаграма споживаної потужності режимів

Висновки:

- Boost споживає більше потужності, але менше часу.
- Comfort забезпечує стабільний рівень.
- Eco економить, але знижує температуру.

Приклад 2. Налаштування алгоритмів автоматичного керування у «розумній» системі (BMS/IoT-сценаріях).

Вихідні дані наведені у таблицях 4.2–4.5.

Таблиця 4.2 – Датчики системи

Назва датчика	Тип датчика	Діапазон / Стани	Опис
Датчик присутності	логічний	є / немає	Визначає наявність людей у приміщенні
Датчик температури	числовий	0–40 °C	Вимірює температуру повітря
Датчик вологості	числовий	0–100 %	Вимірює відносну вологість
Датчик освітленості	числовий	0–1 000 люкс	Вимірює рівень освітлення

Таблиця 4.3 – Виконавчі пристрої

Пристрій	Можливі команди	Опис дії
Обігрівач	Увімкнути / Вимкнути / Встановити °C	Підтримує задану температуру
Кондиціонер	Увімкнути / Вимкнути / Встановити °C	Охолоджує приміщення
Вентиляція	Увімкнути / Вимкнути / Рівень (низький / середній / високий)	Регулює обмін повітря
Освітлення	Увімкнути / Вимкнути / Яскравість (%)	Керує рівнем освітлення в приміщенні
Повідомлення користувачу	Надіслати текст	Інформування про режим або подію

Таблиця 4.4 – Доступні умови сценаріїв

Умова	Логічні оператори	Значення
Температура	>, <, =	°C (наприклад, > 25)
Присутність	=	Є / Немає
Час	=, <, >	Година (наприклад, 22:00–6:00)
Вологість	>, <	%
Освітленість	>, <	Люкс

1. Алгоритм сценарію «Відсутність людей»:
 - 1.1. Якщо датчик присутності = «немає» протягом 10 хв.
 - 1.2. Тоді:
 - встановити температуру на → 19 °C;

- вимкнути кондиціонер;
- зменшити вентиляцію до мінімуму;
- вимкнути освітлення.

1.3. Надіслати повідомлення: «Увімкнено економний режим».

Таблиця 4.5 – Доступні дії

Дія	Параметри	Приклад
Змінити температуру	°C	Встановити 21 °C
Увімкнути / вимкнути пристрій	–	Увімкнути вентиляцію
Змінити яскравість освітлення	%	Освітлення 30 %
Встановити режим	«Економія», «Комфорт», «Ніч»	Активувати «Ніч»
Відправити повідомлення	Текст	«Увімкнено економний режим»

2. Алгоритм сценарію «Нічний режим»:

2.1. Якщо час = 22:00–6:00.

2.2. Дії:

- освітлення → 20 %;
- температура → 20 °C;
- вентиляція → автоматична;
- кондиціонер → вимкнено.

3. Алгоритм сценарію «Комфортний прихід»:

3.1. Якщо датчик присутності = «виявлено».

3.2. Попередній стан = «Економія».

3.3. Тоді:

- обігрівач → 22 °C;
- увімкнути освітлення → 100%;
- вентиляція → середній рівень.

3.4. Надіслати повідомлення: «Приміщення переведено в комфортний режим».

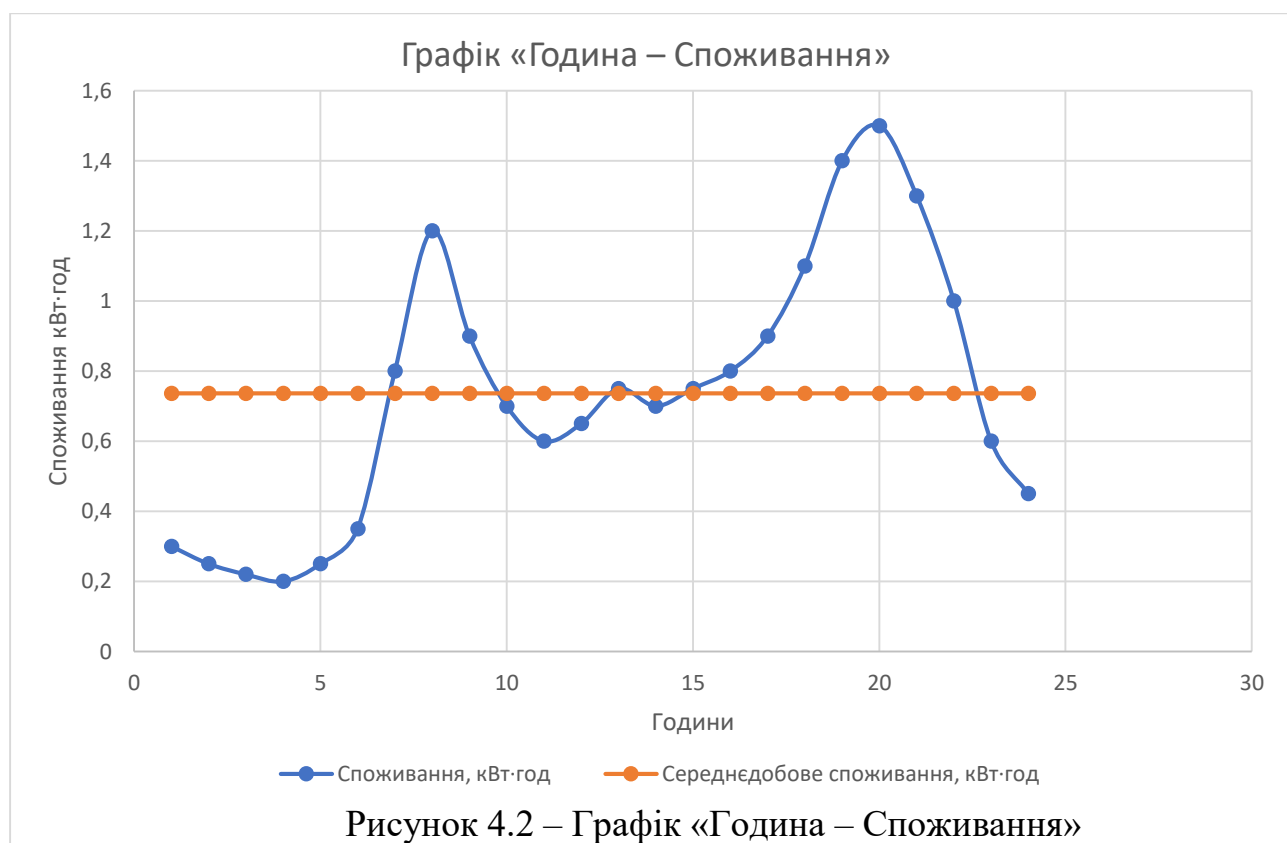
Приклад 3. Аналіз даних інтелектуального (smart) лічильника для визначення пікових навантажень та можливостей оптимізації енергоспоживання.

Завдання: Визначити пікові години навантаження (відповідно даних таблиці 4.6), побудувати графік «Година – Споживання», оцінити можливість оптимізації.

Таблиця 4.6 – Споживання електроенергії протягом доби

Година доби	Споживання, кВт·год
00:00–01:00	0,3
01:00–02:00	0,25
02:00–03:00	0,22
03:00–04:00	0,2
04:00–05:00	0,25
05:00–06:00	0,35
06:00–07:00	0,8
07:00–08:00	1,2
08:00–09:00	0,9
09:00–10:00	0,7
10:00–11:00	0,6
11:00–12:00	0,65
12:00–13:00	0,75
13:00–14:00	0,7
14:00–15:00	0,75
15:00–16:00	0,8
16:00–17:00	0,9
17:00–18:00	1,1
18:00–19:00	1,4
19:00–20:00	1,5
20:00–21:00	1,3
21:00–22:00	1,0
22:00–23:00	0,6
23:00–24:00	0,45

Графік наведено на рисунку 4.2.



Рішення з оптимізації:

- перенесення на нічний час з вечірнього, при нічному тарифі:
 - прання;
 - заряджання пристроїв;
 - робота бойлера;
- якщо час = 19:00–21:00 і споживання > 1.3 кВт год, то вимкнути кондиціонер та зменшити яскравість освітлення до 70 %.

Приклад 4. Моделювання роботи системи виявлення витоків води та автоматичного перекриття подачі за допомогою «розумних» змішувачів / кранів.

Вихідні дані.

Наявні компоненти системи (модельні):

- датчик протікання: має два стани – сухо / вологість виявлена;
- розумний кран/клапан: може бути *відкритий* або *закритий*;
- контролер: виконує сценарії у разі аварії;
- push-повідомлення користувачу (SMS / аплікація).

Модельна ситуація:

- нормальний режим: датчик = сухо;
- мікровитік: датчик періодично фіксує вологість раз на 5 хв;
- аварійний витік: датчик = вологість > 10 с;
- затримка в роботі сенсора: датчик реагує із запізненням.

Завдання: побудувати логіку реагування на витік.

1. Сценарій «Аварійний витік».

1.1. Якщо датчик протікання = «вологість виявлена» більше ніж 10 с →

1.2. Тоді:

- закрити розумний кран (клапан);
- надіслати повідомлення користувачу: «Увага! Виявлено витік.

Подачу води перекрито»;

- активувати звуковий сигнал або індикатор.

1.3. Після усунення проблеми → ручне підтвердження для відновлення водопостачання.

2. Сценарій «Мікровитік».

2.1. Якщо датчик фіксує вологість періодично, але не постійно,

2.2. Тоді:

- надіслати попередження: «Потенційний мікровитік. Перевірте зону датчика»;
- не перекривати воду автоматично;
- занести подію до журналу контролера.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 4

Відповідно до даних таблиці 4.7 побудувати порівняльну діаграму споживаної потужності режимів.

Таблиця 4.7 – Вихідні дані

Номер варіанта	Режими					
	Еco	Comfort	Boost	Еco	Comfort	Boost
	Потужність системи, кВт			Тривалість роботи за годину		
1	2	3	4	5	6	7
1	1,5	1,9	2,9	28	39	17
2	1,5	2,0	3,1	30	42	18
3	1,6	2,1	3,2	33	47	20
4	1,7	2,2	3,4	37	51	22
5	1,8	2,3	3,6	25	35	15
6	1,9	2,4	3,8	28	39	17
7	2,0	2,5	3,9	30	42	18
8	2,1	2,7	4,1	33	47	20
9	2,2	2,8	4,3	37	51	22
10	2,3	2,9	4,6	25	35	15
11	2,4	3,1	4,8	28	39	17
12	2,5	3,2	5,0	30	42	18
13	2,6	3,4	5,3	33	47	20
14	2,8	3,6	5,5	37	51	22
15	2,9	3,7	5,8	25	35	15
16	3,1	3,9	6,1	28	39	17
17	3,2	4,1	6,4	30	42	18
18	3,4	4,3	6,7	33	47	20
19	3,5	4,5	7,1	37	51	22
20	3,7	4,8	7,4	25	35	15
21	3,9	5,0	7,8	28	39	17
22	4,1	5,3	8,2	30	42	18
23	4,3	5,5	8,6	33	47	20
24	4,5	5,8	9,0	37	51	22
25	4,7	6,1	9,5	25	35	15
26	5,0	6,4	10,0	28	39	17
27	5,2	6,7	10,5	30	42	18
28	5,5	7,1	11,0	33	47	20
29	5,8	7,4	11,5	37	51	22
30	6,1	7,8	12,1	25	35	15

5 ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Мета заняття – сформувати в студентів цілісне уявлення про використання відновлюваних джерел енергії, ознайомити з принципами роботи сонячних панелей і колекторів, малих вітрових установок та геотермальних систем для будівель, а також навчити виконувати базові розрахунки, оцінювати ефективність та обґрунтовувати вибір гібридних систем енергозабезпечення.

Теоретичні положення. Сонячна енергія сьогодні використовується для гарячого водопостачання, опалення, охолодження, кондиціонування та технологічних процесів. Системи теплопостачання поділяють на активні (сонячні колектори з циркуляцією теплоносія), пасивні (архітектурні рішення будівлі як теплоприймачі) та комбіновані. У низько- й середньотемпературних системах (до 100 °С) застосовують плоскі колектори, а для температур понад 100 °С – концентруючі параболічні жолоби чи вакуумні колектори, що забезпечують нагрівання до 250–300 °С. Пасивні системи базуються на орієнтації будівлі, заскленні південних фасадів, теплонакопичувальних покрівлях. Активні рішення включають сонячні ставки, печі, басейни, опріснення та сушіння продукції.

Перетворення сонячного випромінювання на електроенергію здійснюється фотоелементами з кремнію. Монокристалічні мають ККД 16–17 %, полікристалічні – 14–15 %, тонкоплівкові – 8–9 %. З них формують модулі потужністю 50–350 Вт, які об'єднують у батареї. Для отримання 1 кВт потужності потрібно: 6–9 м² монокристалічних, 7,5–10 м² полікристалічних або 14–20 м² тонкоплівкових елементів. Фотоелектричні системи довговічні, доступні та є ключовим елементом відновлюваної енергетики.

Вітроенергетика ґрунтується на перетворенні руху повітряних мас у механічну й електричну енергію. Потужність залежить від площі потоку та куба швидкості вітру. Вітроустановки бувають із горизонтальною (найпоширеніші трилопатеві) та вертикальною віссю. Сучасні моделі досягають ККД до 45 %, використовують композитні матеріали, високі башти, електронні системи керування, а також прямий привід без редуктора.

Теплові насоси перетворюють низькопотенційну теплоту ґрунту, води, повітря чи утилізаційного тепла у придатну для опалення та ГВП. Найпоширеніші – парокомпресійні, що працюють на холодоагентах, а також абсорбційні й термоелектричні (ефект Пельтьє). Джерелами теплоти можуть бути ґрунтові води, морська вода, стічні води чи комбіновані системи. У світі теплові насоси масово застосовуються: сотні тисяч установок у США, Канаді, Швеції, Німеччині та Японії.

Гібридні енергосистеми (ГЕС) поєднують відновлювані джерела (сонце, вітер, біомаса, гідро-, геотермальна енергія), резервні генератори та системи накопичення (акумулятори, водень, гідроакумуляція). Керування здійснює EMS, що оптимізує розподіл енергії. Вдень працюють сонячні та вітрові установки, надлишки накопичуються, а вночі чи за несприятливих умов живлення забезпечують акумулятори або резервні джерела. Переваги – безперебійність, економія палива, екологічність, гнучке масштабування; недоліки – висока стартова вартість і складність керування. ГЕС застосовують у віддалених регіонах, інфраструктурі, аграрних господарствах, приватних будинках, школах і лікарнях.

Приклад 1. Визначення орієнтації та оптимального куту нахилу сонячної панелі для м. Києва, розрахунку очікуваний добовий виробітку енергії панелі потужністю 350 Вт при середньої сонячної інсоляції 3,2 год/доба.

Вихідні дані:

- місце: Київ (широта $\approx 50.45^\circ$ N);
- сонячна панель: номінальна потужність 350 Вт (0,35 кВт);
- середній «еквівалент пікових годин» (peak sun hours, PSH) для оптимально нахиленої панелі в Києві (приблизне значення): 3,2 год/день (пояснення: це середнє річне значення – локально може бути від $\sim 2,5$ до $\sim 4,0$);
- сумарний коефіцієнт реальних втрат (температурні втрати, перетворення інвертора, затінення, забруднення, кабелі тощо): 0,75 (тобто 25 % втрат);
- оптимальний кут нахилу для річної генерації приблизно = широті $\approx 50^\circ$.

Рішення.

1. Визначення орієнтації та кута.

1.1. Орієнтація (азимут): для північної півкулі – південь (180°). Допустиме відхилення $\pm 20^\circ$ дасть незначні втрати; більші відхилення – суттєвіші.

1.2. Оптимальний кут нахилу для річної генерації: $\approx 50^\circ$ (рівний широті). Для суміщення з зимовим опаленням можна збільшити на $+10\dots 15^\circ$; для кращої літньої генерації – зменшити.

2. Визначаємо очікувану добову виробітку енергії, за формулою:

$$E = P \cdot P_{SH} \cdot \eta \cdot 10^{-2} = 0,35 \cdot 3,2 \cdot 75 \cdot 10^{-2} = 0,84 \text{ кВт} \cdot \text{год/доба},$$

де P – номінальна потужність сонячної панелі, кВт;

P_{SH} – середня сонячна інсоляція, год/доба;

η – ККД системи, %.

3. Визначаємо річну генерацію:

$$E_{\text{річ}} = E \cdot 365 = 0,84 \cdot 365 = 306,6 \text{ кВт/рік.}$$

Приклад 2. Визначення доцільності встановлення малої ВЕУ.

Вихідні дані:

- місцевість: Київська область;
- середня річна швидкість вітру на висоті 10 м: 4,0 м/с (типове значення для центральної України);
- мала вітрова турбіна потужністю 1 кВт;
- коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП, capacity factor) для малих ВЕУ при швидкості ~ 4 м/с: 10–15 %. Для розрахунку приймаємо середнє значення 12 %.

Рішення.

1. Визначаємо доцільність встановлення ВЕУ.

Для ефективної роботи малої віротурбіни рекомендується:

- середня швидкість вітру $\geq 4,5\text{--}5,0$ м/с (на висоті 10 м);
- відсутність значних перешкод (дерев, будівель);
- можливість встановлення щогли 12–20 м.

У нашому випадку середня швидкість складає 4,0 м/с – нижня межа придатності.

Висновок: установка можлива, але очікувана генерація буде невеликою.

2. Визначаємо річну генерацію енергії віротурбіною:

$$E_{\text{річ}} = P \cdot 8\,760 \cdot \eta \cdot 10^{-2} = 1 \times 8\,760 \times 12 \times 10^{-2} = 1\,051 \text{ кВт/рік.}$$

3. Висновки.

3.1. Позитивні фактори:

- стабільний середній вітер 4 м/с;
- можливість встановлення малої турбіни для резервної генерації.

3.2. Негативні фактори:

- швидкість нижча за рекомендовану для ефективної роботи;
- КВВП низький $\rightarrow$ невелика генерація;
- економічна доцільність сумнівна без інших джерел енергії.

3.3. Загальний висновок:

Установка вітрової турбіни можлива, але малоефективна за таких умов. Доцільніше використовувати її у складі гібридної системи (вітер + сонце) або при віддаленому розташуванні об'єкта, де потрібне автономне живлення.

Приклад 3. Підбір геотермального теплового насоса.

Вихідні дані:

- об'єкт: одноповерховий житловий будинок, опалювальна площа 150 м²;

- питоме теплове навантаження: 50 Вт/м²;
- загальне теплове навантаження 7,5 кВт;
- мінімальне пікове навантаження (12 % запасу) приймаємо 8,5 кВт;
- система опалення: низькотемпературна (тепла підлога), форсований температурний режим подавальної води $\approx 35\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – це сприяє високому COP теплового насоса;

- обрана схема: вертикальний геотермальний контур (бурові свердловини) – через обмежену ділянку, відсутність великої площі для горизонтального розміщення;

- типова віддача тепла ґрунту для вертикальних зондів: 50 Вт/м зонда (приблизне середнє значення; реальна віддача залежить від ґрунтових умов, теплопровідності, гідрології);

- сезонний коефіцієнт продуктивності (SCOP) теплового насоса ≈ 3.5 (орієнтовно для системи із низькопотенційним опаленням).

Рішення.

1. Визначаємо необхідну теплову потужність теплового насоса. Оскільки пікове теплове навантаження складає 8,5 кВт округлюємо в більшу сторону та отримуємо 9 кВт.

2. Виконуємо спрощений розрахунок довжини зондів:

$$L_3 = \frac{Q}{q_m} = \frac{9\,000}{50} = 180 \text{ м.}$$

де Q – теплова потужність теплового насоса, Вт;

q_m – віддача тепла ґрунту для вертикальних зондів, Вт/м.

3. Визначаємо кількість свердловин, за умови, що стандартна глибина однієї свердловини складає 120 м:

$$N = \frac{L_3}{120} = 1,5 \text{ шт.}$$

Приймаємо 2 свердловини по 120 м.

4. Визначаємо споживану електричну потужність компресора, при роботі за номінальним режимом:

$$P_c = \frac{Q}{SCOP} = \frac{9\,000}{3,5} = 2\,571 \text{ Вт.}$$

За добу:

$$P_c = 2\,571 \times 24 = 61\,704 \text{ Вт. або } 61,7 \text{ кВт.}$$

Приклад 4. Гібридна система енергозабезпечення на базі наведених вище прикладів.

Вихідні дані:

- об’єкт: одноповерховий житловий будинок, площа 150 м²;
- річне споживання електроенергії: $\approx 3\,000$ кВт · год;
- опалення: тепла підлога + гаряча вода;
- доступні відновлювані джерела:
 - сонячні панелі: 350 Вт, кількість – 6 шт.;
 - мала вітрова турбіна: 1 кВт;
 - геотермальний тепловий насос (вертикальний контур, потужністю 9 кВт).

Рішення.

1. Оцінка внеску кожного джерела.

1.1. Сонячні панелі.

Загальна потужність:

$$P_3 = 0,35 \times 6 = 2,1 \text{ кВт.}$$

Знаходимо середню добову генерацію, якщо середня добова генерація однієї панелі $\approx 0,84$ кВт · год/день (див. приклад 1):

$$E_{\text{доба}} = 0,84 \times 6 = 5,04 \text{ кВт · год/доба.}$$

Річна генерація:

$$E_{\text{річ}} = 5,04 \times 365 = 1\,840 \text{ кВт · год/рік.}$$

1.2. Вітрова турбіна.

Річна генерація $\approx 1\,050$ кВт · год/рік (див. приклад завдання 2).

1.3. Тепловий насос:

- опалення + гаряча вода (зимовий сезон) покриває більшу частину потреби в теплі; SCOP = 3,5;

- споживання електроенергії ТН: $P_c = 2,57$ кВт на годину роботи.

2. Обґрунтування вибору конфігурації:

- сонячні панелі – висока генерація влітку, покривають частину електричних потреб;

- вітрова турбіна – допоміжне джерело, особливо у вітряну пору, доповнює сонце;

- геотермальний тепловий насос – основне джерело опалення та гарячої води, ефективний і економний (SCOP 3,5);

- гібридна система забезпечує безперервне енергопостачання та економію електроенергії з мережі.

Обрана гібридна система наведена на рисунку 5.1.

3. Переваги та недоліки обраної системи наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Переваги та недоліки системи

Параметр	Переваги	Недоліки
Сонце + вітер	Зменшення витрат на електроенергію, використання ВДЕ	Залежність від погоди, змінність генерації
Геотермальний ТН	Високий SCOP, стабільне опалення, довговічність	Високі початкові витрати, потреба буріння та ґрунтових досліджень
Гібридна система	Надійність, автономність, економія	Складність установки, координація роботи джерел

4. Висновки. Використання гібридної системи (сонце + вітер + геотермальний ТН) дозволяє:

- 4.1. Зменшити споживання електроенергії з мережі;
- 4.2. Забезпечити стабільне опалення та гарячу воду;
- 4.3. Підвищити енергоефективність будівлі;
- 4.4. Врахувати сезонні коливання сонячної та вітрової енергії.

Загальний висновок: гібридна система є оптимальним варіантом для забезпечення енергетичної автономності будинку та економії ресурсів.



Рисунок 5.1 – Гібридна система енергозабезпечення житлового будинку

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 5

Відповідно до даних таблиці 5.2 визначити кількість необхідних свердловин геотермального теплового насоса, при глибині однієї свердловини 120 м та визначити добове споживання електричної енергії компресором.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані

Номер варіанта	Площа житлового будинку, м ²	Питоме теплове навантаження, Вт/м ²	SCOP	Віддача тепла ґрунту для вертикальних зондів, Вт/м
1	2	3	4	5
1	100	45	3,5	20
2	110	47	4,0	25
3	120	50	4,5	30
4	130	53	5,0	35
5	140	55	5,5	40
6	150	60	6,0	45
7	160	45	4,0	50
8	170	47	4,5	55
9	180	50	5,0	60
10	190	53	5,5	65
11	200	55	6,0	70
12	210	60	3,5	75
13	220	45	6,0	80
14	230	47	4,0	85
15	240	50	4,5	90
16	250	53	5,0	95
17	100	55	5,5	100
18	110	60	6,0	20
19	120	45	3,5	25
20	130	47	6,0	30
21	140	50	4,0	35
22	150	53	4,5	40
23	160	55	5,0	45
24	170	60	5,5	50
25	180	45	6,0	55
26	190	47	3,5	60
27	200	50	6,0	65
28	210	53	4,0	70
29	220	55	4,5	75
30	230	60	5,0	80

6 АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ТА ЙОГО ФУНКЦІЇ

Мета заняття – закріплення знань про системи автоматичного керування, їхню класифікацію за структурою та призначенням, а також формування вмінь визначати основні елементи та функції САК, аналізувати їхню роботу та застосовувати отримані знання під час розв’язання практичних задач з автоматичного керування.

Теоретичні положення. Система автоматичного керування (САК) – це комплекс технічних засобів, що забезпечує підтримання, зміну або стабілізацію параметрів об’єкта без постійної участі оператора. Вона складається з об’єкта керування, вимірювальних і виконавчих елементів та пристрою керування, який реалізує алгоритм регулювання. Основні сигнали САК: задавальний $U_{ex}(t)$, вихідний $U_{вих}(t)$, регулювальний $U_{рег}(t)$ та збурення $f(t)$. Вимірювальні елементи перетворюють фізичні параметри (температуру, тиск, рівень, швидкість, витрати, положення, електричні величини) у сигнали для контролера, а виконавчі механізми (електроприводи, клапани, заслінки, інвертори, гідроприводи) здійснюють фізичну дію на об’єкт.

Робота САК охоплює усталені та перехідні режими. Від системи вимагають стійкості, точності та високої якості перехідних процесів – швидкого реагування без значних коливань і перерегулювання. САК можуть бути розімкнутими (керування за прогнозованими змінами), замкнутими (регулювання за відхиленням вихідного параметра) або комбінованими. Структурно вони бувають одноконтурні, багатоконтурні; за функціями – стабілізаційні, слідкуючі, програмні; за моделями – лінійні й нелінійні; за режимом – безперервні та дискретні (релейні, імпульсні, цифрові). Розрізняють стаціонарні та нестаціонарні системи, статичні й астатичні.

У практиці автоматизації САК застосовують у теплотехніці, енергетиці, механіці, вентиляції, транспорті та побуті. Прикладами є регулятори температури, електронні контролери котлів, автоматика холодильників, частотні приводи насосів, термостати.

Функції САК охоплюють:

- інформаційну – збір, передавання, фільтрацію та відображення даних (SCADA, HMI);
- вимірювальну – достовірну фіксацію параметрів сенсорами й перетворювачами;
- аналітичну – порівняння фактичних і заданих значень, визначення похибки;
- регулювальну – формування керуючих дій (P-, PI-, PID-алгоритми, логічні схеми, інтелектуальні методи);

- виконавчу – реалізацію фізичних впливів через приводи й механізми;
- стабілізувальну – підтримання параметрів на заданому рівні;
- адаптивну – автоматичне налаштування алгоритмів залежно від змін середовища (нечітка логіка, нейронні мережі);
- діагностичну – контроль працездатності елементів, виявлення відмов і аварій;
- оптимізаційну – пошук найефективніших режимів роботи з мінімальними витратами й максимальною надійністю.

Таким чином, САК є основою сучасної автоматизації, забезпечуючи точність, стабільність, енергоефективність і безпеку роботи технологічних, промислових та побутових систем.

Приклад 1. Визначення типу системи автоматичного керування.

Вихідні дані (системи).

1. Електричний чайник з автоматичним вимкненням після закипання.
2. Пральна машина, яка регулює рівень води за допомогою датчика.
3. Світлодіодна лампа, увімкнена вручну вимикачем.
4. Клімат-контроль у автомобілі, що підтримує задану температуру.
5. Рекламний таймер, який вмикає освітлення у визначений час без контролю яскравості.

Відповідь.

1. Електричний чайник з автоматичним вимкненням після закипання – Замкнена система (із зворотним зв'язком).

Пояснення. Датчик температури контролює стан води. Коли вона досягає точки кипіння, сигнал надходить на механізм вимкнення – це зворотний зв'язок.

2. Пральна машина, яка регулює рівень води за допомогою датчика – Замкнена система (із зворотним зв'язком).

Пояснення. Датчик рівня води постійно вимірює фактичний рівень і передає інформацію контролеру, який коригує подавання води. Наявний зворотний зв'язок.

3. Світлодіодна лампа, увімкнена вручну вимикачем – Розімкнена система.

Пояснення. Після увімкнення лампа працює без контролю будь-яких параметрів (яскравості, освітленості). Немає датчиків і зворотного зв'язку.

4. Клімат-контроль у автомобілі, що підтримує задану температуру – Замкнена система.

Пояснення. Датчик температури порівнює фактичне значення із заданим, а система коригує роботу кондиціонера чи обігрівача. Є постійний зворотний зв'язок.

5. Рекламний таймер, який вмикає освітлення у визначений час без контролю яскравості – Розімкнена система.

Пояснення. Система працює за програмою (за часом), але не контролює результат (освітленість чи стан лампи). Зворотний зв'язок відсутній.

Приклад 2. Побудова структурної схеми системи автоматичного керування температурою в кімнаті, де регулятор підтримує температуру на заданому рівні за допомогою обігрівача.

Рішення.

1. Визначення основних елементів системи.

- задатчик (З) – задає необхідну температуру, встановлену користувачем (наприклад, 22°C);
- датчик температури (Д) – вимірює фактичну температуру в кімнаті;
- порівняльний пристрій (ПП) – порівнює задане та фактичне значення;
- регулятор (Р) – визначає, чи потрібно вмикати / вимикати обігрівач або змінювати його потужність;
- виконавчий механізм / об'єкт керування (ОК) – обігрівач, який змінює температуру в кімнаті;
- зворотний зв'язок – інформація від датчика про реальну температуру.

2. Структурна схема.

Текстовий варіант структурної схеми наведено на рисунку 6.1. Блок-схема – на рисунку 6.2.

3. Принцип роботи.

Користувач встановлює потрібну температуру через задатчик.

Датчик температури вимірює реальну температуру в кімнаті та передає її у систему.

Порівняльний пристрій визначає різницю між заданою та фактичною температурою.

Регулятор приймає рішення:

- якщо температура нижча за задану – вмикає обігрівач;
- якщо достатня – вимикає або зменшує потужність.

Обігрівач впливає на температуру кімнати, після чого датчик знову повторно вимірює значення – реалізується зворотний зв'язок.

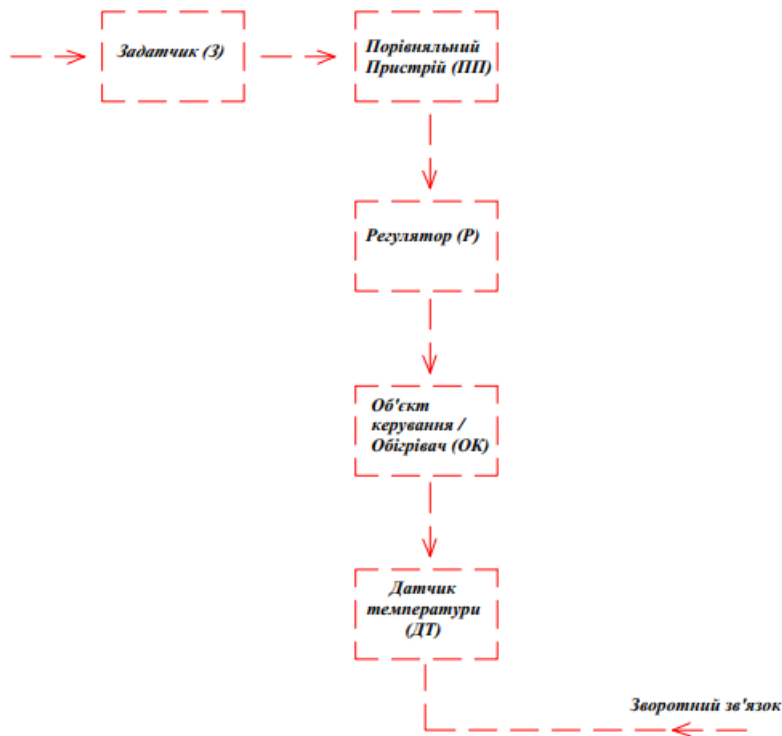


Рисунок 6.1 – Структурна схема (текстовий варіант)

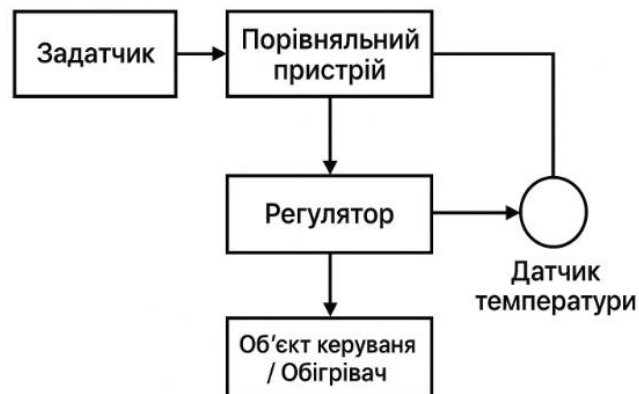


Рисунок 6.2 – Структурна схема у вигляді блок-схеми

Приклад 3. Аналіз функцій автоматичного керування на прикладі системи регулювання швидкості електродвигуна.

Умова: система повинна підтримувати задану швидкість обертання валу $n_{\text{зад}}$ (об./хв) при змінному навантаженні. Датчик: тахометр; регулятор – ПІ-регулятор; виконавчий – частотний перетворювач + електродвигун.

1. Структурна схема.

Блок-схема наведена на рисунку 6.3.

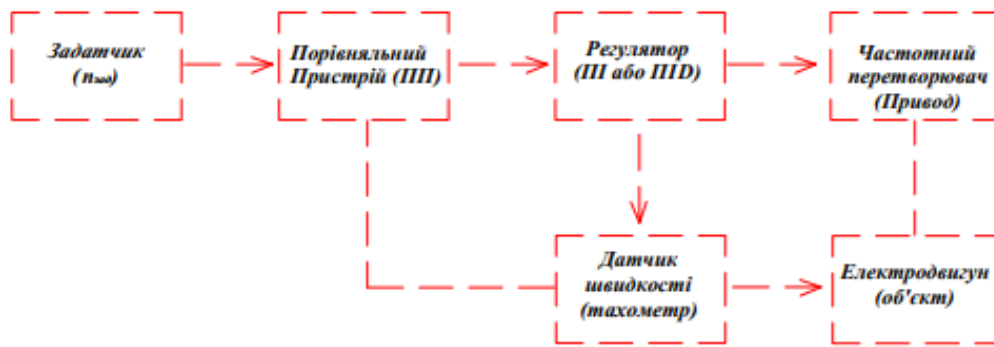


Рисунок 6.3 – Блок-схема структурної схеми САК регулюванням швидкості електродвигуна

2. Основні елементи системи та їхнє призначення.

Задатчик (задавач) – задає потрібну швидкість $n_{зад}$.

Датчик швидкості (тахометр) – вимірює фактичну швидкість $n(t)$ і формує сигнал зворотного зв'язку.

Порівняльний пристрій – обчислює похибку: $e(t) = n_{зад} - n(t)$.

Регулятор (ПІ) – на основі $e(t)$ формує керуючий сигнал $u(t)$ (наприклад, керування частотою на перетворювачі).

Частотний перетворювач / драйвер – перетворює $u(t)$ у електричну дію на мотор (напруга / частота).

Електродвигун + навантаження – об'єкт, швидкість якого змінюється під впливом керуючого сигналу і зовнішніх збурень.

3. Функції САК і їхня реалізація.

3.1. Вимірювання: тахометр періодично подає $n(t)$ – функція реалізована датчиком.

3.2. Порівняння: блок порівняння формує похибку $e(t) = n_{зад} - n(t)$.

3.3. Ухвалення рішення / формування керувального впливу: ПІ-регулятор перетворює $e(t)$ у сигнал $u(t)$ за законом:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt. \quad (6.1)$$

3.4. Реалізація впливу на об'єкт: частотний перетворювач змінює частоту живлення двигуна відповідно до $u(t)$, що приводить до зміни швидкості.

3.5. Корекція (замкнений цикл): після зміни швидкості нове значення $n(t)$ зчитується – система коригує керувальний вплив (реалізується зворотний зв'язок).

3.6. Забезпечення стійкості та точності: правильно налаштований ПІ-контролер зменшує статичну похибку та забезпечує стійку роботу при збуреннях.

3.7. Захист та діагностика (додаткові функції): захист від перевантаження, обмеження мін/макс частоти, сигнал тривоги при відмові датчика.

4. Ілюстрація роботи регулятора.

Дано:

- $n_{\text{зад}} = 1\,500$ об/хвилину;
- у момент t_0 фактична $n(t_0) = 1\,000$ об/хвилину $\rightarrow$ похибка $e = 1\,500 - 1\,000 = 500$ об/хвилину;
- використовуємо, наприклад, пропорційну складову з коефіцієнтом $K_p = 0,02$ (одиниць керуючого сигналу на 1 об/хвилину);
- визначаємо миттєвий пропорційний сигнал:

$$u_p = K_p \cdot e = 0,02 \times 500 = 10.$$

Отже, $u_p = 10$ (умовних одиниць керувального сигналу – наприклад, одиниць частоти або відсотків виходу контролера).

Примітка: конкретна інтерпретація одиниць «и» залежить від реалізації: наприклад, $10 \rightarrow +2$ Гц до вихідної частоти перетворювача тощо.

5. Аналіз реакції на збурення.

Збурення: раптове збільшення навантаження на вал (зменшує швидкість).

Послідовність реакції: тахометр фіксує падіння $n \rightarrow$ похибка e зростає $\rightarrow$ регулятор збільшує $u \rightarrow$ перетворювач підвищує частоту живлення $\rightarrow$ двигун додає обертів $\rightarrow n$ повертається до $n_{\text{зад}}$.

Оцінка якості: по переходу оцінюють час встановлення, перерегулювання, остаточну похибку.

Приклад 4. Аналіз функцій автоматичного керування на прикладі системи стабілізації рівня води.

1. Структурна схема.

Блок-схема наведена на рисунку 6.4.

2. Основні елементи системи та їхнє призначення.

Задатчик (задавач) – задає потрібний рівень води $H_{\text{зад}}$, наприклад 1,5 м;

Датчик рівня – вимірює фактичний рівень води $H(t)$ і формує сигнал зворотного зв'язку. Датчиком рівня може бути: поплавковий датчик; ультразвуковий датчик; гідростатичний перетворювач тиску.

Порівняльний пристрій – обчислює похибку: $e(t) = H_{\text{зад}} - H(t)$.

Регулятор – використовує закон регулювання (П, ПІ або ПІД), щоб сформувати керуючий сигнал $u(t)$ – ступінь відкриття клапана.

Виконавчий орган – регулювальний клапан (К).

Об'єкт керування – резервуар води (ОК).

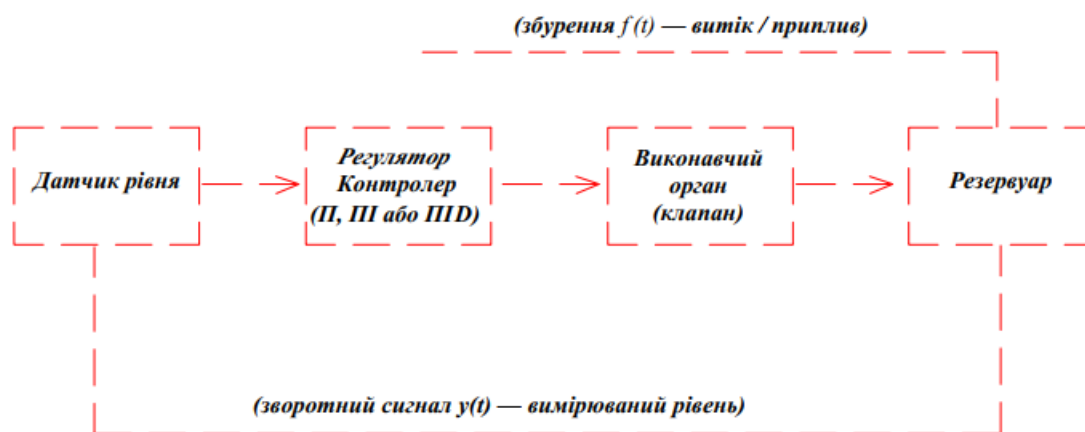


Рисунок 6.4 – Блок-схема структурної схеми САК регулюванням рівнем води у резервуарі

3. Формування керувального впливу.

– за П-керування:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) . \quad (6.2)$$

– за ПІ-керування: використовуємо формулу 6.1.

4. Виконання керувальної дії.

Клапан змінює витрату подачі:

- збільшує подачу, якщо $H(t)$ нижчий за норму;
- зменшує подачу або закривається, якщо рівень вищий.

5. Зворотний зв'язок.

Зміна рівня знову вимірюється датчиком → регулятор оновлює команду $u(t)$.

6. Приклад простого числового розрахунку.

Дано:

- $H_{\text{зад}}=1,5$ м;
- фактичний рівень води $H(t)=1,2$ м;
- похибка $e=1,5-1,2=0,3$ м;
- регулятор П типу, $K_p=40$ % відкриття клапана на 0,1 м похибки;
- тоді:

$$u = K_p \cdot e = 40 \cdot \frac{0,3}{0,1} = 120 \text{ \%}.$$

Оскільки 120 % неможливо фізично виконати, регулятор обмежує значення: клапан відкривається на 100 %. Через деякий час рівень підніметься, похибка зменшиться, і регулятор зменшить ступінь відкриття клапана.

7. Аналіз системи на збурення.

Збурення: Раптово збільшується витрата води через вихідний трубопровід (наприклад, відкрито великий кран).

Реакція:

- рівень падає $\rightarrow$ датчик фіксує менше значення $H(t)$;
- похибка e зростає;
- регулятор збільшує сигнал $u(t)$;
- клапан відкривається ширше $\rightarrow$ збільшується витрата;
- рівень повертається до $H_{зад}$.

Оцінка якості: час регулювання; перерегулювання (надмірне заповнення); стійкість при великих збуреннях.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 6

Відповідно до даних таблиці 6.1 виконати аналіз функцій автоматичного керування. Надати блок-схему структури системи, основні елементи системи та їх призначення, реалізацію функцій.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	Система
1	2
1	Система підтримання температури в теплиці
2	Автоматичне керування температурою в котлі опалення
3	Регулювання температури теплоносія у нагрівальних приладах системи опалення
4	Терморегуляція електричної духовки
5	Система охолодження двигуна автомобіля
6	Підтримання температури води в електричному водонагрівачі
7	Автоматичний контроль температури повітря в кондиціонері (спліт-система)
8	Регулювання температури в холодильній камері
9	Система підтримання тиску у водопровідній мережі насосною станцією
10	Автоматичне регулювання тиску в газопроводі
11	Підтримання тиску в гідравлічній системі преса
12	Регуляція тиску в котлі парогенератора
13	Контроль тиску у пневматичній системі компресора
14	Регулювання витрати холодної та гарячої води на змішувачі (клапанами)
15	Контроль витрати повітря у вентиляційній системі
16	Регуляція витрати теплоносія в системі «тепла підлога»
17	Система керування швидкістю повітря у вентиляційній шахті
18	Автоматичне регулювання швидкості руху води в трубопроводі насосом
19	Контроль швидкості обертання вентилятора
20	Система стабілізації швидкості циркуляційного насоса

Продовження таблиці 6.1

1	2
21	Автоматичне регулювання яскравості вуличного освітлення (день / ніч)
22	Система підтримання освітленості у виробничому цеху
23	Автоматичне керування освітленням у навчальній аудиторії (датчик LUX)
24	Система керування яскравістю LED-екрану залежно від зовнішнього освітлення
25	Система контролю витоків води у житловому будинку
26	Система автоматичного контролю тиску в теплових мережах
27	Система автоматичного контролю витоків газу
28	Система автоматичного контролю освітленості в офісних приміщеннях
29	Система регулювання освітлення в теплицях
30	Система автоматичного контролю тиску та витрат у системах пожежогасіння

7 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета заняття – сформувати у студентів розуміння принципів представлення сигналів у системах автоматичного керування, засвоїти роль і значення зворотного зв'язку, навчити будувати математичні моделі динамічних систем та аналізувати їхні динамічні характеристики. Забезпечити набуття практичних навичок роботи з передавальними функціями, структурними схемами та методами оцінювання якості та стійкості систем керування.

Теоретичні положення. Термін «сигнал» походить від лат. *signum* – «знак» і означає повідомлення, що передається через матеріальний носій. Він завжди існує у фізичному середовищі, яке переносить енергію від джерела до приймача. Значення сигналу – це числове відображення фізичної величини, що змінюється у часі чи просторі. У системах автоматичного керування сигнал несе інформацію про стан об'єкта, зовнішній вплив або команду, а його параметри (амплітуда, частота, фаза) визначають зміст повідомлення. У теорії сигналів процес описують математичною функцією – неперервною, дискретною чи випадковою.

Сигнали класифікують за походженням (природні, штучні), фізичною природою (електричні, пневматичні, гідравлічні, механічні), формою подання (аналогові, цифрові, імпульсні), джерелом (вхідні, вихідні, збурення, вимірювальні, еталонні) та призначенням (командні, регулювальні, коригувальні). У системах діє зворотний зв'язок: негативний забезпечує стабільність, позитивний – генерацію коливань. Структура САК включає еталонний сигнал, об'єкт, датчик, порівняльний елемент, регулятор і канал зворотного зв'язку.

Математичні моделі об'єктів керування бувають статичні (залежність між входом і виходом у сталому режимі) та динамічні (зміни параметрів у часі,

інерційність, диференціальні рівняння). Стаціонарні моделі мають сталі коефіцієнти, нестаціонарні – змінні. Основні задачі теорії керування – аналіз (стійкість, точність, швидкодія) та синтез (побудова структури з оптимальними властивостями). Для спрощення аналізу застосовують лінеаризацію, що наближено представляє нелінійні залежності у вигляді лінійних моделей.

Динамічні характеристики визначають реакцію системи на зміни сигналів і збурень, від них залежать точність, швидкодія та стабільність. Перехідні та частотні характеристики дозволяють оцінити якість регулювання, затримки й перерегулювання. Математичне моделювання (передавальні функції, перетворення Лапласа) забезпечує точний опис поведінки системи. Типові динамічні ланки: аперіодична (реакція без коливань), інтегровальна (накопичення сигналу), коливальна (схильність до резонансів). Основні параметри – постійна часу, коефіцієнт затухання та коефіцієнт підсилення.

Стійкість системи залежить від динамічних властивостей: надмірна інерційність чи слабе затухання можуть спричинити нестійкість, тоді як правильно налаштовані параметри забезпечують швидке досягнення режиму й ефективне пригнічення збурень. Оптимізація динамічних характеристик дозволяє досягти балансу між точністю, швидкодією, стійкістю та енергоефективністю, що є основою сучасних регуляторів і систем автоматизації.

Приклад 1. Математична модель першого порядку. Резервуар із пропорційним витокком.

Модель і рівняння.

Приймаємо: $h(t)$ – рівень води в резервуарі; $q_{in}(t)$ – витрата води (вхід); $q_{out}(t)$ – витік води пропорційний рівню (лінійна апроксимація) $q_{out}(t) = k \cdot h(t)$.

Тоді площа резервуара A :

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_{in}(t) - k \cdot h(t), \quad (7.1)$$

де A – площа поперечного перерізу резервуара, м²;

$h(t)$ – рівень рідини, м;

$q_{in}(t)$ – витрата води, що подається до резервуару, м³/с;

k – коефіцієнт витоку, м³/(с·м);

$k \cdot h(t)$ – витрата, що виходить через отвір, пропорційна рівню.

У стандартному вигляді:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{k}{A} \cdot h = \frac{1}{A} \cdot q_{in}. \quad (7.2)$$

Передавальна функція, застосуємо перетворення Лапласа:

$$sH(s) + \frac{k}{A} \cdot H(s) = \frac{1}{A} \cdot Q_{in}(s) \Rightarrow G(s) = \frac{H(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{1/A}{s+k/A}. \quad (7.3)$$

Позначимо постійну $a = k/A$. Тоді:

$$G(s) = \frac{1/A}{s+a}, \quad (7.4)$$

де a – коефіцієнт пропорційного витоку.

Це класичний перший рядок з часовою сталою $\tau = 1/a$ та статичним коефіцієнтом $K = \frac{1/A}{a} = \frac{1}{k}$.

Числовий приклад: $A = 0,5 \text{ м}^2$; $k = 0,2 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$.

Тоді:

$$a = \frac{k}{A} = \frac{0,2}{0,5} = 0,4 \text{ с}^{-1}; \quad (7.5)$$

$$\tau = \frac{1}{a} = 2,5 \text{ с}, \quad (7.6)$$

де τ – часова стала, с.

$$K = \frac{1}{k} = 5 \text{ м}/(\text{м}^3/\text{с}). \quad (7.7)$$

Для ступінчастого приросту подачі води $\Delta q = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ стаціонарне збільшення рівня:

$$\Delta h_{ss} = K \cdot \Delta q_{in} = 5 \times 0,1 = 0,5 \text{ м}. \quad (7.8)$$

Перехідна характеристика (класична для першого порядку):

$$\Delta h(t) = \Delta h_{ss} (1 - e^{-t/\tau}) = 0,5 \cdot (1 - e^{-t/2,5}). \quad (7.9)$$

Оцінка якості: час встановлення ($\pm 2\%$) $T_s \approx 4\tau \approx 10 \text{ с}$.

Стійкість: полюс в $s = -a = -0,4$ (ліва півплощина) – система стійка.

Приклад 2. Математична модель другого порядку. Мас-спрінг-демпер (m-c-k)¹.

¹ Мас-спрінг-демпер (mass-spring-damper) – це класична фізична модель механічної системи, яка складається з трьох основних елементів: маса (m) – інерційний елемент, що описує здатність тіла протидіяти зміні швидкості; пружина (k) – еластичний елемент, що створює силу, пропорційну деформації (закон Гука: $F = kx$); демпфер (c) або амортизатор – елемент, що створює силу опору руху, пропорційну швидкості ($F = c\dot{x}$).

Модель використовується у: машинобудуванні (підвіска авто); будівельній механіці (вібрації конструкцій); робототехніці; акустиці (вібрації мембран, резонанс); автоматичному керуванні (типовий приклад системи другого порядку).

Модель і рівняння.

Кінематичне рівняння:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t). \quad (7.10)$$

де x – переміщення;

$F(t)$ – зовнішня сила.

Передавальна функція:

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{mc^2 + cs + k} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2}, \quad (7.11)$$

де w_n – власна частота;

ζ – коефіцієнт загасання.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (7.12)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}. \quad (7.13)$$

Властивості та стандартні формули (для $0 < \zeta < 1$).

Перерегулювання (відсоток піка):

$$M_p = e^{-\pi\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}}. \quad (7.14)$$

Час пікового значення:

$$T_p = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1-\zeta^2}}. \quad (7.15)$$

Час встановлення (приблизно, $\pm 2\%$):

$$T_s \approx \frac{4}{\zeta w_n}. \quad (7.16)$$

Числовий приклад: $m=1$ кг; $k=\frac{25 \cdot N}{m} \Rightarrow w_n = \sqrt{\frac{25}{1}} = 5$ рад/с. Обираємо демпфер c такий, щоб $\zeta = 0,2$.

Тоді:

$$c = 2\zeta\sqrt{km} = 2 \times 0,2 \times 5 = 2 \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

Обчислюємо характеристики:

- перерегулювання (відсоток піка):

$$M_p = \exp\left(\frac{-\pi \cdot 0,2}{\sqrt{1-0,04}}\right) \approx \exp(-0,641) \approx 0,527 \rightarrow 52,7 \ %;$$

- час пікового значення:

$$T_p = \frac{3,14}{5 \cdot \sqrt{1-0,2^2}} = 0,64 \text{ с};$$

- час встановлення:

$$T_s = \frac{4}{0,2 \times 5} = 4 \text{ с}.$$

Полюси і стійкість.

Полюси коренів:

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2 = 0.$$

$$s_{1,2} = -\zeta w_n \pm j w_n \sqrt{1 - \zeta^2}.$$

де $-\zeta w_n = -1$ (за нашими числами) – від’ємна, отже система стійка, але коливною реакцією.

Частота інтерпретації.

Другий порядок має резонансну пікову амплітуду при невеликих значеннях ζ . Амплітудно-частотна характеристика покаже пікову підсилення $\sim \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}$ поблизу $w \approx w_n$ для невеликого значення ζ .

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 7

Відповідно до даних таблиці 7.1 знайти коефіцієнт пропорційного витоку a , сталу часову τ , стаціонарне збільшення рівня води в резервуарі Δh_{ss} .

Таблиця 7.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	Площа поперечного перерізу резервуара A , м ²	Коефіцієнт витоку k , м ³ /(с · м)	Ступінчастий приріст подачі води Δq , м ³ /с
1	2	3	4
1	0,2	0,1	0,05
2	0,24	0,11	0,06
3	0,29	0,12	0,07
4	0,32	0,13	0,07
5	0,35	0,15	0,08
6	0,38	0,16	0,09
7	0,42	0,18	0,10
8	0,46	0,19	0,11
9	0,51	0,21	0,12

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4
10	0,56	0,24	0,13
11	0,62	0,26	0,14
12	0,68	0,29	0,16
13	0,75	0,31	0,17
14	0,82	0,33	0,19
15	0,90	0,35	0,21
16	0,99	0,38	0,23
17	1,09	0,40	0,25
18	1,20	0,44	0,28
19	1,32	0,48	0,30
20	1,46	0,41	0,33
21	1,60	0,45	0,37
22	1,76	0,50	0,40
23	1,94	0,18	0,44
24	2,13	0,20	0,49
25	2,34	0,22	0,54
26	2,58	0,24	0,59
27	2,84	0,26	0,65
28	3,12	0,29	0,72
29	3,43	0,32	0,79
30	3,78	0,35	0,87

8 АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета заняття – закріпити теоретичні знання та сформувати практичні навички щодо принципів побудови алгоритмів систем автоматичного керування (САК), а також опанувати підходи дискретного, безперервного, логічного, адаптивного та оптимального керування.

Теоретичні положення. Мета керування в автоматичних системах полягає у забезпеченні бажаної поведінки об'єкта, що реалізується через алгоритм керування. Основні цілі включають стабілізацію (утримання параметра незалежно від збурень), стеження (точне повторення еталонної траєкторії), оптимізацію (мінімізація енергоспоживання чи часу переходу), компенсацію збурень, адаптацію (пристосування до змін параметрів) та робастність (надійність при невизначеності моделі). Формалізація мети здійснюється через критерії якості – часові, енергетичні чи комбіновані.

Математичні моделі є основою аналізу та синтезу керування: диференціальні рівняння описують неперервні процеси, передавальні функції – лінійні стаціонарні системи у частотній області, а станкові моделі враховують багатовимірні входи, виходи й внутрішній стан. Вхідні, вихідні, керуючі та збурюючі сигнали формують інформаційну структуру системи, а умови

керування визначаються фізичними, технологічними та нормативними обмеженнями.

Алгоритми керування класифікують як лінійні й нелінійні, дискретні та неперервні, централізовані й децентралізовані. Безперервні алгоритми працюють з аналоговими сигналами, описуються диференціальними рівняннями й забезпечують швидку реакцію, що важливо для фізичних процесів. Дискретні алгоритми оперують цифровими сигналами, реалізуються на мікроконтролерах чи ПЛК, підтримують складні адаптивні методи та інтеграцію з інформаційними системами. Перехід від безперервного до дискретного здійснюється шляхом дискретизації, де вибір періоду критично впливає на точність і стійкість.

Розширені методи застосовують у складних системах: логічне керування реалізує прості команди «увімкнути / вимкнути»; адаптивне автоматично змінює параметри залежно від умов; оптимальне забезпечує найкращий результат за критерієм ефективності, але потребує точної моделі й значних обчислень. Вибір методу залежить від характеру об'єкта та вимог до точності й швидкодії, а комбіновані підходи дозволяють поєднувати переваги різних алгоритмів для досягнення високої якості керування.

Приклад 1. Логічне керування електроводонагрівачом (ON / OFF алгоритм).

1. Процес.

Електричний бойлер повинен підтримувати температуру води в певному діапазоні, наприклад 55–60 °С, забезпечуючи комфорт користувача та економію енергії. Керування здійснюється за принципом логічного релейного регулювання з гістерезисом.

2. Структура системи автоматичного керування.

САК бойлера містить:

2.1. Датчики.

Датчик температури всередині бака (терморезистор або термопара).

2.2. Виконавчий механізм.

ТЕН (трубчастий електронагрівач).

Реле або симістор для його увімкнення / вимкнення.

2.3. Логічний контролер.

Простий мікроконтролер (наприклад, ESP32, STM32, PIC), який:

- періодично зчитує температуру;
- приймає логічні рішення: увімкнути чи вимкнути ТЕН.

3. Алгоритм логічного керування та приклад його роботи.

Релейний алгоритм із зоною нечутливості (гістерезисом). Мета – уникнути частих перемикань ТЕНа.

3.1. Початкові умови:

Температура води: 53 °С.

Стан ТЕН: вимкнено.

3.2. Температура < 55 °С → ТЕН вмикається.

3.3. Вода нагрівається до 56 °С → ТЕН залишається увімкненим (бо ще не досягнуто 60° С).

3.4. Температура досягає 60 °С → ТЕН вимикається.

3.5. Температура падає до 55 °С → ТЕН все ще вимкнений (бо лише < 55 включає).

3.6. Температура знижується до 54 °С → ТЕН знову вмикається.

Таким чином система працює циклічно, забезпечуючи стабільну температуру без «дребезгу»² керування.

4. Чому використовуються логічне керування, а не PID.

Переваги ON/OFF:

- простота реалізації;
- надійність;
- не потребує точного математичного моделювання;
- мінімальні витрати на апаратуру;
- достатньо ефективно для інерційних об'єктів (бойлер має велику теплоємність).

Недоліки:

- коливання температури в межах гістерезису;
- неможливість надточного регулювання;
- у великих бойлерах може бути затримка реакції через теплову інерційність.

У бойлерах надвисока точність не потрібна, тому релейний алгоритм – оптимальний.

5. Формальний опис алгоритму.

Вихідні умови:

- $T(t)$ – температура води в бойлері, яка вимірюється;
- $T_{on} = 55$ °С;
- $T_{off} = 60$ °С.

Тоді:

² Дребезг – це небажане багаторазове замикання й розмикання контактів електричної схеми під час комутації. В українських стандартах це явище визначається як «брязкіт контактів».

$$\begin{cases} 1, & T(t) < T_{on} \\ 0, & T(t) > T_{off} \\ u(t)^-, & T_{on} \leq T(t) \leq T_{off} \end{cases}, \quad (8.1)$$

де $u(t)=1$ – ТЕН увімкнено, $u(t)=0$ – вимкнено.

Останній рядок – це «утримання стану», щоб уникнути зайвих перемикачів.

6. Можливе покращення алгоритму.

Сучасні бойлери можуть включати додаткову логіку:

1. Комфортний режим:

– підтримання температури 40–45 °С економить енергію.

2. Турборежим:

– швидкий нагрів до 70 °С без очікування (ТЕН не вимикається до досягнення цієї позначки).

3. Антибактеріальний режим:

– нагрів до 75–80 °С раз на тиждень → знищення бактерій *Legionella*.

4. Нічний режим:

– нагрівання в нічні години, коли електроенергія дешевша.

Такі режими все одно базуються на логічних алгоритмах.

Приклад 2. Адаптивне керування пральною машиною.

1. Структура системи автоматичного керування.

Датчики:

- маса білизни (Load–weight) – визначається за зміною крутного моменту або вбудованими тензодатчиками;
- ступінь забруднення води (Turbidity) – вимірюється оптичним сенсором;
- температура води (T–water) – термодатчик;
- рівень піни (Foam–level) – датчик піноутворення;
- рівень води (Water–level) – пресостат або ультразвуковий датчик.

2. Адаптивні рішення, які приймає контролер.

2.1. Адаптація часу прання:

- якщо «Turbidity» > порогу → продовжити прання на Δt хвилин;
- якщо вода чиста → перейти на полоскання раніше.

2.2. Адаптація об'єму води:

- «Load–weight» мала → зменшити подавання води;
- «Load–weight» велика → збільшити подавання води.

2.3. Адаптація температури:

- тканина «делікатна» → $T_{max} = 30$ °С;
- бавовна сильно забруднена → $T = 60–90$ °С.

2.4. Антипіна:

- «Foam-level» > порогу → зупинка двигуна + подача води.

2.5. Корекція обертів двигуна:

- велика маса білизни → плавний старт + менші оберти;
- мала маса білизни → стандартні оберти.

3. Логічний потік роботи (спрощено).

3.1. Користувач вибирає базовий режим.

3.2. Машина автоматично зважує білизну.

3.3. Дозує воду та миючий засіб.

3.4. Починає цикл прання.

3.5. MCU постійно аналізує показники:

- каламутність води;
- рівень піни;
- температуру;
- навантаження на двигун.

3.6. При необхідності змінює:

- тривалість прання;
- температуру;
- кількість полоскань;
- оберти віджиму.

3.7. Завершує цикл з оптимальною витратою води й електроенергії.

4. Безпека. Блокування дверцят, аварійний злив, виявлення дисбалансу при віджимі.

Приклад 3. Оптимальне керування – мінімізація ресурсу або часу, на прикладі оптимальної траєкторії електроавтомобіля.

1. Задача.

Побудувати алгоритм, який для заданого маршруту (або відрізка дороги) обирає траєкторію швидкості $v(t)$ та керування гальмування / прискорення $u(t)$ так, щоб мінімізувати енергоспоживання (витрати батареї) за виконанням додаткових обмежень: час виконання, обмеження швидкості, комфорт (обмеження прискорень), запас енергії (SOC), правила дорожнього руху.

2. Ціль – збалансувати мінімум енергії і допустимий час у дорозі.

3. Структура системи.

Динамічна модель (спрощена, довга ось).

Положення $s(t)$, швидкість $v(t)$, прискорення $a(t)$.

Управління: тяга / гальмо $u(t)$ (може бути безрозмірною величиною, пропорційною крутному моменту / силі на колесах).

Динаміка:

$$\dot{s}(t) = v(t), \quad (8.2)$$

$$m \cdot \ddot{v}(t) = F_{drive}(u(t)) - F_{res}(v(t), s(t)), \quad (8.3)$$

де m – маса, кг;

F_{res} – сумарні опірні сили (аеродинамічний опір, опір котіння, гравітація на підйом).

Споживана потужність:

$$P(t) = \frac{v(t) \cdot F_{drive}(u(t))}{\eta_{dr}}. \quad (8.4)$$

Рекуперація, при негативних u частина кінетичної енергії повертається в батарею з ефективністю η_{regen} .

Обмеження SOC: $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$.

Обмеження та зовнішні дані:

- обмеження швидкості $0 \leq v(t) \leq v_{max}(s)$ (правила дорожнього руху, дорожні умови);
- обмеження прискорення $a_{min} \leq \ddot{v}(t) \leq a_{max}$ (комфорт, технічні характеристики автомобіля);
- рельєф місцевості: нахил дороги $a(s)$ впливає на F_{res} ;
- трафік: точки j інтервали з обов'язковими зупинками або обмеженнями швидкості.

4. Постановка оптимізації.

Приклад критерію мінімізації енергії з термінальною штрафною функцією часу:

$$\min_{u(\cdot)} J = \int_0^T P(v(t), u(t), s(t)) dt + \lambda T, \quad (8.5)$$

де λ – коефіцієнт компромісу «час-енергія».

Динамічні обмеження і граничні умови: $s(0)=0, s(T)=S$ (проїхати відстань S за час T), та SOC-обмеженням.

5. Методи розв'язання.

5.1. Метод варіацій / оптимальне керування (принцип максимуму / метод Кальця). Підходить для аналітичних або чисельних розв'язків при простій моделі. Але ускладнений реальними обмеженнями.

5.2. LQR / квадратичні наближення.

Якщо лінеаризувати систему навколо робочої точки і поставити квадратичний критерій $\int (x^T Q_x + u^T R u) dt$, отримаємо LQR. Підходить для близьких до лінійних задач (корекція траєкторії, слідування швидкості).

5.3. Model Predictive Control (MPC) – найбільш практично.

Дискретизуємо модель на кроки k з горизонтом N .

На кожному кроці розв'язуємо QP (або NLP , якщо модель нелінійна) мінімізуючи сумарну енергію та штрафи за відхилення від бажаного часу/швидкості.

Використовує обмеження (швидкість, SOC, комфорт).

Реалізується онлайн – після виконання першого кроку план зсувається.

MPC легко додає обмеження на зупинки/сигнали та враховує прогноз рельєфу і швидкості.

6. Математика енергетичної моделі.

6.1. Сили опору:

$$F_{res}(v, s) = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A v^2 + mg C_\tau \cos a(s) + mg \sin a(s), \quad (8.6)$$

де ρ – густина повітря;

C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору;

A – площа;

C_τ – коефіцієнт котіння;

$a(s)$ – кут нахилу.

6.2. Потужність на колесі:

$$P_{wheel} = v \cdot F_{drive}. \quad (8.7)$$

6.3. Потужність з акумулятору (з урахуванням ККД приводу):

$$P_{batt} = \begin{cases} \frac{P_{wheel}}{\eta_{dr}}, & P_{wheel} \geq 0, \\ \eta_{regen} P_{wheel}, & P_{wheel} < 0. \end{cases} \quad (8.8)$$

6.4. Економічний функціонал на кроці k :

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} (w_E P_{batt,k+i} \Delta t + w_v (v_{k+i} - v_{k+i}^{ref})^2 + w_a a_{k+i}^2) + w_T T_{total}, \quad (8.9)$$

де w_E – коефіцієнт енергії;

w_v – коефіцієнт швидкості;

w_a – коефіцієнт комфорту;

w_T – коефіцієнт часу.

7. Дискретизація й швидкість обчислень.

Для реального автомобіля MPC з горизонтом 10–30 кроків та $dt = 0,5$ – 1 с зазвичай достатній.

QP можна вирішувати швидко (реально вбудовано) – треба використати спеціалізовані QP-солвери (OSQP, qpOASES) або нелінійні solvers з warm-start.

8. Нелінійність моделі.

Лініаризувати навколо опорного треку для LTV-MPC або використовувати NMPC (потрібні швидші солвери).

9. Превізор (preview) даних.

Карта рельєфу (GPS + цифрова карта висот) дає $\alpha(s)$.

Інформація про трафік / сигнали дозволяє накладати жорсткі обмеження (зупинки, обмеження швидкості).

Прогноз погоди (вітер) може вплинути на оптимальну стратегію.

10. Рекуперація

Врахувати обмеження струму на заряд батареї при рекуперації.

Оптимальна стратегія інколи – передбачувано знизити швидкість перед підйомом, щоб відновити енергію на спуску.

11. Приклади стратегій.

Eco-Cruise (проста): використати попередні точки рельєфу і зменшувати швидкість перед підйомом, збільшувати на спуску – проста емпірична стратегія без розв'язку QP.

Speed-Planning via Dynamic Programming (offline): розбиття шляху по відстані, DP для мінімуму енергії з урахуванням кінцевого часу – зручне для попереднього планування.

MPC online (real-time): оптимальна, гнучка, враховує обмеження.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 8

Відповідно до даних таблиці 8.1 надати алгоритм та принцип його роботи при логічному керуванні приладів (обладнання).

Таблиця 8.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	Прилад, обладнання тощо	Система або дія
1	2	3
1	Пральна машина	Кришка дверцят
2	Пральна машина	Рівень води
3	Посудомийна машина	Температура
4	Холодильник	Вмикання компресора за температурою
5	Мікрохвильова піч	Блокування магнетрона, якщо дверцята не замкнені
6	Розумна розетка	Вмикання за датчиком руху
7	Робот-пилосос	Повернення на базу
8	Електрочайник	Вимикання при закипанні
9	Конвеєрна лінія	Датчики початку та кінця
10	Котел	Пуск та вимикання пальника
11	Пожежна сигналізація	Подача води при задимленні
12	Автоматичні ворота	Кінцеві вимикачі

Продовження таблиці 8.1

1	2	32
13	Автоматичні ворота	Фотоелементи
14	Насосна станція	Почергове включення насосів
15	Автоматичні сушарки для рук	Вмикання та вимикання
16	Автоматичні кавомашини	Цикл подачі води
17	Автоматичні змішувачі води	Вмикання та вимикання на основі датчика близькості
18	Пневматичні маніпулятори	Кінцеві вимикачі
19	Шлагбаум залізниць	Світлофор + кінцевики
20	Дизель-генератори	Автозапуск при втраті напруги
21	Автотранспорт	Система контролю тиску в шинах
22	Транспорт	Системи автоматичного відкривання дверей поїздів метро
23	Турнікети	Системи контролю доступу на станціях
24	Рисоварка	Визначення готовності за температурною кривою
25	Осушувачі повітря	Осушення за рівнем вологості
26	Обігрівачі з термостатом	Вмикання / вимикання за температурою
27	Сирени та домашні сигналізації	Реагування на датчики руху
28	Сирени та домашні сигналізації	Реагування на датчики удару
29	Сирени та домашні сигналізації	Реагування на датчики диму
30	Праска	Вмикання / вимикання за температурою

9 КЛАСИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ

Мета заняття – сформувати у студентів знання та навички роботи з класичними регуляторами (P, I, D) та PID-алгоритмом, їх налаштуванням і застосуванням у промислових та побутових системах.

Теоретичні положення. Класичні пропорційні, інтегральні та диференційні регулятори (P, I, D) є фундаментом теорії автоматичного керування, оскільки формують керуючий сигнал на основі різниці між заданим і фактичним значенням параметра. P-регулятор забезпечує швидку реакцію системи, проте залишає сталу похибку; I-регулятор усуває її, накопичуючи помилки в часі, але уповільнює процес і може викликати перерегулювання; D-регулятор покращує динаміку, реагуючи на швидкість зміни похибки, однак чутливий до шумів. Комбіновані PI, PD та PID-регулятори дозволяють збалансувати точність, стійкість і швидкодію, тому застосовуються у теплотехнічних установках, насосних станціях, промислових процесах, електроприводах та робототехніці.

У сучасних цифрових системах керування (ПЛК, SCADA, DCS) регулятори реалізуються програмно, що дає можливість гнучкого налаштування, фільтрації сигналів та інтеграції в інтелектуальні алгоритми. Попри простоту й універсальність, класичні регулятори мають обмеження – чутливість D-компоненти до шумів, потребу в точному налаштуванні та недостатню адаптивність до змін параметрів об'єкта. Цифрові ж рішення забезпечують автоматичну оптимізацію й інтеграцію у складні системи, але P, I, D-підходи залишаються базою для побудови більш складних методів.

Налаштування параметрів здійснюють різними методами:

- метод Зіглера – Ніколса – визначення критичного підсилення та періоду коливань для обчислення оптимальних значень PID;
- ручне налаштування (проб і помилок) – поступове коригування параметрів за реакцією системи;
- метод відкритого контуру – побудова моделі FOPDT та підбір параметрів на її основі;
- графічні методи – аналіз частотних характеристик (Bode plot), запасів стійкості;
- Чисельне моделювання (MATLAB, Simulink, TIA Portal) – автоматична оптимізація за критеріями якості.

Форма перехідної характеристики визначається налаштуванням коефіцієнтів: збільшення K_p прискорює реакцію, K_i усуває похибку, але може викликати коливання, а K_d зменшує перерегулювання, водночас підвищуючи чутливість до шумів.

Типові застосування:

- промисловість – регулювання температури теплоносія, тиску, рівня, витрати, дозування, швидкості електроприводів, стабілізація процесів у хімічній та харчовій промисловості;
- побут і будівлі – термостати, системи BMS для мікроклімату, пральні та посудомийні машини, кондиціонери, теплові насоси, 3D-принтери та CNC-пристрої.

Таким чином, класичні P-, I-, D- та PID-регулятори залишаються основою автоматизованих систем, забезпечуючи точність, стабільність, енергоефективність і безпеку технологічних процесів, а також комфорт у сучасних будівлях.

Приклад. Вибір типу регулятора для реальних систем.

Приклади, відповіді та пояснення вибору наведені у таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Приклади вибору регуляторів.

Керування системою	Вибір	Пояснення вибору
1	2	3
Керування температурою в електроводонагрівачі	PI-регулятор	- Температурні процеси інерційні та повільні – диференційна складова не потрібна. - Не можна допускати сталу похибку, тому потрібен інтеграл. - Лише P дасть залишкове відхилення, PID зайвий і може викликати коливання.
Підтримання швидкості електродвигуна	PI-регулятор	- Необхідна швидка реакція на зміну навантаження та відсутність сталої похибки → потрібен I. - D дає мало користі для швидкісних систем з шумами, тому PID переускладнює систему. - PI – стандартне рішення для контролю швидкості.
Система автоматичного освітлення	P-регулятор	- Потрібна лише реакція на певний поріг. - Висока точність не потрібна, I і D зайві. - Часто використовують звичайний пороговий перемикач (не регулятор у класичному розумінні).
Автомобільний круїз-контроль	PID-регулятор	P забезпечує базове регулювання.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОГО ЗАНЯТТЯ. ТЕМА 9

1. Надати відповіді на теоретичні питання, які наведені у таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 – Теоретичні питання

Номер варіанта	Питання
1	2
1	1. Які основні принципи лежать в основі роботи систем автоматичного керування? 2. Яка основна функція пропорційного (Р) регулятора?
2	1. Чим відрізняються розімкнуті, замкнуті та комбіновані системи керування? 2. Який тип регулятора найкраще усуває залишкову похибку в системі?
3	1. Як класифікуються САК за кількістю контурів регулювання та що характеризує багатоконтурні системи? 2. Який компонент PID-регулятора відповідає за згладжування перерегулювання?
4	1. У чому полягає різниця між статичними та астатичними системами з точки зору точності керування? 2. Що потрібно визначити для налаштування PID-регулятора методом Зіглера–Ніколса?
5	1. Які особливості мають лінійні та нелінійні системи автоматичного керування? 2. У якій побутовій системі найчастіше застосовується PI-регулятор?
6	1. Як реалізується інформаційна та вимірювальна функція в САК? 2. Який тип регулятора найчастіше використовується для стабілізації швидкості обертання двигуна?
7	1. Яке значення має порівняльна (аналітична) функція для формування керуючого впливу? 2. Що відбувається при надмірному збільшенні коефіцієнта у PID-регуляторі?
8	1. У чому полягає адаптивна функція САК і в яких системах вона реалізується? 2. Який регулятор самостійно не здатен стабілізувати систему?
9	1. Як виконавча та стабілізуюча функції забезпечують фізичну дію та сталість параметрів об'єкта керування? 2. У чому полягає роль інтегрального компонента в PID-регуляторі?
10	1. Які завдання вирішує діагностична та оптимізаційна функція в сучасних автоматизованих системах? 2. Який регулятор найчутливіший до вимірювальних шумів?
11	1. Що таке сигнал у системах автоматичного керування? 2. Яка основна функція пропорційного (Р) регулятора?
12	1. Яку роль відіграє зворотний зв'язок у системах автоматичного керування та як він впливає на стабільність і точність системи? 2. Який тип регулятора найкраще усуває залишкову похибку в системі?
13	1. Які бувають сигнали за джерелом виникнення? 2. Який компонент PID-регулятора відповідає за згладжування перерегулювання?
14	1. Які бувають сигнали за функціональним призначенням? 2. У якій побутовій системі найчастіше застосовується PI-регулятор?
15	1. Чим відрізняється позитивний зворотний зв'язок від негативного, і які наслідки їх застосування в системах автоматичного керування? 2. Що потрібно визначити для налаштування PID-регулятора методом Зіглера–Ніколса?

Продовження таблиці 9.2

1	2
16	1. Які основні методи використовуються для математичного моделювання динамічних систем, і в чому їх переваги? 2. Який тип регулятора найчастіше використовується для стабілізації швидкості обертання двигуна?
17	1. Які основні типи динамічних характеристик використовуються для аналізу систем автоматичного керування, і яку інформацію вони надають про поведінку системи? 2. Що відбувається при надмірному збільшенні коефіцієнта у PID-регуляторі?
18	1. Як зміна коефіцієнта затухання у ланці другого порядку впливає на форму перехідного процесу? 2. Який регулятор самостійно не здатен стабілізувати систему?
19	1. Наведіть приклади типових ланок. 2. У чому полягає роль інтегрального компонента в PID-регуляторі?
20	1. Що показує частотна характеристика системи? 2. Який регулятор найчутливіший до вимірювальних шумів?
21	1. Що таке алгоритм автоматичного регулювання і які основні етапи його побудови? 2. Яка основна функція пропорційного (P) регулятора?
22	1. Які вимоги висуваються до алгоритмів САК з точки зору стійкості, точності та швидкодії? 2. Який тип регулятора найкраще усуває залишкову похибку в системі?
23	1. Як впливає структура об'єкта керування на вибір типу алгоритму регулювання? 2. Який компонент PID-регулятора відповідає за згладжування перерегулювання?
24	1. У чому полягає принципова різниця між дискретними та безперервними алгоритмами регулювання? 2. Що потрібно визначити для налаштування PID-регулятора методом Зіглера–Ніколса?
25	1. Які переваги та недоліки має дискретне керування порівняно з безперервним? 2. У якій побутовій системі найчастіше застосовується PI-регулятор?
26	1. Як вибір періоду дискретизації впливає на якість роботи дискретного алгоритму? 2. Який тип регулятора найчастіше використовується для стабілізації швидкості обертання двигуна?
27	1. У чому полягає суть логічного керування і для яких задач воно найдоцільніше? 2. Що відбувається при надмірному збільшенні коефіцієнта у PID-регуляторі?
28	1. Які механізми реалізації адаптивного керування використовуються в сучасних САК? 2. Який регулятор самостійно не здатен стабілізувати систему?
29	1. Які критерії оптимальності застосовуються в оптимальному керуванні і як вони формалізуються? 2. У чому полягає роль інтегрального компонента в PID-регуляторі?
30	1. Як обрати тип керування (логічне, адаптивне, оптимальне) залежно від характеристик об'єкта і умов задачі? 2. Який регулятор найчутливіший до вимірювальних шумів?

2. Відповідно до даних таблиці 9.3 виконайте вибір регулятора (P, PI, PD, PID) та надайте пояснення вибору.

Таблиця 9.3 – Вихідні дані

Номер варіанта	Ситуація
1	2
1	Керування швидкістю охолоджувального компресора у кондиціонері
2	Регулювання витрати газу у газовому пальнику
3	Підтримання оборотів турбіни газового нагрівача
4	Керування температурою подачі теплоносія у центральній системі опалення
5	Підтримання концентрації CO ₂ у приміщенні за допомогою вентиляції
6	Підтримання тиску у системі холодного водопостачання багатоповерхового будинку
7	Підтримання температури повітря у припливній вентиляційній установці з нагрівачем
8	Регулювання тиску природного газу на газорозподільчій станції
9	Стабілізація витрати води в системі гарячого водопостачання
10	Керування температурою в електричній печі з повільною динамікою
11	Підтримання тиску в насосній станції водопостачання
12	Регулювання рівня води в резервуарі зі змінною витратою
13	Керування швидкістю обертання вентилятора
14	Стабілізація напруги в лабораторному джерелі живлення
15	Позиціонування сервоприводу роботизованої руки
16	Керування кутовою швидкістю двигуна постійного струму під змінним навантаженням
17	Підтримання вологості повітря в інкубаторі
18	Стабілізація частоти обертання ротора в вітрогенераторі
19	Керування рівнем освітленості лампою в системі «розумний дім»
20	Робота маніпулятора
21	Контроль швидкості подачі стрічки на конвеєрі
22	Стабілізація температури в холодильній камері
23	Автоматичне відкриття дверей за датчиком наближення
24	Регулювання тиску пари в промисловому котлі
25	Підтримання частоти мережі в електростанції
26	Керування рівнем кисню в акваріумі
27	Контроль подачі палива у двигуні внутрішнього згорання
28	Регулювання швидкості насоса в залежності від заданого потоку
29	Стабілізація положення платформи з використанням гіроскопа
30	Підтримання постійної подачі фарби в друкарському обладнанні

10 КОНЦЕПЦІЇ БУДІВЕЛЬ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

Мета заняття – формування у здобувачів освіти цілісного розуміння концепції будівель з нульовим енергоспоживанням (NZEB), ознайомлення зі світовими стандартами та нормативно-правовою базою у цій сфері, а також аналіз переваг і ключових викликів упровадження NZEB у сучасних умовах.

Теоретичні положення. Будівлі з майже нульовим споживанням енергії (NZEB) – це споруди з дуже низькою річною потребою в енергії, значна частина якої покривається локальними відновлюваними джерелами. Концепція базується на поєднанні пасивних (теплоізоляція, герметичність, раціональна архітектура) та активних рішень (рекуперація, автоматизація, ВДЕ) й є одним із ключових інструментів європейської політики декарбонізації. З 2021 року стандарт NZEB обов’язковий у ЄС, а в Україні впроваджується через гармонізацію норм.

Основою NZEB є висока енергоефективність оболонки будівлі, обов’язкове застосування вентиляції з рекуперацією, енергоощадних систем і автоматизованого керування, а також інтеграція ВДЕ – сонячних панелей, теплових насосів, біомаси. Річний баланс визначають за первинною енергією, враховуючи коефіцієнти перетворення та можливість компенсації з мережею. NZEB входить у ширшу класифікацію ефективних споруд: Low-Energy Buildings, NZEB і Zero Emission Buildings (ZEB), що стануть базовим стандартом ЄС після 2030 року.

В Україні вимоги NZEB визначають [3, 28], які регламентують теплотехнічні характеристики конструкцій, повітронепроникність, роботу вентиляції, системи освітлення й ГВП, а також процедури енергетичної сертифікації. Ці документи узгоджені з Директивою ЄС щодо енергетичних характеристик будівель та стандартами EN і ISO, що формують єдину методику оцінки енергобалансу, первинної енергії та викидів CO₂.

Американські стандарти ASHRAE 90.1, ASHRAE 189.1 та кодекс ІЕСС встановлюють мінімальні вимоги до енергоефективності та стали основою для системи LEED і підходу Zero Net Energy Ready. Вони охоплюють питання теплоізоляції, HVAC, освітлення, автоматизації та інтеграції ВДЕ, формуючи цілісний підхід до проєктування ефективних будівель.

NZEB відіграють ключову роль у реалізації Європейського зеленого курсу, який передбачає зниження викидів на 55 % до 2030 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050-го. Такі будівлі демонструють скорочення споживання первинної енергії на 60–90 % завдяки ізоляції, рекуперації, BMS і локальній генерації, що зменшує залежність від викопних ресурсів і майже нівелює експлуатаційні викиди CO₂.

В Україні перші NZEB-проекти показують значне зниження енергоспоживання в дитячих садках, муніципальних будівлях та ЦНАПах. Завдяки утепленню, рекуперації, тепловим насосам, сонячним системам і BMS рівень енергоспоживання зменшився до 40–60 кВт·год/(м²·рік), а викиди CO₂ – на 50–80 %. Впровадження NZEB підтримує євроінтеграційний курс України та відкриває доступ до фінансових інструментів ЄС для реалізації енергоефективних проєктів.

Приклад. Реалізація модернізації багатоквартирного будинку.

Вихідні дані (прийнято умовно):

- 5-поверховий будинок, 20 квартир;
- стіни: 200 мм цегли;
- вікна: дерев'яні старі;
- радіатори – конвектора «Комфорт»;
- енергоспоживання на опалення: 180 кВт · год/м²/рік.

Мета: модернізувати будинок для наближення до NZEB.

1. Утеплення будинку:

- стіни: утеплення мінеральною ватою товщиною ~ 200 мм → зниження тепловтрат до 40-50 кВт·год/м²/рік;
- дах: утеплення пінополістиролом товщиною ~ 250 мм → зменшення теплових втрат на ~ 70 %;
- вікна: заміна на енергозберігаючі трикамерні склопакети → зменшення теплових втрат на ~ 60-70 %.

Результат: енергоспоживання знижується з 180 кВт · год/м²/рік до 70–80 кВт · год/м²/рік.

2. Модернізація системи опалення:

- реконструкція системи опалення з переходом від однотрубною на двотрубну систему опалення;
- встановлення ефективної теплової ізоляції трубопроводів системи опалення;
- заміна нагрівальних приладів на більш ефективні, наприклад біметалеві радіатори;
- встановлення на радіаторах радіаторних клапанів з термостатичними головками;
- реконструкція обладнання індивідуального пункту: встановлення погодозалежного регулювання, насосів з частотним перетворювачем.

Результат: зниження енергоспоживання на ~ 20 %.

3. Встановлення сонячних панелей для забезпечення електричною енергією місць загального користування:

- PV-панелі на даху для живлення ліфтів, освітлення місць загального користування та насосів (~10 кВт);
- можливе встановлення невеликої батареї для акумулювання надлишкової енергії.

Результат: до 100 % покриття електроспоживання спільних зон із власної генерації.

4. Вентиляція та рекуперація:

- механічна вентиляція з рекуперацією тепла у квартирах або у під'їздах;
- ККД рекуперації 80–90 %.

Результат: мінімізація втрат тепла через вентиляцію.

5. Оцінка результатів:

- енергоспоживання на опалення: 60–70 кВт · год/м²/рік (зменшено майже у 3 рази);

- електроспоживання спільних зон покривається сонячними панелями;
- модернізація наближає будинок до стандарту NZEB.

6. Реалізація:

- висока початкова вартість;
- необхідність узгодження з мешканцями будинку;
- обмежена площа даху для PV-панелей → можливо часткове покриття.

Схема енергопотоків будинку після модернізації наведена на рисунку

10.1.

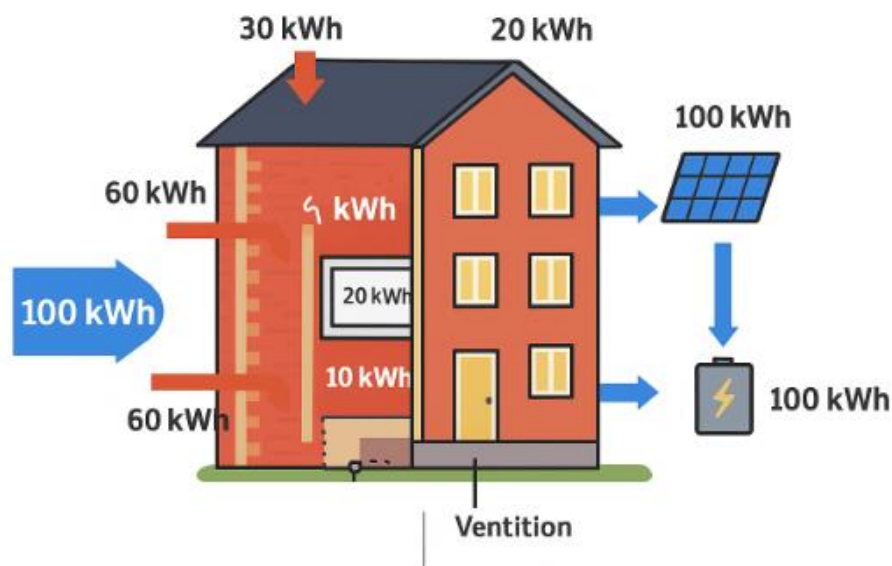


Рисунок 10.1 – Схема енергопотоків житлового будинку після модернізації

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 10

Виконати реферат обсягом 5 сторінок. Теми рефератів наведені у таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Теми рефератів

Номер варіанта	Тема
1	2
1	Поняття Net Zero Energy Building: еволюція, визначення та сучасні підходи.
2	Принципи формування енергетичного балансу в будівлях NZEB.
3	Пасивні та активні технології в NZEB: порівняльний аналіз.
4	Роль відновлюваних джерел енергії у досягненні нульового енергоспоживання.
5	Архітектурні рішення, що забезпечують енергоефективність будівель NZEB.
6	Інтеграція енергоефективних матеріалів у проєктуванні NZEB: властивості та критерії вибору.
7	Енергетичний моніторинг як інструмент оптимізації роботи NZEB.
8	Порівняння NZEB, ZEB та нульових викидів: спільні риси та відмінності.
9	Енергомодельовання як основа проєктування будівель NZEB.
10	Життєвий цикл будівлі NZEB: екологічні та економічні аспекти.
11	Європейська нормативна база NZEB: вимоги Директиви EPBD та Green Deal.
12	Стандарти США: ASHRAE, LEED Zero та DOE Zero Energy Ready Homes.
13	Нормативи та ДСТУ України щодо NZEB: сучасний стан та перспективи розвитку.
14	Порівняльний аналіз вимог NZEB у країнах ЄС.
15	Сертифікаційні системи Passivhaus та їх роль у формуванні NZEB.
16	Вимоги до теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій у NZEB.
17	Нормативи щодо відновлюваної енергетики для NZEB у міжнародній практиці.
18	Регуляторна політика та економічні стимули розвитку NZEB у різних країнах.
19	Стандарти Zero Emission Building (ZEB) та їх вплив на еволюцію NZEB.
20	Інтеграція NZEB у регіональні та національні кліматичні стратегії.
21	Переваги NZEB для будівельного сектору: енергоефективність, комфорт, екологія.
22	Економічна ефективність впровадження NZEB: аналіз витрат і окупності.
23	Основні технічні бар'єри на шляху реалізації NZEB.
24	Роль NZEB у скороченні викидів CO ₂ та досягненні кліматичної нейтральності.
25	Соціальні аспекти впровадження NZEB: прийняття користувачами та поведінкові чинники.
26	Проблеми інтеграції систем ВДЕ в міські будівлі NZEB.
27	Виклики модернізації існуючого фонду будівель до рівня NZEB.
28	Вплив NZEB на розвиток ринку будівельних матеріалів та технологій.
29	Управління енергетичними потоками в NZEB: проблеми та шляхи їх вирішення.
30	Майбутні тренди та інновації, що визначають розвиток NZEB у світі.

Вимоги до оформлення реферату.

Реферат має містити титульний аркуш з вказанням теми реферату, прізвища та ім'я здобувача, номера групи.

Текст реферату потрібно набирати за допомогою Microsoft Word (або аналогічного текстового редактора) застосовуючи шрифт Times New Roman кеглем 14 пт, міжрядковий інтервал 1,5. Формат аркушу А4 (210 мм × 297 мм).

Розмір полів: ліве поле – не менше ніж 25 мм, верхнє та нижнє – не менше ніж 20 мм, праве – не менше ніж 15 мм. Абзацний відступ рекомендується встановлювати у межах 1–1,5 см.

11 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (BMS) У NZEB

Мета заняття – сформувати у студентів практичні навички роботи з інтелектуальними системами управління будівлею (BMS) у контексті NZEB, навчити налаштовувати та аналізувати роботу підсистем опалення, вентиляції, освітлення та ГВП, а також забезпечити розуміння принципів взаємодії BMS із датчиками температури, CO₂ та присутності для підвищення енергоефективності та комфорту в будівлі.

Теоретичні положення. BMS – це інтегрована платформа централізованого керування та моніторингу інженерних систем будівлі: HVAC, освітлення, енергопостачання, водопостачання та безпеки. У спорудах класу NZEB вона виступає ключовим інструментом підвищення енергоефективності завдяки адаптивному регулюванню мікроклімату, інтеграції відновлюваних джерел енергії, аналізу даних і оптимізації використання ресурсів. Система поєднує комфорт, економічність та відповідність екологічним стандартам, реалізує прогнозне управління, забезпечує аварійне реагування й формує звітність для енергоаудиту.

Інтелектуальна автоматизація сприяє раціональному використанню енергії та мінімізації впливу на довкілля. Постійний моніторинг і аналіз параметрів дозволяють знижувати втрати навіть за змінних умов експлуатації.

У NZEB BMS інтегрує ВДЕ, керує навантаженнями, підвищує автономність та оптимізує роботу обладнання на основі даних сенсорів (температура, CO₂, рух, освітленість). Система забезпечує діагностику, підтримку технічного обслуговування, а також взаємодіє з IoT, BIM, ERP і хмарними сервісами, гарантуючи кіберзахист та ефективне аварійне реагування.

Основні компоненти BMS:

- контролери (PLC/DDC);
- сенсори та приводи;

- комунікаційні протоколи: BACnet, Modbus, KNX, MQTT;
- HMI/SCADA для моніторингу та керування;
- сервери з аналітикою;
- мережі та системи кіберзахисту.

Функціональність у NZEB

BMS виступає «енергетичним мозком» будівлі: координує інженерні системи, управляє генерацією та накопиченням енергії, підтримує мікромережі й Smart Grid, мінімізує пікові навантаження та застосовує прогнозні алгоритми.

1. Опалення:

- регулювання подачі тепла, уставок, графіків, погодозалежних режимів і зонального обігріву;
- економія 20–30 %, відсутність перегріву, відповідність стандартам NZEB.

2. Вентиляція:

- контроль CO₂, вологості, тиску;
- автоматичне регулювання повітрообміну, рекуперація, контроль фільтрів, адаптація до присутності людей;
- зменшення тепловтрат до 50 %.

3. Освітлення:

- використання датчиків освітленості, руху та присутності;
- сценарії, димування, Daylight Harvesting, інтеграція з системами безпеки;
- економія електроенергії до 40 %.

4. Гаряче водопостачання (ГВП):

- керування температурою, циркуляцією та насосами;
- інтеграція ВДЕ, прогнозування, антилегіонельні цикли;
- зменшення споживання невідновлюваної енергії.

5. Технічна частина:

- сенсори вимірюють параметри мікроклімату;
- виконавчі механізми реалізують команди контролерів;
- алгоритми PID та логічне керування;
- обмін даними через BACnet, Modbus, KNX, MQTT, OPC UA;
- SCADA відповідає за моніторинг і архіви, HMI – за уставки та повідомлення.

6. Приклади застосування:

- зменшення вентиляції при CO₂ < 600 ppm;
- регулювання освітлення залежно від природного світла;
- використання нічного природного охолодження;
- економні режими опалення у вихідні.

Сенсори як основа BMS.

Температурні, CO₂, освітленості, присутності, вологості, тиску та витрат – забезпечують точне регулювання систем і адаптивне управління. Вони визначають потребу в теплі, холоді, світлі, вентиляції чи воді та формують оптимальні режими роботи NZEB.

Роль сенсорів:

- точний контроль ресурсів;
- адаптація до умов;
- прогнозування;
- підтримка мікромереж;
- аналітика та енергоаудит.

Алгоритми BMS.

- IF–THEN: CO₂ > 1000 ppm → збільшити вентиляцію; відсутність руху → вимкнути світло;
- комбіновані реакції: температура + присутність; CO₂ + вологість;
- прогнозні алгоритми: попередній прогрів, реакція на погодні умови, ML-оптимізація режимів.

BMS забезпечує комплексне, адаптивне та енергоефективне управління будівлею, формуючи основу для стандартів NZEB та концепції Smart City.

12 ІНТЕГРАЦІЯ BMS З АКТИВНИМИ ТА ПАСИВНИМИ СИСТЕМАМИ

Мета заняття – ознайомити студентів з принципами інтеграції систем управління будівлею (BMS) з пасивними та активними інженерними системами, навчити застосовувати алгоритми взаємодії між ними для підвищення енергоефективності, комфорту та безпеки. Сформувані практичні навички створення сценаріїв енергозбереження та оптимізації роботи обладнання на основі зовнішніх умов і стану будівлі.

Теоретичні положення. Тепловий насос – енергоефективний пристрій, що переносить тепло з повітря, води чи ґрунту до систем опалення та ГВП за принципом зворотного холодильного циклу, його ефективність визначається коефіцієнтом COP (3–5+), який показує співвідношення виробленого тепла до витраченої електроенергії. Насоси працюють у режимах опалення, охолодження та підігріву води, забезпечуючи низькі викиди й можливість поєднання з відновлюваними джерелами енергії.

Інтеграція з BMS дозволяє автоматично перемикати режими, керувати графіками, координувати роботу з вентиляцією, фанкойлами, буферними ємностями, а також здійснювати моніторинг електроспоживання, теплової

продуктивності, COP, SCOP і SEER. Оптимізація включає інверторне регулювання, аналіз ефективності та прогнозування навантажень за даними погодних станцій, інтеграцію з сонячними колекторами, PV, тарифами й резервними котлами. BMS реалізує сценарії пріоритетів джерел енергії, балансування навантажень та акумулювання тепла.

Сонячні колектори працюють разом із насосами, котлами та акумуляторами, а BMS керує циркуляційними насосами, розподілом тепла між ГВП, опаленням і басейнами, забезпечуючи пріоритет сонячної енергії, захист від перегріву й замерзання та підвищення ефективності на 20–40 %. Система прогнозує сонячну активність, оптимізує роботу обладнання, зменшує використання електронагрівачів і переносить роботу насосів на періоди інсоляції.

Жалюзі та освітлення також інтегруються в BMS: сенсори освітленості, сонячної радіації й астрономічні алгоритми керують положенням жалюзі та рівнем світла, реалізуючи сценарії ранкового відкриття, денного затінення, захисту від перегріву й відблисків, а також Cooling Priority. Це дозволяє знизити енергоспоживання на охолодження на 15–25 % та освітлення на 30–50 %, забезпечуючи комфорт і пасивну терморегуляцію.

Вентиляційні клапани працюють у режимах Night Purge (нічне охолодження будівлі) та Free Cooling (природна вентиляція), автоматично закриваючись при сильному вітрі, морозі, забрудненні чи пожежній тривозі, що дає економію 15–30 % та стабільний мікроклімат.

Додаткові енергозберігальні сценарії BMS – нічний режим і режим «Відсутність користувачів» – мінімізують споживання енергії, використовуючи природне охолодження та дані сенсорів присутності, забезпечуючи економію 20–40 % і продовження ресурсу обладнання.

У комплексі поєднання теплових насосів, сонячних колекторів, вентиляційних клапанів, жалюзі та освітлення під управлінням BMS створює гнучку, економну й екологічну систему HVAC з високим рівнем автоматизації, комфортом і відповідністю міжнародним стандартам енергоефективності.

Приклад 1. Аналіз роботи BMS-платформи.

Розглянемо два приміщення навчального закладу. Зона А – приміщення кафедри (кабінет). Зона Б – аудиторія. Запрограмовані дані параметрів позначені – ПД. Фактичні параметри – ФП. Дані наведені у таблиці 12.1. Аналіз роботи та дій системи – у таблиці 12.2.

Таблиця 12.1 – Дані параметрів

Параметр	Зона А		Зона Б	
	ПД	ФП	ПД	ФП
Температура, °C	20	21	18	19
Вологість, %	40–60	42	40–60	48
CO ₂ , ppm	1 000	860	1 000	1 320
Освітленість, лк	300	320	300	150
Присутність людей		Є		Немає

Таблиця 12.2 – Аналіз роботи BMS

Параметр	Аналіз та дія системи	
	Зона А	Зона Б
Температура, °C	21 °C > встановлених 20 °C → знизити подачу на 5 %	19 °C > встановлених 18 °C → знизити подачу на 5,6 %
Вологість, %	Значення у межах норми. Дій не потрібно: система зволоження / осушення залишається в режимі очікування.	Значення у межах норми. Дій не потрібно: система зволоження / осушення залишається в режимі очікування.
CO ₂ , ppm	CO ₂ 860 ppm < порогу 1000 ppm → система вентиляції залишається в режимі очікування.	CO ₂ 1320 ppm > порогу 1000 ppm → включити вентиляцію.
	Освітленість трохи вища за норму, але у допустимих межах 300–500 лк. Можливі дії: 1. Залишити освітлення без змін. 2. Якщо система підтримує автодиммерування → зменшити яскравість на 5–10%, щоб стабілізувати ~300 лк.	Освітленість нижча за норму, але в зоні немає присутності людей. Тобто немає присутності + освітленість низька, але зона не використовується → вимкнути.

Приклад 2. Автоматизація систем NZEB (числовий приклад).

1. Система опалення.

1.1. Вихідні дані:

- Бажана температура в приміщенні, в робочий час – 22 °C;
- Температура зовнішнього повітря – мінус 2 °C;
- Фактична температура внутрішнього повітря – 20 °C.

1.2. Приклад PID-регулювання (спрощено).

Похибка температури $e = 22 - 20 = 2$ °C;

Припустимо коефіцієнти контролера:

- $K_p = 8 \text{ \%} / \text{°C}$;
- $K_i = 1 \text{ \%} / (\text{°C} \cdot \text{хв})$ (інтегральна складова);

- $Kd = 0$.

Розрахунок:

- пропорційна складова: $8 \% \times 2 = 16 \%$;
- інтегральна складова після 5 хв: $1 \% \times 2 \times 5 = 10 \%$.

Вихід = $16 \% + 10 \% = 26 \%$ збільшення подачі тепла.

2. Система вентиляції.

Вихідні дані: поріг: 1 000 ppm.

Факт: 1 180 ppm → перевищення на 180 ppm.

Алгоритм:

- якщо перевищення < 300 ppm → збільшити вентиляцію на 20 %.

Отже: швидкість вентилятора = +20 %.

3. Освітлення.

3.1. Вихідні дані:

- нормований рівень: 300 лк;
- поточна освітленість: 120 лк;
- присутність: є;
- максимальна потужність групи світильників: 400 Вт.

3.2. Необхідне збільшення освітленості: $300 - 120 = 180$ лк.

Якщо 1 % яскравості дає 3 лк: $180 / 3 = 60 \%$.

Отже: яскравість світильників = 60 %.

Споживання: $0.6 \times 400 \text{ Вт} = 240 \text{ Вт}$.

4. Гаряче водопостачання.

4.1. Вихідні дані:

- поточна температура ГВП: 42 °C;
- потрібна: 50 °C;
- швидкість нагріву бойлера: 4 °C за 10 хв;
- об'єм бойлера: 200 л.

4.2. Розрахунок часу нагріву:

- необхідне підвищення температури $50 - 42 = 8$ °C.
- швидкість нагріву на 4 °C за 10 хвилин, тобто 0,4 °C за одну хвилину.
- час нагріву: $8 / 0,4 = 20$ хвилин.

BMS встановлює нагрівання на 20 хв до досягнення 50 °C.

Приклад 3. Інтеграція теплового насоса з BMS.

1. Вихідні дані:

Типовий об'єкт: багатоквартирний / комерційний будинок із централізованим тепловим насосом (повітря – вода або вода – вода) + один або кілька циркуляційних насосів, буферна ємність (ємність тепла), підмішувальний клапан для контуру опалення, фреонові компресори (1–2 стадії

або інверторний компресор), електронний розширювальний клапан, плати контролю внутрішніх зон (термостати).

BMS відповідає за:

- моніторинг і візуалізацію точок (температури, тиску, споживання енергії);
- логіку запуск / зупинка і захист компресора;
- керування насосами, змішувальними клапанами і VFD;
- планування (графік / календар), енергетичні тренди, тривоги / повідомлення;
- інтеграцію з платіжними / EMS / ПДУ (через BACnet/IP або Modbus TCP/RTU).

2. Система:

2.1. Тепловий насос (контролер виробника) – локальний регулятор компресора, вентилятору, клапанам.

2.2. BMS-шлюз (BACnet/IP або Modbus TCP/RTU) – опитування контролера теплового насоса, дисплеї, SCADA.

2.3. Датчики:

- T1: температура подача теплоносія (після теплообмінника);
- T2: температура зворотна;
- T3: температура буферної ємності (верх / низ якщо два датчики);
- T4..Tn: температури зон / термостати;
- P1: манометр / ультразвук для витрати (опціонально);
- R: лічильник електроенергії компресора.

2.4. Актуатори: циркуляційний насос (пуск / зупинка, VFD), змішувальний клапан (3-ходовий / 2-ходовий), клапан байпасу, електричний підігрів (резерв).

2.5. SCADA/Operator HMI – графіки, тренди, оповіщення.

3. Рекомендована структура BACnet + Modbus.

Основні точки (мінімум наведені у таблиці 12.3).

Таблиця 12.3 – Основні точки (мінімум)

Ч. ч.	Назва точки	Опис	Тип (BACnet)	Тип (Modbus)
1	2	3	4	5
1	HP_Status	Статус ТН (в/вимкнено, аварія)	BI / BV	Coil
2	HP_Mode	Режим: Авто/Тепло/Холод/Ручний	AV / BV	Holding Register
3	T_supply	Темп. подача (°C)	AI	Input Register (float)

Продовження таблиці 12.3

1	2	3	4	5
4	T_return	Темп. зворотна (°C)	AI	Input Register (float)
5	T_buffer_top	Темп. буфер (верх)	AI	Input Register
6	T_room_avg	Середня темп. зон (°C)	AV	Holding Reg (float)
7	Setpoint_supply	Задане значення подачі (°C)	AV	Holding Reg
8	Compressor_On	Компресор (УВИМК / ВИМК)	BO	Coil
9	Fan_Speed	Швидкість вентилятора / Inverter (%)	AV / AO	Holding Reg
10	Pump_Status	Насос циркуляції (УВИМК / ВИМК)	BO	Coil
11	Pump_VFD_Freq	Частота VFD насоса (Hz / %)	AV	Holding Reg
12	Valve_Position	Положення змішув. клапана (%)	AV	Holding Reg
13	Energy_kWh	Енергоспоживання компресора (кВт·год)	AI	Input Register (32-bit)
14	Flow_rate	Витрата теплоносія (м³/год)	AI	Input Reg
15	Alarm_Fault_Code	Код помилки / текст	BV / String	Holding Reg(s)
16	Compressor_Cycle_Count	Лічильник пусків	AI/AV	Input/Holding
17	Defrost_Status	Розморожування (для повітряних ТН)	BI	Coil
18	Lockout_Timer	Блокування від частих запусків (сек)	AV	Holding Register

4. Послідовність керування. Покрокова логіка для опалення.

4.1. Умова запуску:

- якщо середня температура зон $[T_{room_avg} < Setpoint_supply - \Delta]$ (гистерезис), та графік дозволяє (Schedule = ON), і немає аварії – дозволити запуск;
- перевірка: всі safety-входи ОК (перегрів / низький тиск / витрата / електроживлення).

4.2. Підготовка:

- увімкнути циркуляційний насос (Pump_Status = ON). Якщо VFD – плавне прискорення до початкової частоти;

- зачекати час циркуляції (наприклад 10–30 с) щоб уникнути сухого запуску.

4.3. Запуск компресора:

- компресор вмикається, але застосовується анти-короткокільцевий таймер (Lockout_Timer після вимкнення мін. 180 s);
- якщо інверторний – задати частоту за PID за [T_supply_setpoint];
- для ступінчастих компресорів: включати 1-й, якщо недостатньо – додати 2-й після затримки і перевірки тиску.

4.4. PID регулювання:

- PID керує або компресором (частота), або змішувальним клапаном, щоб тримати [T_supply = Setpoint_supply];
- якщо [T_return] занадто низький / високий – застосовувати логіку економайзера/байпаса.

4.5. Режим буфера / бак:

- якщо є буферна ємність, насос може працювати по сигналу ΔT : увімкнути насос на зону тільки якщо [T_buffer_top $\geq$ Setpoint_buffer];
- запобігання частим пускам: мінімальний час роботи компресора (наприклад 5–10 хв) і мінімальний час між пусками.

4.6. Дефрост (для повітря – вода):

- запуск циклу розморожування коли зовнішня температура та перепад тисків / температур відповідають критеріям;
- під час дефроста компресор може перемкнутися у режим холодопостачання / реверс-режим або зупинитись, включити електрообігрівання, керувати насосом відповідно.

4.7. Аварійні та захисні логіки:

- якщо низький тиск фреону / високий тиск / перегрів / відсутність витрати – аварія: зупинити компресор, відправити тривогу, залишити насос/вентилятор за потреби;
- якщо компресор не запускається 3 рази поспіль – блокування з повідомленням обслузі.

4.8. Економічні режими:

- нічного зниження [Setpoint_supply] згідно з календарем;
- можливість тарифного керування (peak shaving): якщо сигнал від EMS = peak, переводити в економічний режим (знижене Setpoint_supply або відключення непотрібних елементів).

5. Аварії та повідомлення.

Критичні (вимикають систему):

- HighPressureTrip (високий тиск фреону);
- LowPressureTrip (низький тиск фреону);
- Compressor_Overcurrent;
- Flow_Loss (втрата витрати / закриті клапани);
- HighSupplyTemp (перегрів).

Попереджувальні:

- Sensor_Failure (датчик temp / flow);
- HighCycleRate (занадто часті пуски);
- Energy_Anomaly (раптовий сплеск споживання).

6. Тренди та звіти.

- тренди з періодом збереження: 5–15 хв (температури, витрати, енергія), 1 хв для важливих процесів (компресор, насос);
- звіти: добові / місячні kWh теплового насоса, коефіцієнт ефективності $COP = (\text{теплова потужність} / \text{електроспоживання})$ – розрахунок в BMS;
- аналітика: час роботи компресора, кількість пусків, середній COP за період.

7. UI / HMI – рекомендовані екрани:

7.1. Dashboard (огляд) – статус HP, поточна подача / повернення, стан насосів, ключові алеги (6 шт), поточний COP, поточне енергоспоживання.

7.2. Trends – інструмент побудови графіків (T_{supply} , T_{return} , Power_kW) з масштабом.

7.3. History / Alarms – фільтри по часу / пріоритету, acknowledge кнопка.

7.4. Setpoints & Schedule – редагування графіків (теплі період / ніч), override.

7.5. Diagnostics – логи компресорів, Cycle count, датчики.

7.6. Energy report – генерація PDF/CSV з kWh, COP.

8. Рекомендації з налаштування і тестування:

- встановити мінімум захисних таймерів: мін. час роботи компресора, мін. час між пусками;
- тестувати аварії вручну (імітація низької витрати, вимкнення датчика) і перевіряти логіку BMS;
- налаштувати повідомлення на e-mail/SMS і процедури підтвердження (acknowledge);
- перевірити калібрування датчиків температури/витрати; для енергії – узгодити одиниці з лічильником;
- забезпечити резервування мережових шляхів (BACnet/IP over VLAN, Modbus RTU redundant gateway).

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 12

Відповідно до даних таблиці 12.4 виконати аналіз роботи BMS-платформи.

Таблиця 12.4 – Вихідні дані

Номер варіанта	Параметр	Програмоване значення	Фактичне значення
1	2	3	4
1	Температура, °C	20	21
	Вологість, %	40–60	35
	CO ₂ , ppm	1 000	900
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Є
2	Температура, °C	20	18
	Вологість, %	40–60	65
	CO ₂ , ppm	1 000	1 200
	Освітленість, лк	300	250
	Присутність людей		Є
3	Температура, °C	18	16
	Вологість, %	40–60	55
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	150
	Присутність людей		Ні
4	Температура, °C	20	22
	Вологість, %	40–60	70
	CO ₂ , ppm	1 000	1 250
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Ні
5	Температура, °C	16	14
	Вологість, %	40–60	50
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	250
	Присутність людей		Є
6	Температура, °C	20	18
	Вологість, %	40–60	35
	CO ₂ , ppm	1 000	1 100
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Ні
7	Температура, °C	20	19
	Вологість, %	45–55	35
	CO ₂ , ppm	1 000	1 100
	Освітленість, лк	300	200
	Присутність людей		Є
8	Температура, °C	20	21
	Вологість, %	45–55	65
	CO ₂ , ppm	1 000	1150
	Освітленість, лк	300	280
	Присутність людей		Ні

Продовження таблиці 12.4

1	2	3	4
9	Температура, °C	22	21
	Вологість, %	40–60	35
	CO ₂ , ppm	1 000	1 300
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Hi
10	Температура, °C	20	18
	Вологість, %	40–60	35
	CO ₂ , ppm	1000	900
	Освітленість, лк	300	250
	Присутність людей		Hi
11	Температура, °C	18	18
	Вологість, %	40–60	55
	CO ₂ , ppm	1 000	1 050
	Освітленість, лк	300	150
	Присутність людей		Є
12	Температура, °C	20	22
	Вологість, %	40–60	50
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	250
	Присутність людей		Є
13	Температура, °C	16	18
	Вологість, %	40–60	50
	CO ₂ , ppm	1 000	1 050
	Освітленість, лк	300	250
	Присутність людей		Hi
14	Температура, °C	20	18
	Вологість, %	40–60	65
	CO ₂ , ppm	1 000	1 100
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Є
15	Температура, °C	20	19
	Вологість, %	45–55	35
	CO ₂ , ppm	1 000	1 100
	Освітленість, лк	300	200
	Присутність людей		Є
16	Температура, °C	20	19
	Вологість, %	45–55	65
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	280
	Присутність людей		Hi
17	Температура, °C	20	21
	Вологість, %	45–55	35
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	280
	Присутність людей		Hi

Продовження таблиці 12.4

1	2	3	4
18	Температура, °C	14	16
	Вологість, %	40–60	55
	CO ₂ , ppm	1 000	900
	Освітленість, лк	300	300
	Присутність людей		Hi
19	Температура, °C	20	18
	Вологість, %	40–60	65
	CO ₂ , ppm	1 000	1 100
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Hi
20	Температура, °C	18	20
	Вологість, %	40–60	55
	CO ₂ , ppm	1 000	1 050
	Освітленість, лк	300	320
	Присутність людей		Hi
21	Температура, °C	20	22
	Вологість, %	40–60	50
	CO ₂ , ppm	1 000	1 050
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Є
22	Температура, °C	16	18
	Вологість, %	40–60	50
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	280
	Присутність людей		Hi
23	Температура, °C	20	18
	Вологість, %	40–60	65
	CO ₂ , ppm	1 000	900
	Освітленість, лк	300	150
	Присутність людей		Є
24	Температура, °C	20	19
	Вологість, %	45–55	50
	CO ₂ , ppm	1 000	1 000
	Освітленість, лк	300	200
	Присутність людей		Hi
25	Температура, °C	20	21
	Вологість, %	45–55	65
	CO ₂ , ppm	1 000	1 000
	Освітленість, лк	300	300
	Присутність людей		Hi
26	Температура, °C	20	19
	Вологість, %	45–55	35
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	300
	Присутність людей		Є

Закінчення таблиці 12.4

1	2	3	4
27	Температура, °C	16	16
	Вологість, %	40–60	65
	CO ₂ , ppm	1 000	1 000
	Освітленість, лк	300	300
	Присутність людей		Ні
28	Температура, °C	20	18
	Вологість, %	40–60	65
	CO ₂ , ppm	1 000	900
	Освітленість, лк	300	350
	Присутність людей		Є
29	Температура, °C	18	20
	Вологість, %	40–60	55
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	320
	Присутність людей		Ні
30	Температура, °C	20	22
	Вологість, %	40–60	50
	CO ₂ , ppm	1 000	950
	Освітленість, лк	300	300
	Присутність людей		Є

13 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ І АНАЛІТИКА

Мета заняття – набути практичних навичок зі збору, аналізу та інтерпретації енергетичних даних будівлі з використанням сучасних інструментів енергомоніторингу. Розвинути вміння формувати енергетичний профіль, виявляти втрати та аномалії споживання, а також підготовлювати звітність відповідно до вимог стандартів NZEB, ISO 52000 та EN 15232.

Теоретичні положення. Енергетичний профіль будівлі – узагальнене відображення її енергоспоживання, сформоване на основі даних HVAC, освітлення, електроживлення, ГВП, ВДЕ та систем безпеки. Інформацію забезпечують лічильники, датчики, BMS/SCADA та IoT, що фіксують обсяги й динаміку споживання. Профіль дозволяє визначати неефективності, пікові навантаження, аномалії та baseline, який є основою оптимізації й модернізації. Він входить до енергетичного сертифіката [6], застосовується в ISO 50001, LEED, BREEAM, підтримує політику декарбонізації (ЄЗУ, EPBD) та оцінку класу ефективності відповідно до [7, 28, 35].

Дані охоплюють HVAC (температура, вологість, витрати теплоносія), освітлення й електроживлення (споживання, навантаження), ВДЕ (виробіток). BMS, SCADA та IoT забезпечують збір у реальному часі, включно з аварійними

сигналами. Використовуються сенсори (температура, CO₂, освітленість) та протоколи BACnet, Modbus, KNX, MQTT. Перспективними є цифрові двійники й BIM-моделі відповідно до [7, 28, 35].

Стандартизація даних (CSV, XML, JSON, OPC UA) забезпечує сумісність. Частота збору – від 5–15 хв до 1 секунди для піків; синхронізація – через NTP/GPS; архівування – 3–5 років із захистом TLS/SSL та контролем доступу [47–49]. Аналітика формує baseline [28], KPI (EUI, kWh/m², CO₂/m²), порівнює результати з нормами [6, 7] та еталонними будівлями, моделює сценарії економії й модернізації. Звітність енергоаудиту містить профіль, baseline, KPI, аномалії та рекомендації [28, 50].

Аналітика перетворює масиви даних на управлінські рішення, виявляє теплові втрати, перевантаження, несправності, підвищує безпеку й прозорість витрат. Втрати спричиняють технічні, технологічні та поведінкові фактори (огородження, електромережі, неконтрольоване освітлення, неправильні налаштування BMS). Виявлення здійснюється через baseline, KPI, теплові карти, тренди, ML-алгоритми. Згідно з [35] аномалії поділяються на технічні, поведінкові й системні.

Інструменти – Power BI, Grafana, ISO 50001 – формують цифровий енергоконтур для прогнозування, оптимізації та аудиту [50]. Звітність NZEB включає джерела енергії, системи споживання, розподіл навантажень, показники EUI, CO₂/m², частку ВДЕ [7, 28, 35, 48, 51]. Автоматизація BACS [35] оптимізує HVAC, освітлення, вентиляцію й сонцезахист, знижуючи споживання та підвищуючи комфорт. Рекомендації охоплюють модернізацію обладнання, утеплення, балансування та організаційні заходи, що скорочують витрати й підтримують сертифікацію ISO 50001, LEED, BREEAM, EDGE [50].

Приклад 1. Збір даних та побудова енергетичного профілю.

1. Вихідні дані.

Будівля: навчальний корпус, площею $S = 4\,200\text{ м}^2$.

Період аналізу: 7 днів (1–7 листопада).

Джерела даних:

- електролічильник загальний (крок збору інформації 15 хвилин);
- тепловий лічильник системи опалення;
- лічильник освітлення та вентиляції (дані BMS);
- метеодані (температура зовнішнього повітря).

2. Збір та підготовка даних.

2.1. Електроспоживання. Приклад збору даних наведено у таблиці 13.1.

Таблиця 13.1 – Збір даних з електроспоживання

Дата / час	Загальна активна потужність, кВт
2025–11–01; 0:00	38,2
2025–11–01; 0:15	37,5
2025–11–01; 0:30	37,2
...	...
2025–11–01; 8:00	62,8

2.2. Споживання теплової енергії (за добу) наведено у таблиці 13.2.

Таблиця 13.2 – Добове споживання теплової енергії системи опалення

Дата	Споживання теплової енергії за добу, МВт
01.11.2025	2,11
02.11.2025	2,45
03.11.2025	1,98

2.3. Дані з BMS (вентиляція + освітлення):

- потужність вентиляційних установок – $6,2 \div 12,5$ кВт, залежно від зміни;
- освітлення – $4,5 \div 5,0$ кВт, у робочий час;
- нічний режим < 1 кВт.

3. Побудова енергетичного профілю.

3.1. Добові криві електроспоживання.

Зведений профіль за тиждень:

- нічне споживання (00:00–06:00): 36–40 кВт (стабільне);
- ранковий підйом (06:00–09:00): різкий ріст до 60–70 кВт;
- робочий період (09:00–18:00): 65–75 кВт;
- вечірнє зниження (після 18:00): до 42–45 кВт.

Графічне зображення кривих електроспоживання за добу наведено на рисунку 13.1.

3.2. Базова лінія.

Визначено методом регресії залежність електроспоживання від зовнішньої температури:

$$P = E + k \cdot HDD, \quad (13.1)$$

де E – базове електроспоживання будівлі без впливу погоди, кВт;

$k \cdot HDD$ – наскільки зростає споживання при похолоданні.

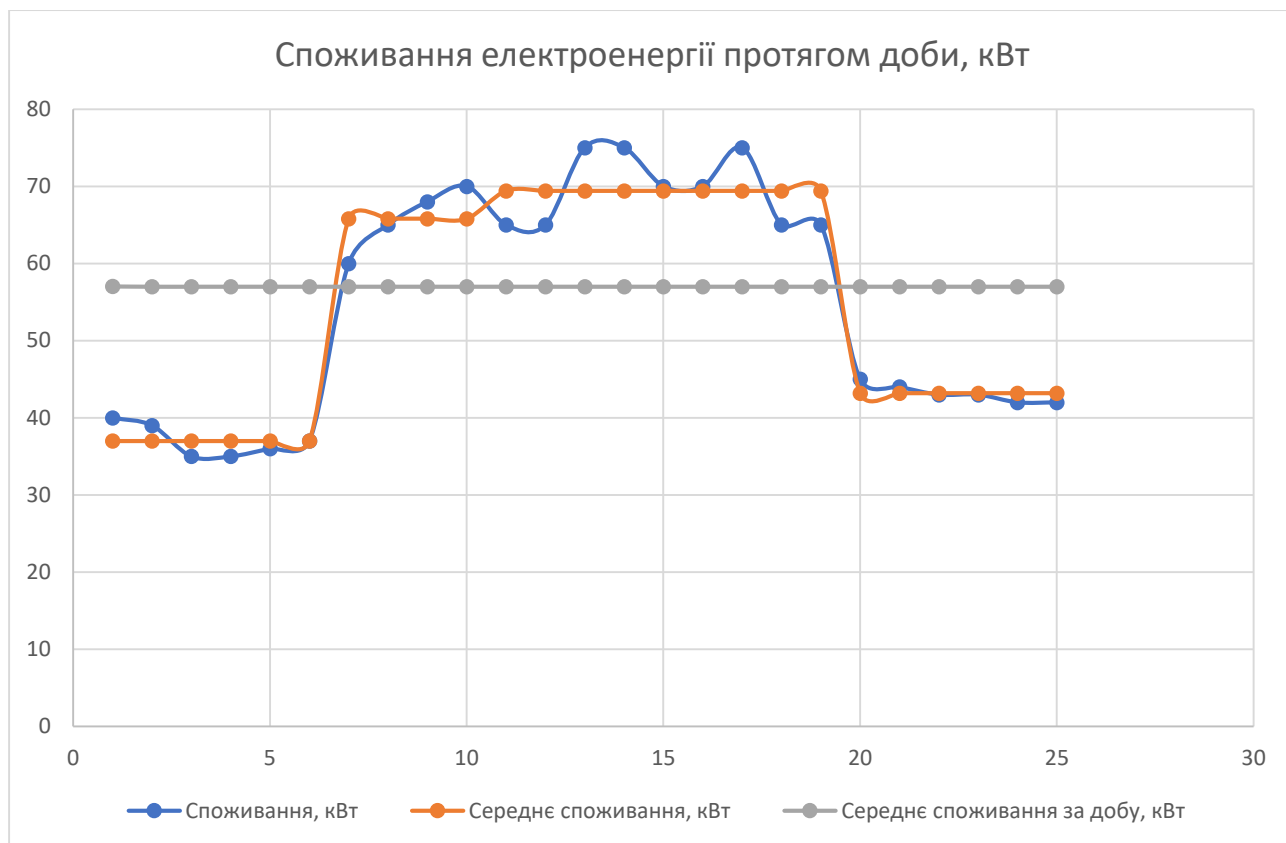


Рисунок 13.1 – Графічне зображення кривих електроспоживання за добу

HDD показує, наскільки холодним був день відносно певної базової температури. Чим холодніше надворі, тим більше HDD накопичується, і тим більше енергії потрібно на опалення.

$$HDD = \max(0, T_{base} - T_{out}) , \quad (13.2)$$

де T_{base} – базова температура (часто приймається 18 °C);

T_{out} – середньодобова температура зовнішнього повітря, °C.

Приклад:

- якщо середньодобова температура складає 5 °C $\rightarrow HDD = 18 - 5 = 13$ °C;
- якщо середньодобова температура складає 20 °C $\rightarrow HDD = 18 - 20 = -2$ °C $\rightarrow 0$ (береться 0 тобто опалення не потрібно).

За формулою 13.1 знаходимо фактичне добове електроспоживання будівлі:

$$P = 29,7 + 0,85 \cdot HDD.$$

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,82$ (хороша відповідність).

Коефіцієнт детермінації показує, наскільки добре модель (лінійна регресія) пояснює зміну фактичних даних.

- $R^2 = 1.0 \rightarrow$ модель ідеально описує дані;
- $R^2 = 0 \rightarrow$ модель нічого не пояснює;
- $R^2 \approx 0.82 \rightarrow$ модель добре відповідає фактичним даним.

$$S^2 = \frac{SS_{res}}{SS_{tot}},$$

де SS_{res} – сума квадратів похибок моделі (різниця між фактичними показниками та прогнозом);

SS_{tot} – загальна дисперсія даних.

4. Питомі навантаження.

Електроенергія:

$$Q_e = \frac{Q_E}{S} = \frac{1\,480}{4\,200} = 0,35 \text{ кВт/м}^2,$$

де Q_E – середньодобове споживання електроенергії, кВт/доба.

Опалення: $0,47 \div 0,58 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{доба)}$.

5. Висновки з енергетичного профілю.

5.1. Нічне базове навантаження завищене ($\sim 38 \text{ кВт}$).

Нормативно очікуване: $20\text{--}28 \text{ кВт} \rightarrow$ потенціал економії $\sim 10 \text{ кВт}$ постійно.

5.2. Вентиляція працює $3,2 \text{ кВт}$ зайвих у нічний час.
За нічний період ($10 \text{ год} \times 3,2 \text{ кВт}$) = $32 \text{ кВт} \cdot \text{год/ніч}$.

5.3. Освітлення – ефективно керується, майже без відхилень.

5.4. Споживання корелює з HDD $\rightarrow$ система опалення працює ефективно, серйозних аномалій не виявлено.

6. Рекомендації.

6.1. Встановити коректне розкладання для вентиляційної установки (очікувана економія до $960 \text{ кВт} \cdot \text{год/місяць}$).

6.2. Переглянути список обладнання, яке працює у нічному режимі, для зниження базового навантаження.

6.3. Додати датчики присутності у коридорні зони для зниження освітлювального навантаження у вечірній час.

6.4. Виконати перевірку відповідності EN 15232 (рівень автоматизації та можливості адаптивного керування).

Приклад 2. Виявлення втрат, неефективних зон та аномалій.

1. Вихідні дані.

Адміністративна будівля площею $S = 5\,100\text{ м}^2$;

Період аналізу: 14 днів.

Джерела аналізу:

- електролічильники (загальний + підсистеми);
- теплолічильник на опалення;
- BMS (вентиляція, насосні групи, освітлення);
- графік роботи будівлі (08:00–18:00).

2. Аналіз електроспоживання.

2.1. Нічне базове навантаження.

Фактичне нічне споживання (00:00–05:00): 48–52 кВт. Очікуване для такої будівлі: 30–38 кВт → Виявлена аномалія: завищений «нічний мінімум» на ~14 кВт.

Потенційні причини:

- не відключається частина вентиляції;
- робота насосів у ручному режимі;
- залишене офісне обладнання;
- некоректний графік BMS.

Розрахунок потенційних втрат:

$$14\text{ кВт} \times 5\text{ год} \times 30\text{ днів} \approx 2\,100\text{ кВт} \cdot \text{год/міс}.$$

2.2. Аналіз пікових навантажень.

Пік у будні: 92–95 кВт. Пік у вихідні: 74 кВт → Аномалія: вихідний пік лише на 20 % менший, ніж будній, хоча очікуване зниження повинно бути щонайменше 40–50 %.

Ймовірні причини:

- надлишкова робота вентиляції;
- робота ІТ-обладнання на повну потужність;
- освітлення у частині поверхів ввімкнене постійно.

3. Аналіз опалення (теплові втрати).

3.1. Залежність теплового споживання від погоди.

У теплі дні ($HDD \approx 0$): 1,3–1,4 МВт · год/добу. Очікувано повинно бути менш 0,9 МВт · год/доба → Виявлена аномалія: перевищення базового теплового навантаження на ~40–50 %.

Можливі причини:

- перегрів приміщень (внутрішня температура 24–26 °С),
- робота системи опалення без погодного регулювання;
- несправність терморегуляторів;
- неузгодженість роботи вентиляції та опалення (одночасне нагрівання й охолодження).

4. Аналіз роботи вентиляційних систем.

Згідно BMS, три установки мали графік:

- робочий час: 07:30–18:30 → ОК;
 - вечір: 18:30–00:00 → повинні вимикатися;
 - ніч: 00:00–07:30 → повинні працювати на 0,5 кВт у черговому режимі.
- Фактичні дані роботи вентиляційних установок наведені у таблиці 13.3.

Таблиця 13.3 – Фактичні дані роботи вентиляційних установок

Установка	Норма споживання, кВт	Фактичне споживання, кВт	Примітка
ВУ 1	0,5	3,1	Не переходить у нічний режим
ВУ 2	0,0	0,0	Норма
ВУ-3	0,5	0,8	Допустиме відхилення

ВУ-1 працює зайвих $2,6 \text{ кВт} \times 10 \text{ год/ніч} \times 30 \text{ днів} = 780 \text{ кВт} \cdot \text{год/міс}$.

5. Освітлення.

Звіт BMS і дані з лічильника:

- рівень споживання у нічний час: 6–7 кВт;
- очікуване значення: 2–3 кВт.

Перевірка поверхів показала:

- у коридорах 2-го та 4-го поверхів освітлення працює всю ніч;
- датчики руху несправні (затримка $> 40 \text{ хв}$);
- частина світильників керується вручну → не вимикається.

Потенційні втрати: $(4 \text{ кВт різниця} \times 10 \text{ год} \times 30 \text{ днів}) = 1\,200 \text{ кВт} \cdot \text{год/міс}$.

6. Виявлені неефективні зони вказані у таблиці 13.4.

Таблиця 13.4 – Найбільші неефективні зони

Зона	Втрата, кВт·год/міс.	Примітка
Нічне базове навантаження	~2 100	Системи без контролю
Освітлення коридорів	~1 200	Неправильне керування
Вентиляція (ВУ-1)	~780	Неправильний режим

Загальні втрати $\approx 4\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/міс}$, що відповідає $\approx 8\text{--}11\%$ енергоспоживання будівлі.

7. Рекомендації.

7.1. Термінові:

- відкоригувати розклади вентиляції у BMS;

- замінити або переналаштувати датчики руху;
- провести аудит нічного навантаження (серверні, насоси, системи охорони).

7.2. Середньострокові:

- впровадити автоматичне відключення освітлення за розкладом;
- оптимізувати погодне регулювання опалення;
- оновити інструкції персоналу щодо енергоефективного режиму.

7.3. Довгострокові:

- перехід на EN 15232 рівень В (вищий клас автоматизації);
- додавання лічильників по кожній підсистемі для точного моніторингу;
- інтеграція аналітики з прогнозами погоди.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 13

Відповідно до даних таблиці 13.5 визначити неефективні зони та аномалії. Надати рекомендації щодо усунення.

Таблиця 13.5 – Вихідні дані

Номер варіанта	Нічне базове навантаження, кВт		Пікові навантаження, кВт		Опалення, кВт		Вентиляція, кВт		Освітлення, кВт	
	Очіку- вання	Фактичне	Будні	Вихідні	Очіку- вання	Фактичне	Очіку- вання	Фактичне	Очіку- вання	Фактичне
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	30–35	34	90	54	0,8	1,1	0,8	2,0	3,0	5,0
2	30–35	45	90	56	0,8	0,7	0,8	0,9	3,0	2,8
3	40–45	44	80	64	0,9	1,2	0,5	1,5	2,0	1,8
4	40–45	50	80	54	0,9	0,8	0,5	0,6	2,0	2,8
5	45–50	47	70	54	1,0	1,1	0,7	0,6	2,5	2,4
6	45–50	55	70	60	1,0	0,9	0,7	0,9	2,5	3,4
7	50–55	58	75	45	0,85	1,05	0,6	0,7	1,5	2,0
8	50–55	48	75	70	0,85	0,8	0,6	1,7	1,5	1,5
9	30–35	34	90	54	1,0	1,1	0,7	0,6	2,5	2,4
10	30–35	45	90	56	1,0	0,9	0,7	0,9	2,5	3,4
11	40–45	44	80	64	0,85	1,05	0,6	0,7	1,5	2,0
12	40–45	50	80	54	0,85	0,8	0,6	1,7	1,5	1,5
13	45–50	47	70	54	0,8	1,1	0,8	2,0	3,0	5,0
14	45–50	55	70	60	0,8	0,7	0,8	0,9	3,0	2,8
15	50–55	58	75	45	0,9	1,2	0,5	1,5	2,0	1,8

Продовження таблиці 13.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16	50–55	48	75	70	0,9	0,8	0,5	0,6	2,0	2,8
17	30–35	34	90	54	1,0	1,1	0,7	0,6	2,5	2,4
18	30–35	45	90	56	1,0	0,9	0,7	0,9	2,5	3,4
19	40–45	44	80	64	0,85	1,05	0,6	0,7	1,5	2,0
20	40–45	50	80	54	0,85	0,8	0,6	1,7	1,5	1,5
21	45–50	47	70	54	0,8	1,1	0,8	2,0	3,0	5,0
22	45–50	55	70	60	0,8	0,7	0,8	0,9	3,0	2,8
23	50–55	58	75	45	0,9	1,2	0,5	1,5	2,0	1,8
24	50–55	48	75	70	0,9	0,8	0,5	0,6	2,0	2,8
25	30–35	34	90	54	1,0	1,1	0,7	0,6	2,5	2,4
26	30–35	45	90	56	1,0	0,9	0,7	0,9	2,5	3,4
27	40–45	44	80	64	0,85	1,05	0,6	0,7	1,5	2,0
28	40–45	50	80	54	0,85	0,8	0,6	1,7	1,5	1,5
29	45–50	47	70	54	0,8	1,1	0,8	2,0	3,0	5,0
30	45–50	55	70	60	0,8	0,7	0,8	0,9	3,0	2,8

14 ВЗАЄМОДІЯ З ЗОВНІШНІМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ТА МЕРЕЖЕЮ

Мета заняття – ознайомити студентів із принципами інтеграції будівлі з зовнішніми джерелами енергії та електромережею шляхом моделювання роботи фотовольтаїчних установок, акумуляторних систем, котлів на біомасі та механізмів smart-grid. Розвинути навички розрахунку енергетичного балансу, оптимізації потоків енергії, прогнозування навантаження та ухвалення рішень щодо експорту / імпорту енергії в мережу.

Теоретичні положення. Децентралізовані джерела енергії підвищують стійкість системи, зменшують залежність від централізованих мереж і втрати при передачі. Вони забезпечують гнучке реагування на навантаження та інтеграцію ВДЕ. Керування охоплює регулювання напруги й частоти, оптимізацію роботи, синхронізацію з мережею та моделі Net Metering, Feed-in Tariff, Demand Response. Основою є цифрові системи SCADA, EMS, IoT, Smart Grid та алгоритми ШІ.

Фотовольтаїка потребує керування для стабільної генерації; продуктивність залежить від інсоляції, температури й стану панелей. Ефективність підвищують MPPT-алгоритми (P&O, Incremental Conductance, ШІ). Інвертори (автономні, мережеві, гібридні) виконують перетворення, синхронізацію й захист. Прогнозування за метеоданими допомагає балансувати навантаження та керувати акумуляторами.

Акумулятори згладжують піки, стабілізують мережу й забезпечують резерв. Найпоширеніші – літій-іонні, також Pb-acid, NaS, NiMH, твердотільні. BMS контролює напругу, струм, температуру, SoC/SoH, запобігаючи перевантаженням. Стратегії заряджання – статичні та прогнознi.

Біоенергетика забезпечує стабільну генерацію через зброджування, піроліз і спалювання. Біомаса є керованим джерелом, ефективним як резерв і балансування. Когенерація підвищує ККД, а поєднання з PV та акумуляторами дозволяє застосовувати оптимізаційні алгоритми.

Інтеграція децентралізованих джерел енергії потребує EMS і SCADA для оптимізації потоків, прогнозування та контролю. Дотримання стандартів (IEEE 1547, IEC 61727) забезпечує узгодження параметрів і безпечну роботу. Системи працюють у мережевому, автономному, резервному й гібридному режимах, що вимагає адаптивного керування інверторами й накопичувачами.

Гібридні мікромережі поєднують PV, акумулятори, біоенергетику та інтелектуальні системи. Вони забезпечують енергонезалежність, резерв і утилізацію відходів, зменшують витрати й вуглецевий слід у різних секторах.

Балансування між генерацією та споживанням – ключова умова стабільності. У централізованих мережах його забезпечують великі станції, у децентралізованих – локальні генератори, накопичувачі та керовані споживачі. Зростання частки ВДЕ ускладнює баланс через непередбачуваність сонця й вітру.

Інструменти:

- гнучка генерація (ГЕС, ТЕС, біоенергетика);
- системи накопичення (акумулятори, ГАЕС);
- керування навантаженням (DSM).

Сучасні енергосистеми – кіберфізичні комплекси, що застосовують rule-based, оптимізаційні та AI/ML-алгоритми у Smart Grid. Децентралізовані системи працюють у режимах off-grid, on-grid, гібридному; підключення здійснюється за міжнародними стандартами.

Smart Grid поєднує традиційну інфраструктуру з автоматизованим управлінням, забезпечує самодіагностику, гнучкість і кіберстійкість. Децентралізовані ДжЕ (PV, вітер, біомаса, акумулятори) часто створюють профіцит, який передається до мережі через Net Metering, FiT або Net Billing. Для безпечного підключення застосовують grid-tie інвертори з синхронізацією та антиостровним захистом.

Цифрове управління реалізують EMS, SCADA, смарт-лічильники та IoT-протоколи (Modbus, MQTT, OPC UA). Економічні механізми – Net Metering, Feed-in Tariff, peer-to-peer обмін.

Прогнозування споживання з урахуванням погоди дозволяє оптимізувати баланс, уникати піків і реагувати на екстремальні умови. Використовуються дані метеостанцій, супутників (Copernicus, NOAA, MeteoBlue) та IoT-сенсорів. Методи – статистичні моделі, ML-алгоритми, гібридні підходи.

Приклади:

- у теплицях прогноз сонячності знижує споживання на ~20 %;
- у тепломережах прогноз температури економить 10–15 % палива;
- в офісах BMS зменшує пікове споживання на 15–25 %.

Прогнозування стає ключовим елементом точного балансування та енергоефективності в умовах кліматичної мінливості й розвитку Smart Grid.

Приклад 1. Розрахунок PV-продуктивності за погодними даними (GHI, температура).

Вихідні дані наведені у таблиці 14.1.

Таблиця 14.1 – Вихідні дані (для 1 години)

Параметр	Позначення	Значення
Глобальна горизонтальна інсоляція	GHI	650 Вт/м ²
Температура навколишнього повітря	T _{air}	21 °C
Потужність PV-масиву (STC)	P _{STC}	10 кВт
Температурний коефіцієнт панелі	γ	–0,0045 /°C
НОСТ панелі	T _{NOCT}	45 °C
Стандартна температура	T _{ref}	25 °C
Ідеальні умови STC: G _{STC}	1000 Вт/м ²	–

Задання: знайти фактичну електричну потужність PV за наведеними вище умовами.

1. Розрахунок температури панелі.

Температуру панелі знаходимо за формулою:

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{GHI}{800} (T_{NOCT} - 20) = 21 + \frac{650}{800} (45 - 20) = 41,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

2. Корекція ефективності за температурою.

Температурний вплив:

$$\Delta T = T_{cell} - T_{ref} = 41,3 - 25 = 16,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Відносна зміна ефективності:

$$f_T = 1 + \gamma \cdot \Delta T = 1 - 0,0045 \times 16,3 = 0,9266.$$

Зміна ефективності:

$$\Delta\eta = \gamma \cdot \Delta T = -0,0045 \times 16,3 = -0,0734.$$

Отже втрата ефективності складає: 7,3 %.

3. Корекція потужності на освітленість (GHI).

Відносна освітленість:

$$f_G = \frac{GHI}{G_{STC}} = \frac{650}{1000} = 0,65,$$

де G_{STC} – стандартна густина сонячного потоку, при якій вимірюється номінальна (паспортна) потужність фотомодуля, Вт/м².

4. Фактична потужність PV:

$$P = P_{STC} \cdot f_G \cdot f_T = 10 \times 0,65 \times 0,9266 = 6,02 \text{ кВт.}$$

Приклад 2. Модулювання роботи акумулятора за 24 години, побудова графіку SoC.

Вихідні дані:

- ємність акумулятора: 50 кВт · год;
- початковий SoC: 20 % = 10 кВт · год;
- максимальна потужність заряд / розряд: 10 кВт;
- ефективність зарядки: 95 %;
- ефективність розрядки: 95 %.

Навантаження будинку наведено у таблиці 14.2.

Таблиця 14.1 – Навантаження будинку протягом доби.

Години	Навантаження
1	2
0	4
1	4
2	4
3	4
4	4
5	4
6	4
7	5
8	6
9	7
10	6
11	5
12	6
13	7
14	6
15	5
16	6

Продовження таблиці 14.1

1	2
17	7
18	6
19	5
20	4
21	4
22	4
23	4

Графічна відповідь наведена на рисунку 14.1.

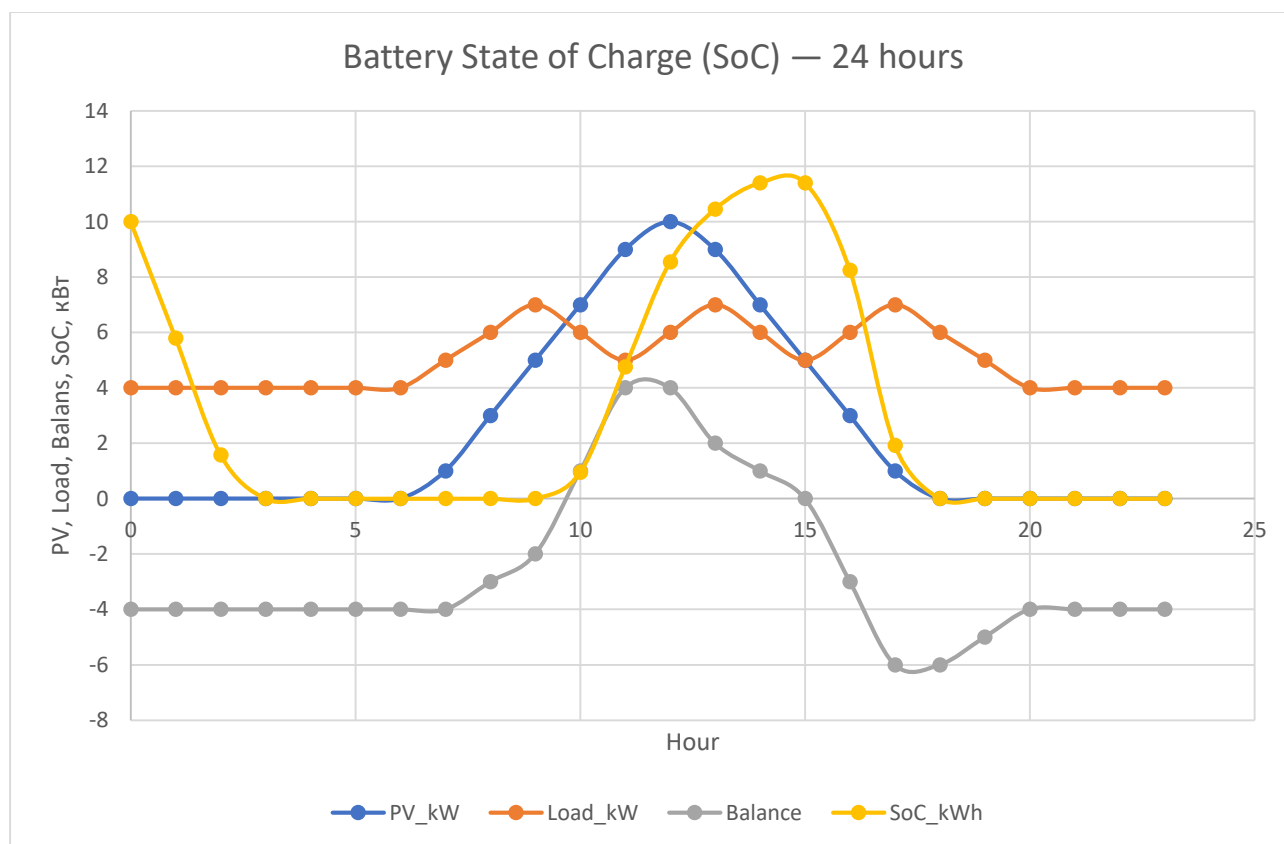


Рисунок 14.1 – Рівень заряду акумулятора (SoC) – 24 години

Висновки:

1. Акумулятор швидко розряджається вночі і рано вранці.

Навантаження будівлі постійно присутнє.

PV-виробіток = 0.

Рівень SoC падає з 10 кВт · год до 0 вже до 02:00.

Це означає, що початкова ємність є недостатньою для покриття нічних потреб.

Висновок: акумулятор занадто малий, щоб забезпечити нічний резерв.

2. Акумулятор залишається на нулі протягом майже половини доби з 02:00 до 10:00 SoC = 0 %.

Це свідчить, що система повністю залежить від мережі вранці.

Висновок: BESS не використовується на 8 годин (простій), що зменшує його внесок у енергобаланс.

3. Заряд відновлюється тільки у період пікового сонячного випромінення (10:00–14:00).

Початок зарядки – близько 10:00, коли PV вперше перевищує Load.

Максимальний рівень заряду за добу – ≈ 11.4 кВт·год (≈ 23 %).

Висновки: PV-потужності вистачає тільки для часткового зарядження батареї. Акумулятор ніколи не досягає повного заряду навіть у сонячний день.

4. Після 15:00 – знову розряд.

PV падає, навантаження зростає.

SoC стабільно спадає аж до повного розряду о 18:00.

Висновок: вечірній пік покривається лише частково – батарея забезпечує близько 3 год роботи.

5. Значний перекид між генерацією та потребами.

Через малу ємність акумулятор не здатний:

- поглинути денний надлишок PV;
- покрити нічний дефіцит.

6. Енергосистема працює як «прохідна»: PV $\rightarrow$ Load, BESS $\rightarrow$ дуже обмежена роль.

Батарея виконує функцію лише «буфера», а не повноцінного накопичувача.

Висновок: акумулятор майже не бере участі у балансуванні енергії.

Підсумковий висновок.

На основі графіка SoC видно, що акумулятор є недостатнім за ємністю для даного об'єкта. Він:

- швидко розряджається вночі;
- довго залишається порожнім;
- заряджається лише на 20–25%;
- не забезпечує вечірній пік;
- не дозволяє накопичити денний PV надлишок.

Така конфігурація не оптимізує власне споживання PV, оскільки BESS занадто малий у порівнянні з PV та навантаженням.

ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ. ТЕМА 14

Відповідно до даних таблиці 14.3 виконати побудову графіку SoC та надати висновки щодо роботи акумулятора. При виконанні завдання приймаємо, що навантаження будинку протягом доби складає: від 0:00 до 6:00 годин – 10 % від ємності батареї; від 7:00 до 11:00 – 11 % від ємності батареї; від 12:00 до 18:00 – 12 % від ємності батареї; від 19:00 до 23:00 – 11 %. Заряд батареї: від 0:00 до 6:00 годин – 0; від 7:00 до 11:00 – 30 % від максимальної потужності; від 12:00 до 15:00 – максимальна потужність; від 16:00 до 18:00 – 50 % від максимальної потужності; від 19:00 до 21:00 – 5 % від максимальної потужності; від 21:00 до 23:00 – 0.

Таблиця 14.2 – Вихідні дані

Варіант	Ємність, кВт · год	Початко- вий SoC, %	Початковий запас енергії, кВт · год	Макс. Потужність, кВт	Ефективність зарядки	Ефективність розрядки
1	40	30	12	8	0,95	0,95
2	60	50	30	12	0,95	0,95
3	25	10	2,5	5	0,95	0,95
4	80	70	56	15	0,95	0,95
5	100	25	25	20	0,95	0,95
6	15	40	6	4	0,95	0,95
7	55	60	33	10	0,95	0,95
8	30	15	4,5	6	0,95	0,95
9	90	80	72	18	0,95	0,95
10	45	20	9	7	0,95	0,95
11	120	35	42	25	0,95	0,95
12	22	55	12,1	5	0,95	0,95
13	75	45	33,75	14	0,95	0,95
14	200	50	100	30	0,95	0,95
15	10	25	2,5	3	0,95	0,95
16	65	30	19,5	8	0,95	0,95
17	50	90	45	12	0,95	0,95
18	35	40	14	6	0,95	0,95
19	150	65	97,5	22	0,95	0,95
20	28	10	2,8	5	0,95	0,95
21	85	75	63,75	16	0,95	0,95
22	18	35	6,3	4	0,95	0,95
23	95	55	52,25	18	0,95	0,95
24	12	20	2,4	3	0,95	0,95
25	140	30	42	20	0,95	0,95
26	32	65	20,8	6	0,95	0,95
27	110	45	49,5	25	0,95	0,95
28	14	80	11,2	4	0,95	0,95
29	70	15	10,5	10	0,95	0,95
30	160	85	136	30	0,92	0,91

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 IEC 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. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – Чинний від 2011–01–11. – Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2010. – 127 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. 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.

61. 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.

62. 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.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Кліматологічні дані міст України [57]

Ч. ч.	Місто	Середня темпе- ратура опалю- валь- ного періоду, °С	Трива- лість опалю- валь- ного періоду, днів	Тривалість спостереження температур зовнішнього повітря, год, в інтервалах температур, °С									
				-34,9 ÷ -30	-29,9 ÷ -25	-24,9 ÷ -20	-19,9 ÷ -15	-14,9 ÷ -10	-9,9 ÷ -5	-4,9 ÷ 0	+0,1 ÷ +5	+5,1 ÷ +8	Всього годин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Бердянськ	0,8	165	0	9	34	120	222	431	1 087	1 426	631	3 960
2	Вінниця	-0,2	182	1	10	38	121	308	618	1 180	1 438	655	4 369
3	Джанкой	2,1	158	0	0	0	0	7	77	451	1 760	1 497	3 792
4	Дніпро	-0,2	172	0	9	36	125	231	449	1 132	1 488	658	4 128
5	Донецьк	-0,5	176	0	10	42	176	383	702	1 097	1 169	644	4 223
6	Євпаторія	3	147	0	0	0	0	6	72	420	1 638	1 392	3 528
7	Житомир	-0,2	184	0	5	21	99	296	590	1 185	1 489	730	4 415
8	Запоріжжя	0,6	166	0	9	35	120	223	433	1 093	1 436	635	3 984
9	Івано- Франківськ	0,4	179	0	10	38	130	240	468	1 179	1 548	683	4 296
10	Ізмаїл	2	151	0	0	4	15	87	321	840	1 392	965	3 624
11	Керч	4,5	151	0	0	2	10	76	280	855	1 382	1 019	3 624
12	Київ	-0,1	176	1	4	29	122	316	590	1 153	1 393	616	4 224
13	Кропивницький	-0,3	175	0	9	37	127	235	457	1 153	1 514	669	4 201
14	Луганськ	-0,4	172	1	7	51	154	365	635	992	1 280	643	4 128
15	Луцьк	0,3	180	0	5	20	96	290	578	1 161	1 456	714	4 320
16	Львів	0,4	179	0	0	2	19	58	429	1 060	1 666	1 062	4 296
17	Маріуполь	0,3	169	0	5	34	126	291	573	1 151	1 214	661	4 055
18	Миколаїв	1,1	161	0	0	7	53	221	449	1 025	1 472	638	3 865
19	Одеса	2	158	0	0	5	21	128	382	934	1 705	617	3 792
20	Полтава	-0,8	178	5	8	43	153	372	688	1165	1 074	764	4 272
21	Рівне	0,1	182	0	5	21	97	293	584	1 173	1 473	722	4 368
22	Сімферополь	2,6	154	0	0	3	15	85	332	825	1 329	1 107	3 696
23	Суми	-1,4	187	1	10	38	125	316	635	1 211	1 479	673	4 488
24	Тернопіль	-0,2	184	1	10	38	122	312	624	1 192	1 455	663	4 417
25	Ужгород	1,4	154	0	0	2	17	52	384	874	1 411	956	3 696
26	Умань	-0,1	179	1	10	37	125	272	540	1 169	1 479	664	4 297
27	Харків	-1,0	179	0	9	44	179	389	714	1 117	1 189	655	4 296
28	Херсон	1,3	163	0	0	7	35	159	423	864	1 518	907	3 913
29	Хмельницький	-0,1	183	1	10	38	121	309	619	1 183	1 445	667	4 393
30	Черкаси	-0,3	178	1	9	37	119	301	605	1 154	1 406	640	4 272
31	Чернівці	0,5	175	0	10	37	127	235	458	1 153	1 513	668	4 201
32	Чернігів	-0,9	187	1	10	38	124	317	634	1 212	1 478	673	4 487
33	Ялта	5,3	126	0	0	0	0	5	61	360	1 404	1 194	3 024

Таблиця А.2 – Розрахункові зимові параметри зовнішнього повітря [57]

Ч. ч.	Місто	Температура зовнішнього повітря, °С			Кліма- тичний район	Тем- пера- тур- на зона	Трива- лість опалюваль- ного періоду, Т _р , діб
		найхолоднішої п'ятиденки забезпеченістю 0,92, t _{хп}	середня температура опалюваль- ного періоду, t _р	Середньомі- сячна температура липня, t _{лп}			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вінниця	-21	-0,2	18,7	I	I	182
2	Гайворон	-22	0,3	20,0	II	I	174
3	Дніпро	-24	-0,2	21,6	II	I	172
4	Донецьк	-22	-0,5	21,2	II	I	176
5	Житомир	-22	-0,2	18,5	I	I	184
6	Запоріжжя	-21	0,6	22,4	II	II	166
7	Івано-Франківськ	-20	0,4	18,3	IIIА	I	179
8	Ізмаїл	-15	2	22,3	II	II	151
9	Київ	-22	-0,1	19,8	I	I	176
10	Кропивницький	-22	-0,3	20,4	II	I	175
11	Кривий Ріг	-17	0,2	21,5	II	I	171
12	Лозова	-22	-0,8	21,1	I	I	178
13	Лубни	-23	-0,7	20,2	I	I	180
14	Луганськ	-25	-0,4	22,0	II	I	172
15	Луцьк	-20	0,3	18,4	I	I	180
16	Львів	-19	0,4	17,7	I	I	179
17	Миколаїв	-20	1,1	22,7	II	II	161
18	Одеса	-18	2	22,0	II	II	158
19	Полтава	-23	-0,8	20,5	I	I	178
20	Рівне	-21	0,1	18,2	I	I	182
21	Ромни	-23	-1,1	19,4	I	I	185
22	Сімферополь	-15	2,6	21,8	V	II	154
23	Суми	-25	-1,4	19,5	I	I	187
24	Тернопіль	-20	-0,2	17,8	I	I	184
25	Ужгород	-18	1,4	20,3	IIIБ	II	154
26	Умань	-20	-0,1	19,4	I	I	179
27	Феодосія	-15	3,6	23,2	II	II	142
28	Харків	-23	-1	20,7	I	I	179
29	Херсон	-19	1,3	22,4	II	II	163
30	Хмельницький	-21	-0,1	18,4	I	I	183
31	Черкаси	-21	-0,3	20,1	I	I	178
32	Чернівці	-20	0,5	19,1	IIIА	I	175
33	Чернігів	-23	-0,9	18,5	I	I	187
34	Ялта	-6	5,3	23,6	IV	II	126



Рисунок А.1 – Карта-схема температурних зон України [57]

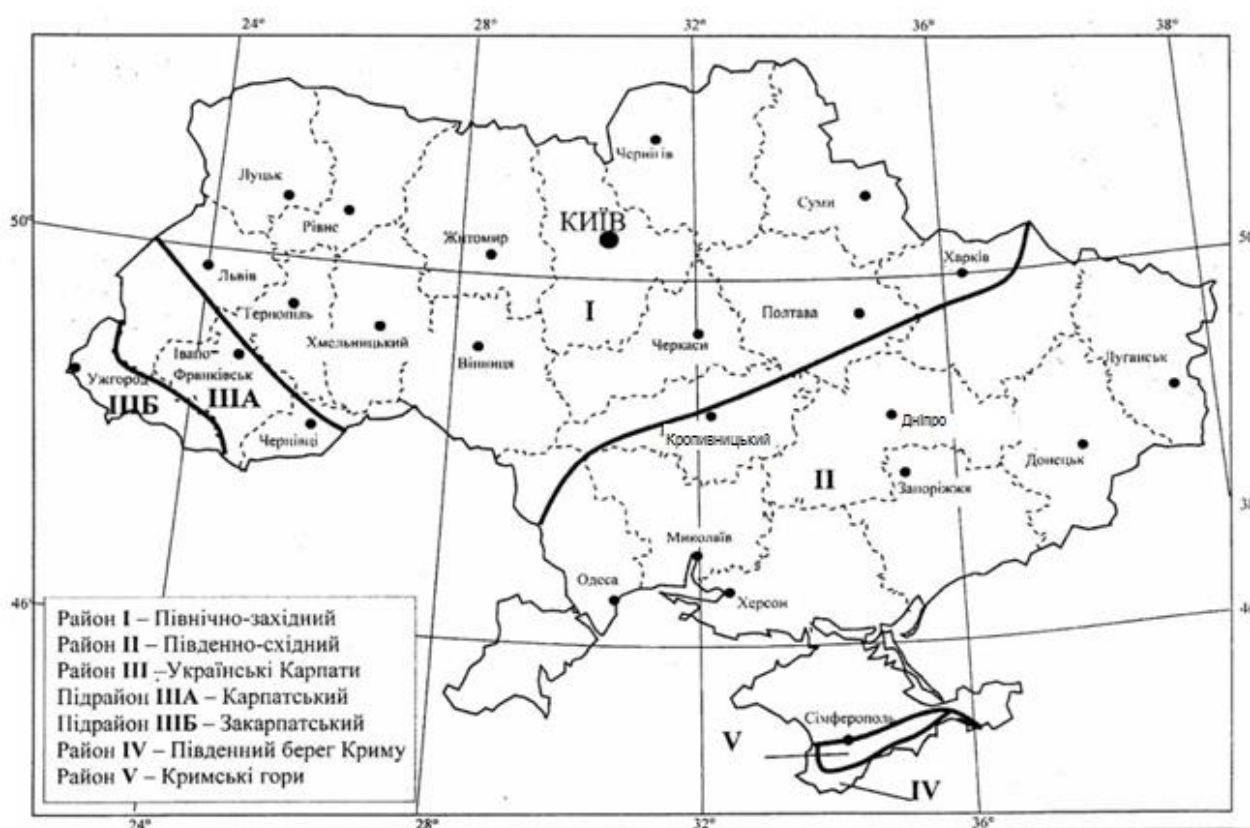


Рисунок А.2 – Архітектурно-будівельне кліматичне районування території України [57]

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції житлових та громадських будівель R_{qmin} [3]

Ч. ч.	Вид огорожувальної конструкції	Значення R_{qmin} , $m^2 \cdot K/Вт$, для температурної зони	
		I	II
1	Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	4,0	3,5
2	Суміщені покриття, що межують із зовнішнім повітрям	7,0	6,0
3	Покриття опалюваних горищ (технічних поверхів), мансард, горищні перекриття неопалюваних горищ	6,0	5,5
4	Перекриття, що межують із зовнішнім повітрям, та над неопалюваними підвалами	5,0	4,0
5	Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,9	0,7
6	Зенітні ліхтарі	0,8	0,7
7	Зовнішні двері	0,7	0,6

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до проведення практичних занять та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

**«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ
В СИСТЕМАХ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД»**

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

Укладачі: **ГВОЗДЕЦЬКИЙ** Олександр Вадимович,
ТКАЧЕНКО Роман Борисович,
БУРДА Юрій Олександрович

Відповідальний за випуск *Ю. І. Чайка*
Редактор *О. В. Михаленко*
Комп'ютерне верстання: *О. В. Гвоздецький, Є. Г. Панова*

План 2026, поз. 53М

Підп. до друку 26.03.2026. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 6,3.

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.