

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

УДК 621.3

ПОГОДЖЕНО

**Директор навчально-наукового
інституту енергетики, автоматики
і енергозбереження**
(назва ННІ)

_____ **Віктор КАПЛУН** _____
(підпис) (ПІБ)
“ ” 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
інженерії енергосистем**

_____ **Євген АНТИПОВ** _____
(підпис) (ПІБ)
“ ” 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Розробка системи дистанційного моніторингу показників
теплоспоживання спорудою цивільного захисту навчального корпусу НУБіП
України»**

Спеціальність

_____ **144 – «Теплоенергетика»** _____
(код і назва)

Освітня програма

_____ **Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент** _____
(назва)

Орієнтація освітньої
програми

_____ **освітньо-професійна** _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ _____ **Горобець В.Г.** _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ _____ **Антипов Є.О.** _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

_____ _____ **Яркулов Н.А.** _____
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інженерії енергосистем

к.т.н. доцент _____ Антипов Є.О.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ _____ ” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Яркулову Назару Алімовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність

144 – «Теплоенергетика»

(код і назва)

Освітня програма

Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент

(назва)

Орієнтація освітньої

програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Розробка системи дистанційного моніторингу показників теплоспоживання спорудю цивільного захисту навчального корпусу НУБіП України

затверджена наказом проректора НУБіП України від “18” листопада 2024 р. №2060 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14.11.2025 р.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз нормативних вимог та огляд публікацій за темою дослідження.
2. Аналіз об'єкта та умов експлуатації.
3. Проектування системи дистанційного моніторингу.
4. Моделювання та оцінка відповідності розрахунків з вимогами.
5. Виявлення фактів обов'язкових умов безпеки і їх урахування.
6. Заходи по оптимізації і зниженню втрати енергії.

Перелік графічного матеріалу (за потреби): презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання “20” листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

Антипов Є.О.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Яркулов Н.А.

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП 9	
РОЗДІЛ 1	11
АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	11
1.1. Нормативна база експлуатації укриттів і інженерних систем	11
1.2. Сучасні підходи до енергомоніторингу в громадських будівлях.....	17
1.3. Практика впровадження систем моніторингу в закладах освіти.....	20
РОЗДІЛ 2	24
АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	24
2.1 Загальні відомості про будівлю.....	24
2.2 Ризики, зовнішні умови і сценарії експлуатації	26
2.3 Вимоги до системи моніторингу для підвалу (укриття) корпусу	27
2.4 Висновок до розділу	30
РОЗДІЛ 3	31
ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ	31
3.1 Архітектурна концепція та принципові рішення	31
3.2 Вибір елементної бази (сенсори, інтерфейси, вузли)	32
3.3 Топологія з’єднань і протоколи.....	32
3.4 Енергопостачання та автономність (блекаут-профілі).....	33
3.5 Дашборд, сповіщення і сценарні картки	33
3.6 Кібербезпека, ролі та аудит.....	34
3.7 Монтаж, кабель-менеджмент і сервісопридатність	34
3.8 Документація, регламенти та навчання персоналу	34
3.9 Підбір і обґрунтування основних елементів вентиляційної установки	35

3.10	Попередній кошторис і комплектність (орієнтовно).....	45
3.11	Реєстр ризиків (витяг)	45
3.12	Критерії приймання системи.....	46
3.13	Інтеграція проєктної схеми рекупераційної вентиляції (опис, сенсори, алгоритми)	46
3.14	Підбір обладнання на основі схеми (орієнтовні технічні діапазони).....	49
3.15	Контролери та платформи автоматизації: від Arduino до PLC	50
РОЗДІЛ 4		53
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ВІДПОВІДНОСТІ РОЗРАХУНКІВ З ВИМОГАМИ.....		53
4.1	Методологія і сценарії експлуатації.....	53
	Прийняті припущення для розрахунків:.....	53
4.2	Повітрообмін за критерієм CO ₂	54
4.3	Осушення/вологість і «вузьке місце» взимку	55
4.4	Теплові баланси і комфорт.....	56
4.5	Резерв живлення і блекаут-режими	56
4.6	Розміщення сенсорів і валідація	57
4.7	Приклади сценаріїв.....	57
4.8	Алгоритми керування, узгоджені зі схемою	58
4.9	Тепловий баланс вентиляції та ефект рекуперації для розрахункових витрат повітря. Економічний ефект	58
4.10	Проміжні висновки.....	63
4.11	Принцип роботи пластинчастого рекуператора та байпас	63
РОЗДІЛ 5		66
НАДІЙНІСТЬ, БЕЗПЕКА Й ЕКСПЛУАТАЦІЯ.....		66
5.1	Загальна архітектура надійності	66
5.2	Функціональна безпека та пожежні інтерлоки	67
5.3	Електробезпека та живлення в умовах блекаутів	68

5.4	Кібербезпека ОТ/ІТ	68
5.5	Сенсори: якість, калібрування та розміщення.....	69
5.6	Техобслуговування та життєвий цикл	69
5.7	Операційні процедури (SOP) для персоналу	70
5.8	Реєстр ризиків і FMEA (узагальнено)	71
5.9	Вимоги до документування та навчання	71
5.10	Відповідність нормам і політики якості.....	72
РОЗДІЛ 6		73
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ.....		73
6.1	Методика та вихідні припущення.....	73
6.2	Структура витрат (CAPEX та OPEX)	73
6.3	Енергетичний ефект: з чого складається економія.....	76
6.4	Розрахунок строку окупності	78
6.5	Нефінансові вигоди	79
6.6	Фінансування та закупівлі	79
6.7	План впровадження (roadmap)	79
6.8	КРІ та M&V.....	79
6.9	Екологічний аспект.....	79
ВИСНОВКИ.....		80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		83

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел. Обсяг роботи становить 84 сторінки, включає 10 рисунків та 3 таблиці, а також список використаних джерел із 30 найменувань.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування системи дистанційного моніторингу показників теплоспоживання та мікроклімату підвального укриття (споруди цивільного захисту) навчального корпусу НУБіП України з урахуванням умов воєнного стану та можливих блекаутів.

У роботі проаналізовано нормативні вимоги до споруд цивільного захисту, інженерних систем будівель і санітарно-гігієнічних показників мікроклімату, а також сучасні підходи до енергомоніторингу в громадських будівлях. Виконано аналіз об'єкта дослідження: планувальних рішень підвального рівня, теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, існуючих систем опалення, вентиляції та електропостачання, режимів заповнення укриття й типових сценаріїв експлуатації (S1, S2, S3), або критичних сценаріїв (C1, C2, C3).

Запропоновано архітектуру системи дистанційного моніторингу на основі гібридного підходу (поєднання класичного енергомоніторингу ІТП з IoT-сенсорами мікроклімату), обґрунтовано вибір датчиків температури, відносної вологості, CO₂, перепаду тиску та електричних параметрів, а також вибір комунікаційних протоколів і способів буферизації та передачі даних. Розроблено структуру та принципову схему системи вентиляції з рекуперацією тепла для укриття, здійснено підбір основних елементів вентиляційної установки (водяний нагрівач, водяний охолоджувач, пластинчастий рекуператор, байпас, комплекс датчиків і засобів автоматизації) з урахуванням вимог до енергоефективності та надійності.

Проведено моделювання параметрів мікроклімату й теплоспоживання для різних сценаріїв заповнення укриття, оцінено вплив тепловиділень людей, інфільтрації, режимів вентиляції та роботи системи опалення на температуру, вологість і концентрацію CO₂. На основі розрахунків сформовано вимоги до кратності повітрообміну, алгоритмів керування вентиляцією та до резервування живлення системи моніторингу (автономність 24–48 годин). Розглянуто питання надійності, електро- та пожежної безпеки, кібербезпеки, організації технічного обслуговування й експлуатаційних регламентів для персоналу.

Виконано економічне обґрунтування впровадження системи: сформовано структуру капітальних і експлуатаційних витрат, оцінено потенційне скорочення теплоспоживання за рахунок оптимізації режимів роботи укриття, наведено приклад розрахунку показників ефективності інвестицій та проаналізовано нефінансові вигоди (підвищення безпеки, комфорту та керованості інженерних систем). Результати роботи можуть бути масштабовані на інші навчальні корпуси НУБіП України та аналогічні споруди цивільного захисту в системі освіти.

Ключові слова: дистанційний моніторинг, теплоспоживання, мікроклімат, споруда цивільного захисту, укриття, енергомоніторинг, вентиляція з рекуперацією тепла, IoT-сенсори, блекаут, НУБіП України.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СЦЗ – споруда цивільного захисту

ПРУ – протирадіаційне укриття

ІТП – індивідуальний тепловий пункт

БМС – система диспетчеризації (Building Management System)

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина (сервер/контролер)

ГВП/ГТВ – гаряче водопостачання/гарячий теплоносій у опаленні

АВР – автоматичне введення резерву

UPS – джерело безперебійного живлення

LoRaWAN – бездротовий протокол малої потужності та великого радіусу дії

PMV/PPD – індекси теплового комфорту Фандера та предикції невдоволених

DCV (Demand-Controlled Ventilation) — це вентиляція з керуванням за фактичним попитом, тобто система автоматично змінює витрату повітря залежно від реальної потреби, а не працює постійно на максимумі.

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах воєнного стану та регулярних повітряних тривог навчальні заклади України масово використовують підвальні приміщення як укриття. У періоди блекаутів і перебоїв теплопостачання критично зростає значення оперативного контролю теплового режиму й мікроклімату таких приміщень. Неналежні параметри температури та вологості погіршують безпеку й здоров'я людей, ускладнюють навчальний процес, спричиняють появу конденсату й цвілі, пошкодження оздоблення та інфраструктури. Водночас ресурс енергії обмежений, а тарифи на теплопостачання зростають, що вимагає системного обліку та оптимізації теплоспоживання.

Дистанційний моніторинг теплоспоживання дає змогу в реальному часі відслідковувати ключові параметри (витрата тепла, температура подачі/звороту, температура та вологість повітря в укритті), своєчасно виявляти відхилення, приймати рішення щодо керування обладнанням і планових енергоощадних заходів. Додатково система має бути здатною працювати в умовах нестабільного електро- та зв'язку – із локальною буферизацією даних і резервними каналами передавання.

Мета роботи: спроектувати й обґрунтувати систему дистанційного моніторингу теплоспоживання та мікроклімату підвальних приміщень навчального корпусу НУБіП України, забезпечивши її стійкість до відключень електроенергії й зв'язку.

Длі досягнення поставленої мети необхідно вирішити на ступні завдання:

1. Проаналізувати нормативну, наукову та прикладну базу енергомоніторингу в будівлях і спорудах цивільного захисту.
2. Дослідити об'єкт (підвальна частина навчального корпусу), сформулювати експлуатаційні вимоги й сценарії роботи в НС.

3. Обрати архітектуру системи, датчики й комунікації; розробити схему живлення з автономністю 24–48 год.
4. Розробити алгоритми збору/фільтрації/передавання даних, візуалізацію та сповіщення.
5. Провести розрахунок точності вимірювань, надійності, обсягу даних, ємності акумуляторів.
6. Виконати економічне обґрунтування та план впровадження/масштабування.

Об’єкт: підвальне укриття навчального корпусу (будівля № 11 НУБіП України).

Предмет: технології дистанційного моніторингу теплоспоживання та мікроклімату в умовах воєнного часу.

Практичне значення – підвищення безпеки й енергоефективності укриттів, можливість масштабування на мережу навчальних будівель.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Нормативна база експлуатації укриттів і інженерних систем

1.1.1. Правовий та організаційний контекст. Управління інженерними системами споруд цивільного захисту (СЦЗ) регламентується сукупністю нормативних актів, які визначають функціональне призначення укриттів, мінімально допустимі умови перебування людей, вимоги до інженерних мереж та порядок їх експлуатації. Для навчальних закладів це, зокрема, сучасні державні будівельні норми для захисних споруд (як-от ДБН В.2.2-5:2023), загальні вимоги до інженерного обладнання будівель, стандарти з електробезпеки, пожежної безпеки, санітарно-гігієнічні регламенти та рекомендації з інклюзивності й безбар'єрності. У воєнний та післявоєнний періоди застосування цих вимог доповнюється локальними управлінськими рішеннями закладу (накази ректора, плани цивільного захисту, журнали готовності укриття), що фактично формують технічне завдання на модернізацію та моніторинг інженерних систем підвальних приміщень.

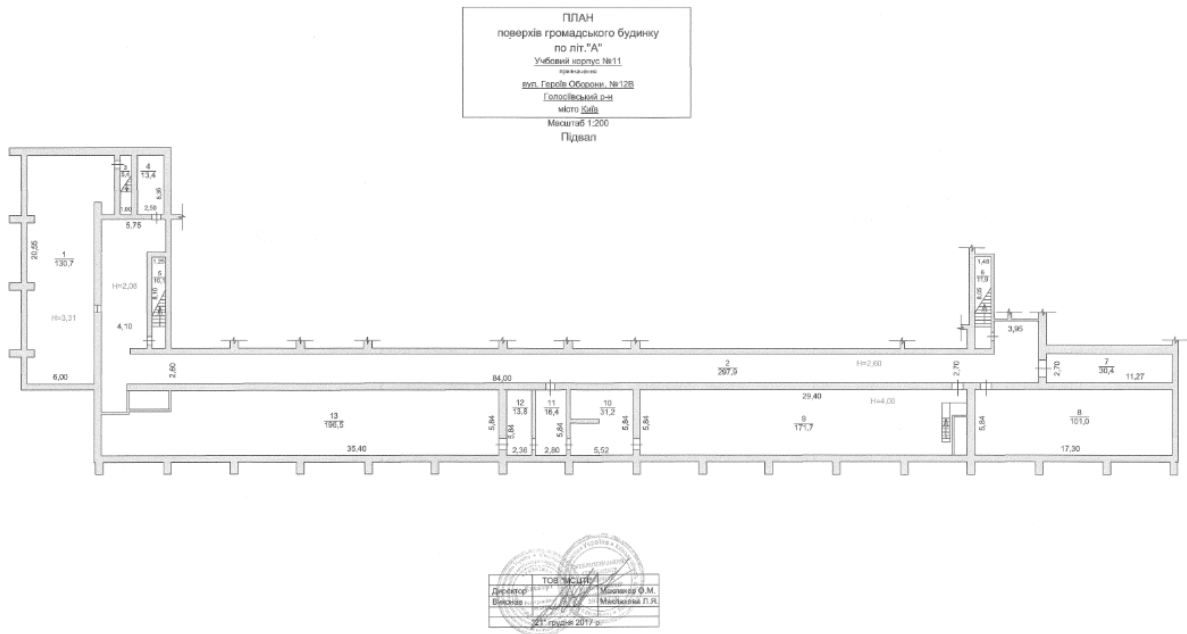


Рис. 1.1. План приміщення підвалу учбового корпусу №11

1.1.2. Функціональні вимоги до укриттів у закладах освіти. Споруда цивільного захисту у складі навчального корпусу повинна забезпечувати захист і мінімально комфортні умови перебування контингенту протягом визначеного часу (до 48 годин), включаючи можливість масового укриття у пікові періоди повітряної тривоги. До ключових вимог належать:

- Безпечні маршрути евакуації і доступності (входи/виходи, світлові й тактильні покажчики, можливість доступу маломобільних осіб);
- Зонування простору (основні приміщення для укриття, санітарні вузли, місця для зберігання запасів води/медичних засобів, технічні приміщення);
- Мікроклімат (температура, відносна вологість, якість повітря, швидкість руху повітря, допустимі рівні CO₂);
- Вентиляція з можливістю роботи в різних режимах (природна/примусова, фільтраційна/байпасна, рециркуляція за необхідності, протидимний захист);
- Освітлення і електроживлення із резервуванням (аварійне освітлення, АВР/UPS для критичних систем, мінімальна освітленість у зонах перебування і на шляхах евакуації);

- Зв'язок та оповіщення (сирени, гучномовці, дублювання за допомогою електронних систем, стійкість до відключень електроенергії);
- Пожежна безпека (детектори, первинні засоби гасіння, вогнестійкість проходок інженерних мереж);
- Санітарно-гігієнічні вимоги (нормативні показники вологості, кратність повітрообміну, наявність місць для гігієни, організація прибирання і знезараження).

Для навчальних закладів додатково враховують динаміку заповнення (короткочасні піки у годину-дві) і періодичне використання укриттів як навчальних/позанавчальних приміщень (тимчасові класи, складські зони). Це створює характерні теплові навантаження: різке підвищення виділень тепла й CO₂ при заході великої групи людей, а також підвищена вологість, що потребує оперативної вентиляції й контролю параметрів.

Параметри мікроклімату	Розрахункова t °С зовнішнього повітря					
	До 25 °С у кліматичних районах I, III, V			Більше 25 °С у кліматичних районах II, IV		
	чиста вентиляція (режим I)	фільтро-вентиляція (режим II)	регенерація (режим III)	чиста вентиляція (режим I)	фільтро-вентиляція (режим II)	регенерація (режим III)
Для осіб зрілого і літнього віку, підлітків, юнаків						
Температура, °С	28	29	30	29	30	31
Відносна вологість, % до	70	70	70	70	70	70
Швидкість руху повітря, м/с	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Концентрація CO ₂ , % об'єму	3	3,5	4	3	3,5	4
Концентрація CO, мг/м ³	50	75	100	50	75	100
Концентрація летких органічних сполук та загальних летких органічних речовин, мкг/м ³	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000	<1000
Формальдегід, мкг/м ³	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Канцерогенні, мутагенні або репротоксичні речовини (класу 1А та 1В), мкг/м ³	<5	<5	<5	<5	<5	<5

Рис. 1.2. Параметри мікроклімату приміщень захисних споруд та СПП (згідно ДБН В.2.2-5:2023)

1.1.3. Вимоги до інженерних систем, релевантні моніторингу. Опалення і теплоспоживання. Укриття як частина будівлі під'єднане до системи опалення корпусу (централізованої або автономної). Для енергомоніторингу ключовими є:

- температура теплоносія на подачі і звороті;
- об'ємна витрата (або теплова енергія за лічильником);
- тиск/наявність циркуляції;
- графіки роботи ІТП/котельні та погодні регулювання. Контроль цих параметрів дозволяє обчислювати миттєву потужність, накопичене споживання, ККД передачі тепла (за ΔT) та виявляти аномалії (завоздушення, зниження ΔT , витоки).

Вентиляція. Вимоги передбачають забезпечення нормативної кратності повітрообміну та можливість переходу між режимами (приток/витяжка/рециркуляція) залежно від сценарію НС. Для моніторингу доцільно контролювати: концентрацію CO_2 (індикатор якості повітря), температуру/вологість приточного й витяжного повітря, стан вентустановок (живлення, аварії, фільтри), перепад тиску у фільтрах, робочі години.

Електропостачання. Критичні підсистеми (оповіщення, аварійне освітлення, вентиляція мінімального режиму, комунікаційний вузол моніторингу) мають працювати при блекаутах. Моніторинг охоплює стан фаз/напруги, спрацювання АВР, заряд UPS/акумуляторів, час автономної роботи.

Зв'язок і оповіщення. Окрім централізованого оповіщення, доцільно мати незалежні канали зв'язку для передавання телеметрії: провідний (Ethernet), бездротовий (Wi-Fi) і мобільний (GSM/LTE) — з автоматичним перемиканням і буферизацією даних локально при відсутності мережі.

1.1.4. Санітарно-гігієнічні та мікрокліматичні показники. Для безпечного перебування людей у підвальних приміщеннях СЦЗ доцільно підтримувати:

- температуру внутрішнього повітря у межах комфортних значень для громадських приміщень (орієнтовно 18–22 °С за відсутності важких фізичних навантажень);
- відносну вологість у межах, що не спричиняють конденсації та росту плісняви (орієнтовно до 60–70 % при короткочасному заповненні);
- концентрацію CO₂ не вище прийнятних рівнів якості повітря (орієнтовні граничні 1000–1500 ppm для короткочасного перебування). У проєктах СЦЗ також враховують обмеження швидкості руху повітря в зоні перебування, допустимі рівні шуму від вентиляційного обладнання та вимоги до санітарної обробки. Для моніторингу це трансформується у вибір сенсорів T/RH/CO₂, алгоритмів сигналізації і режимів керування вентиляцією.

1.1.5. Пожежна та електробезпека. Прокладання кабельних ліній системи моніторингу, розташування комутаційних шаф та монтаж датчиків мають відповідати вимогам вогнестійкості проходок, груп займистості матеріалів і класів захисту оболонок (IP) у вологому середовищі. Для низьковольтних мереж датчиків рекомендовано використовувати SELV-джерела живлення, гальванічну розв'язку інтерфейсів, захист від перенапруг. Обов'язкове маркування та наявність схем у шафах/нішах ІТП.

1.1.6. Вимоги до надійності та живучості:

З погляду нормативних підходів інженерні системи СЦЗ повинні мати підвищену відмовостійкість і живучість:

- резервування джерел живлення критичних вузлів;
- автономність не менше визначеного розрахунком часу (цільово 24–48 год для моніторингу та оповіщення);
- прості ручні режими на випадок виходу з ладу автоматизації;

- контроль цілісності (health-check) усіх вузлів і журнал подій. Ці вимоги безпосередньо задають архітектурні рішення: локальна буферизація даних, «гаряче» перемикання каналів зв'язку, watchdog-механізми в контролерах, регулярне резервне копіювання бази даних.

1.1.7. Висновки для проєктування системи моніторингу. Проаналізована нормативна база визначає набір мінімально необхідних вимірюваних величин (Т подачі/звороту, витрата/теплова енергія, T/RH/CO₂ у приміщеннях, стан електроживлення), вимоги до режимів роботи вентиляції та резервування, вимоги до безпеки монтажу й експлуатації. Це формує технічні критерії для наступних розділів: вибір датчиків, протоколів зв'язку, архітектури живлення й алгоритмів сигналізації.

1.1.8. Прийняті параметри контролю та сценарії розрахунків. Для подальшого проєктування, моделювання та експериментів у роботі фіксуємо такі керовані/контрольовані параметри системи:

- Температура повітря (T, °C) у зонах перебування;
- Відносна вологість (RH, %) у зонах перебування;
- Концентрація CO₂ (ppm) як індикатор якості повітря та потреби у вентиляції.

З урахуванням періодичного та динамічного заповнення укриття (початок/кінець пар, перерви, повітряні тривоги) приймаємо три репрезентативні сценарії тривалості перебування груп людей, що відповідають типовим навчальним слотам:

- Сценарій S1: кількість людей в декількох аудиторіях - 60;
- Сценарій S2: кількість людей в декількох аудиторіях - 70;
- Сценарій S3: кількість людей в декількох аудиторіях – 80.

Так для критичних сценаріїв заповнення, без залежності від навчального навантаження, натомість виключно для розрахунку параметрів при максимальному діапазоні заповненості:

- Критичний сценарій C1: кількість людей - 250;

- Критичний сценарій С2: кількість людей - 500;
- Критичний сценарій С3: кількість людей – 750.

Для кожного сценарію в подальших розділах будуть виконані розрахунки/моделювання:

- прогноз змін T/RH/CO₂ за різних початкових умов і зовнішніх температур;
- необхідні режими/кратність вентиляції для дотримання граничних значень CO₂ та RH;
- орієнтовні теплові навантаження від присутніх (людське тепло) та їх вплив на температуру;
- потреба в теплі (та/або корекція графіка нагріву) з урахуванням S1/S2/S3/C1/C2/C3;
- вимоги до автономності живлення (мінімальний час роботи контролера/зв'язку) під ці сценарії.

Ці сценарії будуть використані як базові у Розділах 2–4 для зіставних розрахунків і вибору параметрів керування.

1.2. Сучасні підходи до енергомоніторингу в громадських будівлях

1.2.1. Парадигми моніторингу: BMS, SCADA та IoT-підхід. Існує три домінантні підходи: (а) централізовані BMS/SCADA-системи з промисловими протоколами (Modbus, BACnet, M-Bus), (б) децентралізовані IoT-рішення на базі недорогих сенсорів і шлюзів, (в) гібридні архітектури. Для навчальних будівель з укриттями доцільний гібрид: критичні дані з ІТП/венткамер — через промислові лічильники/контролери, а мікроклімат у зонах перебування — через IoT-сенсори з локальною буферизацією та резервним зв'язком. Це знижує вартість, підвищує гнучкість і зберігає вимоги до надійності.

1.2.2. Вимірювальні засоби та їх класи точності. Тепло: теплові лічильники (ультразвукові/механічні) з інтерфейсами M-Bus/Modbus — клас точності 2 або краще; температурні датчики Pt1000 або цифрові 1-Wire/I²C (DS18B20/SHT3x) для подачі/звороту та повітря, з попередньою калібрувальною довідкою. Вологість: сенсори на основі ємнісних елементів (SHT3x/4x) з похибкою 1.5–2% RH; CO₂: NDIR-сенсори (Sensirion/Swiss-made) з автокалібруванням ABC та можливістю ручної нульової корекції. Для підвалів актуальна температура поверхонь (точки роси) — інфрачервоні або контактні датчики для оцінки ризику конденсації.

1.2.3. Комунікації та протоколи. На рівні сенсорів — I²C/1-Wire/UART, на рівні контролера — Modbus RTU/TCP, M-Bus (для лічильників), а для телеметрії у мережі — MQTT/HTTPS з TLS. Резервний канал: GSM/LTE; для енергоощадних сценаріїв можливий LoRaWAN (низькі бітрейти, великі покриття) для T/RH/CO₂. Мережна політика: VLAN для OT-сегменту, брандмауер, VPN-тунель до серверу. Буферизація на контролері (напр., локальна БД SQLite/Influx з глибиною 7–14 діб) з повторною доставкою при відновленні зв'язку.

1.2.4. Якість даних і метрологія. Ключові процедури: первинна і періодична калібрування, перехресні перевірки (дві T-точки, сенсор довкілля + довірчий термометр), дискредитація викидів (IQR/білд-ін фільтри), синхронізація часу (NTP) для коректного агрегування. Визначаємо частоту опитування: 1–5 хв для T/RH/CO₂ у зонах перебування (щоб відстежувати піки S1/S2/S3/C1/C2/C3), 30–60 с для подачі/звороту і тиску (для оперативних аварійних індикаторів), 5–15 хв для лічильників тепла/електроенергії. Зберігаємо «сирі» ряди і агрегати (1-хв, 15-хв, 1-год) для різних завдань аналізу.

1.2.5. Аналітика часових рядів та виявлення аномалій. Базові метрики: ΔT подача-зворот, SPF/ефективність, питомі витрати (кВт·год/м²), IAQ-індикатори (CO₂, RH). Для аномалій — порогові детектори (постійнодіючі з гістерезисом) + ковзні вікна (z-score, EWMA) для повільних дрейфів, правила причинності (якщо присутність $\uparrow \rightarrow$ CO₂ має зростати; якщо вентиляція увімкнена \rightarrow CO₂ має спадати). Для сценаріїв S1/S2/S3/C1/C2/C3 розраховуємо очікувані траєкторії CO₂ (масовий баланс) і температуру (тепловиділення людей), порівнюємо з фактичними; розбіжність $>\epsilon$ — сигнал про недостатній повітрообмін або відмову обладнання. Для довгострокового тренду — сезонна декомпозиція (STL) і регресія від зовнішньої температури.

1.2.6. Інтерфейси, сповіщення і профілі користувачів. Інтерфейс дашборду: карта приміщень укриття з індикаторами T/RH/CO₂, графіки за 1/6/24 год, плитки стану ІТП/вентустановок, журнал подій. Сповіщення: SMS/месенджер з рівнями (попередження/аварія), quiet-hours для навчального процесу, ескалація за SLA. Ролі: оператор укриття, інженер (розширені графіки), адміністратор (політики, користувачі). Експорт у XLSX/CSV для звітів і до енергоменеджменту університету.

1.2.7. Інтеграція з ІТП/котельнею та зовнішньою погодою. Якщо корпус має ІТП, зчитуємо температуру подачі/звороту, тиск, стани насосів; за можливості — керуючі сигнали (у рамках диспетчеризації). Для прогнозу навантаження підключаємо погодні API; формуємо добові профілі подачі тепла. Для S1/S2/S3/C1/C2/C3 — готуємо регламенти: перед-пускове піднагрівання перед масовим входом; під час перебування — тримати CO₂<1000–1200 ppm; після виходу — осушення/провітрювання до RH<65%.

1.2.8. Кібербезпека та захист даних. Шифрування TLS, взаємна аутентифікація (сертифікати/токени), сегментація мережі OT/IT, мінімальні привілеї для сервісів, централізовані оновлення (OTA), журнали аудиту. Персональні дані не збираються; присутність фіксується агреговано (лічильник аудиторії) без ідентифікації осіб. Резервні копії БД та план відновлення після інцидентів (RPO/RTO).

1.2.9. Узагальнення для нашого проєкту. Обраний гібридний підхід (ІТТ+ІоТ) забезпечує збір критичних технологічних параметрів і детальний контроль мікроклімату в зонах перебування. Прийняті частоти опитування, політика буферизації і подвійні канали зв'язку дозволяють стабільно відслідковувати короткі й довгі сесії перебування (S1/S2/S3/C1/C2/C3) та оперативно реагувати на відхилення. Наступний розділ (2) перенесе ці принципи на конкретний об'єкт укриття з урахуванням планування підвалу, точок доступу до інженерних мереж і сценаріїв експлуатації.

1.3. Практика впровадження систем моніторингу в закладах освіти

1.3.1. Типові цілі та очікувані ефекти. У навчальних корпусах енергомоніторинг впроваджують з трьома головними цілями: (а) безпека і комфорт (стабілізація T/RH/CO₂, попередження конденсату, цвілі та перевентиляції), (б) економія енергії (уникнення перегріву/переохолодження, погодне та присутнісне керування), (в) операційна прозорість (історія параметрів, звітність, обґрунтування тарифів і лімітів). Типові ефекти після першого сезону — 10–20% економії тепла, вирівнювання внутрішньої температури у межах норми, зниження скарг на задушливість і вогкість у підвальних аудиторіях.

1.3.2. Архітектурні патерни впроваджень:

- Мінімально життєздатний дашборд (MVP): 3–5 сенсорних вузлів T/RH/CO₂ у ключових кімнатах укриття + зчитування подачі/звороту з ІТП → веб-дашборд і порогові сповіщення.
- Розширений контроль: додаються тепловий лічильник, сенсор напруги, стан UPS, датчики поверхневої T (точка роси), лічильник електрики на вентустановку.
- Інтегрований режим: двосторонній зв'язок із ІТП/вентиляцією (керування графіками, попереднє піднагрівання перед заповненням S1/S2/S3/C1/C2/C3, осушення після виходу).

1.3.3. Розміщення сенсорів у підвальних укриттях. Сенсори T/RH/CO₂ розміщують у зоні дихання (1.0–1.5 м), не ближче 1 м до батарей/вентрешіток, поза «мертвими зонами» вентиляції. У великих залах — 2–3 точки для репрезентативності. Датчики поверхневої температури — на «холодних» зовнішніх стінах і містках холоду для контролю ризику конденсації. Кабелі сенсорів у ПВХ-коробах/трубах; живлення низьковольтне (SELV) у вологих зонах. Передбачити доступ для калібрування/заміни.

1.3.4. Експлуатаційні регламенти під сценарії S1/S2/S3:

- Перед-подія: за 20–40 хв до очікуваного масового входу — перевірка стану вентиляції, піднагрівання у холодний період, стабілізація RH.
- Під час перебування: тримати CO₂ < 1000–1200 ppm (вмикати/підсилувати вентиляцію), слідкувати за RH < 65–70%; у разі росту RH — збільшити приток/осушення.
- Після виходу: провітрювання/осушення до RH < 65%, повернення до «економного» режиму опалення; перевірка журналів подій.

1.3.5. Експлуатаційні регламенти під сценарії C1/C2/C3:

- Перед-подія: за можливості інтегрувати систему сповіщення про повітряні тривоги, щоб відразу почати перевірку стану вентиляції, піднагрівання у

холодний період, стабілізацію RH для підготовки до великого потоку людей до укриття.

- Під час перебування: тримати $\text{CO}_2 < 1000\text{--}1200$ ppm (вмикати/підсилювати вентиляцію), слідкувати за $\text{RH} < 65\text{--}70\%$; у разі росту RH — збільшити приток/осушення.
- Після виходу: провітрювання/осушення до $\text{RH} < 65\%$, повернення до «економного» режиму опалення; перевірка журналів подій.

1.3.6. Показники ефективності (KPI) для укриттів:

- Комфорт/IAQ: частка часу в межах T-комфарту, частка часу $\text{CO}_2 < 1000$ ppm, RH у межах 40–65%.
- Енергетика: кВт·год тепла/м², ΔT подача-зворот, частка «надлишкового нагріву».
- Надійність: % часу online, середній час відновлення після збою, точність сенсорів після калібрування.
- Операційність: середній час реакції на подію, частка подій із правильною ескалацією.

1.3.7. Типові помилки та уроки впроваджень:

- Недостатня кількість сенсорних точок у великих підвалах → «сліпі зони».
- Відсутність резервного зв'язку/живлення → втрата даних під час блекаутів.
- Некоректне місце встановлення CO_2 (біля дверей/вентрешіток) → хибні тривоги.
- Нульова політика калібрування → дрейф RH/ CO_2 і хибні рішення.
- Немає регламентів під S1/S2/S3/C1/C2/C3 → система «бачить», але персонал не діє вчасно.

1.3.8. Практична релевантність для корпусу НУБіП:

Для підвального укриття навчального корпусу доцільно стартувати з гібридного MVP: 4–6 вузлів T/RH/ CO_2 у ключових зонах + зчитування подачі/звороту (та, за можливості, лічильника тепла). Для блекаутів — обов'язково

локальна буферизація (7–14 діб) і GSM-резерв. На другому етапі — інтеграція з ІТП/вентиляцією для автоматизованих сценаріїв під S1/S2/S3/C1/C2/C3 і розширення КРІ.

1.4. Висновки до розділу 1

Огляд нормативної бази, технологій і практики показує, що для укриттів навчальних корпусів оптимальною є гібридна архітектура моніторингу, орієнтована на збір критичних параметрів (ІТП) і детальний контроль мікроклімату в зонах перебування. Впровадження енергомоніторингу в освітніх закладах переслідує цілі безпеки/комфорту, енергозбереження й прозорості експлуатації; типові результати – економія тепла на 10–20%, стабілізація параметрів мікроклімату та зменшення скарг на задушливість і вологість. Для нашого об’єкта доцільний поетапний підхід: старт з MVP (кілька сенсорних вузлів T/RH/CO₂ + базовий дашборд), поступове розширення до повного контролю вентиляції та інтеграції з ІТП. Зібрані вимоги й напрацювання стануть основою для проектування системи у розділах 2–3. Розділ 2 далі аналізує конкретний підвал корпусу і режими його експлуатації, що дозволить прив’язати рішення до реальних умов.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1 Загальні відомості про будівлю

З огляду на те, що після початку повномасштабної війни підвальний рівень фактично облаштований під аудиторії за логікою типових поверхів, у цій роботі ми приймаємо його планувальні та експлуатаційні параметри аналогічними до поверхових, якщо інше не застережено окремо. Це дозволяє користуватися наявними поетажними планами для розрахунків місткості, вентиляції та теплоспоживання, не чекаючи спеціальної інвентаризації підвалу.

Для подальших розрахунків фіксуємо базові параметри:

- Висота приміщень: $h = 2.8$ (типове значення для навчальних аудиторій; у випадку різниці в підвалі — коригуватимемо об'єм V).
- Площа зон: для великих залів ЗП-А — орієнтовно 80–120 м²; для ЗП-В — 40–70 м²; для ЗП-С (коридори/буфер) — 20–40 м². Якщо площі відрізняються, у формулах використовуємо фактичні значення з плану.
- Щільність заповнення (місткість): розрахунково 1,5–2,0 м²/особу для аудиторій з сидінням; для укриття під час тривоги можлива тимчасова щільність до 1,0–1,2 м²/особу (стоячі зони). Для нормальних занять беремо консервативно 1,8 м²/особу.
- Робоча місткість за сценаріями:
 - ЗП-А: 50–120 осіб залежно від конфігурації;
 - ЗП-В: 25–60 осіб;
 - ЗП-С: 15–30 осіб (перебування короткочасне, вплив на CO₂ та RH локальний).

- Базові тепловиділення від людини (сидяча активність): 80 Вт/особу, з яких 40 Вт (чуттєве тепло), 40Вт (приховане/вологісне). Для стояння або активнішої діяльності — коефіцієнт 1,1–1,2.
- Утворення CO₂: приймаємо 0,004–0,005 м³/год на особу (\approx 1,1–1,4 мл/с) для сидячої активності; для сплесків активності — множник 1,1. Це дає змогу будувати масовий баланс CO₂ у розд. 4.
- Нормативні/цільові рівні вентиляції: орієнтир 10 л/с·особу під час заповнення ЗП-А/В (у спокійному режимі — 6–8 л/с·особу), або еквівалентна кратність повітрообміну АСН = 2–6 1/год залежно від об'єму приміщення й присутності. Для післяподійного осушення — тимчасове підвищення кратності.
- Цільові мікрокліматичні межі: T = 18–22 °С, RH = 40–65 %, CO₂ < 1000–1200 ppm у час перебування. Під час пікових навантажень допускаємо короточасні відхилення з обов'язковим відновленням параметрів у «після-події».
- Огороджувальні конструкції: для першого наближення приймаємо аналогічні до поверхів питомі тепловтрати по стінах/стелі/підлозі, розуміючи, що підвал контактує з ґрунтом і має іншу динаміку теплопередачі. У детальному моделюванні (розд. 4) врахуємо понижену амплітуду коливань та локальні «містки холоду».
- Графік використання: комбінований — навчальні пари + епізоди укриття під час тривоги. Для розрахунків розглядаємо S1/S2/S3/C1/C2/C3 із заповненням переважно ЗП-А і частковим — ЗП-В, а також хвилеподібний вхід/вихід через ЗП-С.

Ці припущення створюють узгоджену стартову платформу для кількісних оцінок у розділах 3–4: ми зможемо коректно перевести людський фактор у теплові та вологісні навантаження, а також зіставити необхідні витрати повітря з реально доступними режимами вентиляції.

2.2 Ризики, зовнішні умови і сценарії експлуатації

Підвал живе за «підземними» правилами: навіть невелика зміна потоку людей або режиму вентиляції тут позначається швидше та відчутніше, ніж на поверхах. Додайте до цього характерні для воєнного часу блекауту, що приходять без попередження, — і ми отримуємо задачі, які не вирішуються одноразовим налаштуванням термостатів. Необхідний процес, де моніторинг і керування утворюють замкнений цикл: «поміряв → усвідомив → відреагував → перевірів».

Зовнішні фактори. Київський клімат формує широку амплітуду температури зовнішнього повітря протягом опалювального сезону. Огороджувальні конструкції підвалу мають порівняно малу добову амплітуду, але значну сезонну інерцію; внаслідок цього точка роси може часом опинитися ближче до внутрішньої поверхні стіни, і дрібні конденсатні плями з'являються у «холодних кутах». У періоди відлиг і дощів ситуація ускладнюється підсосом вологи з ґрунту, яке ми сприймаємо в моніторингу як повільний дрейф RH «угору» навіть без людей.

Людський фактор. Одночасний захід 50–150 осіб у ЗП-А за кілька хвилин — реальність, яку підтверджують навчальні розклади й сирени повітряної тривоги. Для моніторингу це означає: криві CO₂ зростають лавиноподібно, за ним тягнеться RH (за рахунок дихання та випаровування з одягу), а температура повітря підстрибує на 0.5–1.5 °C за короткий час навіть без активного опалення — лише за рахунок тепловиділення людей. Якщо вентиляція не підлаштовується оперативно, комфорт зникає за десятки хвилин, а система отримує «хвіст» підвищеної вологості після виходу людей.

Ризики експлуатації. Окрім очевидних (переповнення, підвищена вологість, блекауту), на практиці часто «стріляють» і менш помітні:

- неузгоджені самовільні дії персоналу (відкривання/закривання клапанів, вимикання вентиляторів «щоб не шуміли»);

- засмічення фільтрів, яке непомітно знижує розрахункову кратність повітрообміну;
- дрейф показів сенсорів RH/CO₂ без регулярної калібрування, що призводить до систематичних помилок у прийнятті рішень;
- втрата телеметрії під час блекауту і, як наслідок, «сліпота» у найпотрібніший момент.

У розділах 3–4 ми спроекуємо і перевіримо режими, які дозволять проходити S1/S2/S3/C1/C2/C3 без виходу за прийнятні межі T/RH/CO₂, а також без «накопичення проблем» на наступні зміни.

2.3 Вимоги до системи моніторингу для підвалу (укриття) корпусу

Вимоги — це міст між «хотілося б» і «працює щодня». Ми формуємо їх так, щоб кожен пункт був перевіримим у тестах і зрозумілим експлуатації.

2.3.1 Контрольовані величини, точки вимірювання і сенсорні вузли. У кожній ключовій зоні (ЗП-А/В/С) встановлюємо вузли T/RH/CO₂ на висоті «зони дихання» 1.1–1.5 м, подалі від батарей, притоків і дверних прорізів. Для великих залів — мінімум два вузли: один ближче до приточного потоку (щоб фіксувати реакцію системи), інший — у «тихій» зоні, де повітря застоюється. У ВК вимірюємо принаймні стан живлення, а за можливості — T/RH притоку/витяжки та перепад тиску на фільтрі (індикатор засмічення). У тепловому вузлі (ІТП/ввід) — T подачі/звороту, ΔT , витрату/тепло (якщо є теплолічильник), тиск на магістралях.

2.3.2 Частоти опитування, агрегування та зберігання. Мікроклімат у ЗП — щохвилини (у номіналі) з можливістю «прискорення» до 30 с під час пікових подій та «сповільнення» до 2–3 хв у блекаутах для економії енергії. Теплові параметри на вводі — 30–60 с (ми хочемо бачити, коли опалення реально «дихає»). Лічильники — 5–15 хв; статуси (живлення, вентустановки) — подієво + «heartbeat» кожні 30–60 с. Зберігаємо «сирі» ряди, мінімум 7–14 діб локального буфера на контролері (щоб пережити будь-який блекаут), і агрегати 15-хв та 1-год для огляду тенденцій.

2.3.3 Точність, стабільність і калібрування. Температура — похибка в межах $\pm 0.3 \dots 0.5$ °C, відносна вологість — ± 2 %RH у робочому діапазоні, CO₂ — $\pm(50$ ppm + 3% показу). Ключове — не лише паспортні цифри, а життєвий цикл калібрування: первинна корекція (T=0/25 °C; RH=35/75 % на соляних камерах), для CO₂ — нульова корекція на свіжому повітрі; щоквартальний контроль зсувів і маркування сенсорів, щоб не плутати старі й нові.

2.3.4 Розміщення та кабельні траси. Сенсори — у місцях, де ними не зносять куртками; кабелі — у ПВХ-коробах або гофрі по периметру, з переходами через двері у металевих порогових захистах. Датчики подачі/звороту — у гільзах на трубах (або накладні з теплоізоляцією, якщо гільзи немає). Комунікаційна шафа — IP54, із вентиляцією та місцем для UPS. Окремо позначаємо на плані «холодні стіни» і встановлюємо поверхневі датчики точки роси там, де історично виникала пліснява (це просте рішення часто «рятує» ремонт).

2.3.5 Живлення і автономність. Ми виходимо з того, що під час блекаутів моніторинг не має «осліпнути». Тому контролер, модем, базовий вузол у ЗП-А мають власне резервне живлення на 24–48 год. У блекаут-режимі система автоматично знижує частоту опитування, вимикає «ненажерливі» інтерфейси, переходить на GSM із рідкісною телеметрією й агресивною буферизацією. Усе це — щоб ми знали, як поводить ся укриття саме тоді, коли це найбільш критично.

2.3.6 Зв'язок, буферизація і повторна доставка. Основний канал — Ethernet/Wi-Fi університетської мережі з окремим VLAN для OT-сегменту; резерв — GSM/LTE з фіксацією якості сигналу. Локальний буфер (SQLite/Influx) — глибинною не менше 7–14 діб, алгоритм store-and-forward із підтвердженням доставки та валідацією часових міток при відновленні мережі. Це дрібниця, але без неї час рветься на «дірки», а графіки стають непридатними для порівнянь.

2.3.7 Інтерфейси, сповіщення, ролі. Дашборд — не «красивий графік», а робочий інструмент. На головному екрані — карта ЗП-А/В/С із поточними Т/РН/CO₂, індикатори стану ІТП/венткамери, журнал подій. Сповіщення — багаторівневе: м'які попередження (наближення до 1000 ppm CO₂), жорсткі аварії (>1200–1500 ppm; RH>70–80%; падіння мережі/UPS), ескалація за ролями. Для інженерів — розширені графіки з накладанням трендів і погодних факторів; для адміністрації — звіти в XLSX/CSV і KPI за місяць/сезон.

2.3.8 Безпека й обслуговування. Мережа — сегментована; доступ — за мінімально необхідними правами; трафік — шифрований (TLS/VPN). Журнал аудиту — увімкнений. Техобслуговування — не «коли зламається», а за графіком: огляд сенсорів щомісяця, калібрування щокварталу, тест сповіщень раз на місяць, перевірка UPS раз на квартал із протоколом результатів. Це створює звичку довіряти цифрам — а без довіри автоматизація перетворюється на декорацію.

2.3.9 Узгодження з практикою експлуатації корпусу. Жодна система моніторингу не працює у вакуумі — вона вбудовується в ритм університету. Тому ми відразу формалізуємо регламенти, які «прив'язують» цифри до дій персоналу під різні сценарії.

Перед-подія (за 20–40 хв до очікуваного заповнення, за розкладом):

- перевірити стан вентиляції (журнал «зелений», фільтр не забитий, живлення стабільне);
- у холодний період — піднагрівання зони ЗП-А до нижньої межі комфорту (щоб не «доганяти» вже з людьми);

- вологісна підготовка: короткий провітрювальний цикл для зниження RH, якщо попередня сесія залишила «вологий хвіст».

Під час перебування (S1/S2/S3/C1/C2/C3):

- тримати CO₂ < 1000–1200 ppm за рахунок керованої вентиляції;
- контролювати RH у межах 40–65% (при рості — увімкнути осушувальний/припливний режим);
- відстежувати «гарячі точки» за поверхневими датчиками (підозра на конденсацію).

Після-подія (одразу після виходу):

- провітрювання/осушення до RH < 65% у ЗП-А/В/С (і підтвердження на дашборді);
- повернення опалення в економічний режим;
- короткий огляд журналу подій (чи були піки понад пороги, чи спрацювали ескалації).

КРІ сезону: частка часу в межах комфорту (T/RH/CO₂), дні без аварійних подій, економія тепла відносно базової лінії. Ці показники не лише «для звіту» — вони допомагають у міжсезоння коригувати налаштування ІТП і планувати апгрейди (від заміни фільтру до додавання ще одного сенсорного вузла у «сліпій зоні»).

2.4 Висновок до розділу

Підвальне укриття корпусу 11 — це складна, але керована система. Якщо бачити його в цифрах, реагувати за сценаріями S1/S2/S3/C1/C2/C3 і не забувати про базові речі (калібрування, резервування, регламенти), то навіть у стресових умовах воєнного часу тут можна підтримувати прийнятний комфорт і прозорий облік теплоспоживання. Розділ 3 переведе ці вимоги в конкретну архітектуру рішень — від типів сенсорів до топології живлення та алгоритмів дашборду.

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

3.1 Архітектурна концепція та принципові рішення

Додаткові пояснення. На практиці архітектура системи моніторингу схожа на добре організований черговий журнал: кожен запис має час, місце, підпис відповідального і короткий зміст події. Сенсори — це «очі й вуха», контролер — «секретар», який акуратно занотовує без емоцій і не сперечається з фактами; сервер — «архів», де записи складаються по полицках; дашборд — «кабінет чергового», де видно картину цілком. Коли така метафора зрозуміла всім — від електромеханіка до проректора — система працює стабільніше, бо кожен елемент має очевидну роль. Ми навмисно уникаємо модних, але крихких залежностей: де можна — дріт, де потрібно — локальна БД, де доречно — простий документований протокол. Особливо в укриттях, де головний критерій — передбачуваність у гіршому сценарії.

З огляду на часті блекаuti, закріплюємо принцип «керованої деградації»: спершу зберегти вимір (щоб історія не пропала), далі сповістити бодай мінімально, і вже в останню чергу — візуалізувати «красиво». Ця ієрархія пріоритетів зафіксована в інструкції трьома простими правилами: «Зберегти → Сповістити → Відновити». Для контролю якості раз на місяць моделюємо навчальну «штучну тривогу» і перевіряємо, чи дотримується система цієї логіки.

Окрема увага — синхронізації часу. У блекаутах годинники дрейфують, а без єдиного часу телеметрія перетворюється на «кросворд». Контролер не лише тягне NTP (внутрішній + публічний), а й маркує «нестабільні» пакети як out-of-order, аби графіки не містили хибних піків. Після відновлення зв'язку виконується «плавне» вирівнювання часових міток (slew), щоб не створювати логічних «провалів» у часових рядах.

3.2 Вибір елементної бази (сенсори, інтерфейси, вузли)

Практичні зауваги щодо сенсорів. Порівнювати датчики варто не лише за паспортною точністю, а й за поведінкою «після дощу». Підвал — це вологість, пил і час від часу краплинні бризки під час прибирання. Корпус зі змінним фільтром та швидким доступом (щоб протерти/замінити капсулу без демонтажу) іноді важливіший за надточний АЦП. Для CO₂ сенсори з АВС-корекцією зручні, але АВС передбачає регулярне «бачення» свіжого повітря; у підвалі це буває не завжди, тому обов'язково передбачаємо ручну нульову корекцію (outdoor baseline) — процедура на 2 хвилини різко підвищує довіру до показів.

Калібрування та життєвий цикл. Стартова перевірка: T у двох точках (0/25 °C), RH на насичених соляних розчинах ($\approx 35/75$ %RH), CO₂ — нуль на свіжому повітрі та контроль 1000–1500 ppm у лабораторії. Кожен сенсор має «паспорт» із серійником, датою та девіаціями. Далі — місячний огляд, квартальна перевірка дрейфу з можливістю перерахунку коефіцієнтів або заміни капсули RH; ревізія вузла через 18–24 місяці.

Контролер-шлюз. Ідея використання Raspberry Pi приваблива, але впирається у відмовостійкість SD-карт і брак індустріальних інтерфейсів. Тому ставимо індустріальний контролер із апаратним watchdog, захистом живлення та підписаними OTA-оновленнями. Дешевий пристрій, що завис раз у місяць у блекаут, виявляється дорожчим за дорожчий, який не зависає зовсім.

3.3 Топологія з'єднань і протоколи

Деталі монтажу і EMC. Прокладка RS-485 «зіркою» з короткими плечима зменшує шанс, що один пошкоджений відрізок «потягне» весь сегмент. Кожне плече маркуємо етикеткою, що повторює ідентифікатор вузла у дашборді — так електрик у темному підвалі й оператор у кабінеті говорять «однією мовою».

Екрановану пару заземлюємо з одного боку (щоб уникнути петель струмів), термінатор 120Ω ставимо на краях, довгі ділянки підсилюємо репітерами.

MQTT-нотація і фільтрація. Схема топиків узгоджується заздалегідь і не змінюється в сезоні: `nubip/11/basement/ZP-A/co2`, `.../rh`, `.../itp/supply_temp`, `.../power/ups_soc`. На edge застосовуємо 5-точкове згладжування, IQR-фільтр викидів і прості «перевірки причинності» (якщо вентиляція=ON — CO₂ має спадати із очікуваною швидкістю; якщо приплив ↑, а RH росте — сигнал «вологий приток»).

3.4 Енергопостачання та автономність (блекаут-профілі)

Енергобюджет «на пальцях». Виносимо в окремий аркуш просту таблицю: хто скільки «їсть» у нормі та в блекаут-профілі (контролер, модем, сенсори, комутатор), і поруч — розрахунок автономії для АКБ 10/20/40 А·год. Окремо враховуємо втрати на DC-DC-перетворювачах і поправку на температуру (в холодному підвалі місткість АКБ падає). Для довгих S3 дозволяємо системі «дрімати»: сенсори міряють рідше, LTE передає пакети пачками, контролер «прокидається» за розкладом для критичних подій. Три рівні деградації сервісу (повний MQTT → лише події → тільки SMS) пояснені в інструкції, щоб уночі оператор розумів, чому графіки «похуділи», але тривоги доходять.

3.5 Дашборд, сповіщення і сценарні картки

Про UX і мікрокопі. Люди читають не цифри, а повідомлення. Тому під кожним графіком — коротка підказка: «CO₂ зменшився з 1350 до 980 ppm за 14 хв після +30% припливу — норма», або «RH > 70% у ЗП-В понад 25 хв — увімкніть осушення, перевірте фільтр». Журнал подій допускає вільні примітки оператора — за місяць це перетворюється на «базу знань» саме цього підвалу з його звичками.

Сценарні картки S1/S2/S3/C1/C2/C3. Це не бюрократія, а шпаргалка в стресі. Формулювання свідомо прості: «Збільшити приплив на +20%», «Відкрити квартиру у ЗП-С на 10 хв», «Перевірити індикатор фільтра». Після виходу людей — «осушення» та контроль повернення параметрів у «зелену» зону.

3.6 Кібербезпека, ролі та аудит

Гігієна безпеки з першого дня. Сертифікати для MQTT/HTTPS мають строк і ротацію; облікові записи інженерів — MFA; журнали доступів зберігаються з контрольними сумами. Коли з'явиться керування (як другий етап), воно працюватиме в іншій зоні довіри з окремими ключами, VLAN і ролями. Модель загроз включає MITM, шкідливі OTA, компрометацію облікових даних, шифрування БД вимагателями; протидія — взаємна TLS-автентифікація, підписані OTA, сегментація OT/IT, офлайн-бекапи, моніторинг аномалій на фаєрволі.

3.7 Монтаж, кабель-менеджмент і сервісопридатність

Про сервіс і приймання. Кожен датчик має етикетку з ідентифікатором, що повторюється у прошивці, MQTT-топіку та на дашборді. У шафі — ламінована схема з підписами кабелів і комплект запасних стікерів. На прийманні ми спеціально «ламаємо» один сегмент шини і фіксуємо: як система сигналізує, чи є обхідні сценарії, скільки часу займає відновлення. Якщо під час такого іспиту все пройшло гладко — у реальному житті теж буде керовано.

3.8 Документація, регламенти та навчання персоналу

Формати навчання. Робимо два рівні інструкцій: «кишенькову» (2–3 сторінки з великими іконками й QR-кодами) і «повну» (детальний опис екранів та індикаторів). На тренуванні обов'язково моделюємо тривогу та блекаут: оператор

має бодай раз побачити «сірий» дашборд у режимі економії, щоб реальний інцидент не став сюрпризом.

3.9 Підбір і обґрунтування основних елементів вентиляційної установки

На підставі розрахункового повітрообміну (≈ 300 м³/год на одну зону підвалу, сумарно 600–800 м³/год) та кліматичних умов м. Київ (розрахункова температура зовнішнього повітря взимку до -22 °С, влітку до $+30\dots+32$ °С) виконується підбір основних елементів припливно-витяжної установки: водяного нагрівача, водяного охолоджувача, пластинчастого рекуператора, байпасних повітряних заслінок та контрольно-вимірювальних приладів. Усі прилади обираються з наявних на ринку типорозмірів з прямокутним перерізом 800×500 мм, що відповідає головному повітропроводу проектованої установки.

3.9.1 Водяний нагрівач (калорифер). Для нагріву припливного повітря після рекуператора та/або охолоджувача приймається каналний водяний нагрівач ВЕНТС НКВ $800\times 500-2$ (або НКВ $800\times 500-3$ при необхідності більшого запасу потужності) українського виробництва. Нагрівач призначений для прямокутних каналів 800×500 мм, має дворядний (або трирядний) теплообмінник з мідними трубками та алюмінієвими ламелями, корпус з оцинкованої сталі. Максимальний робочий тиск теплоносія – 1,6 МПа, гранична температура води $+100$ °С.



Рис. 3.1. Водяний нагрівач ВЕНТС НКВ 800×500-2

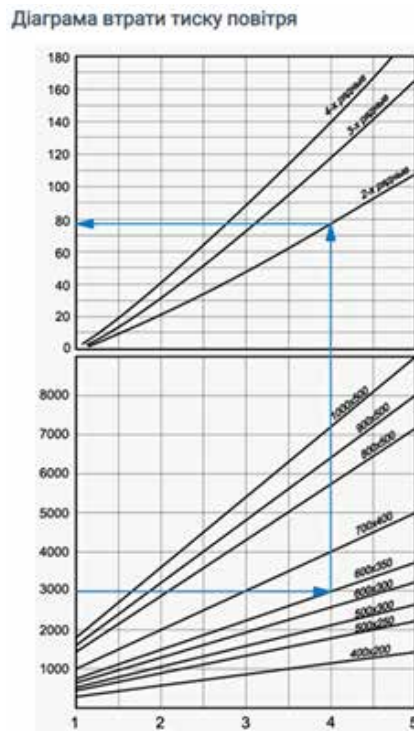


Рис. 3.2. Діаграма втрат тиску водяним нагрівачем ВЕНТС НКВ 800×500-2

Згідно з каталогом виробника, типова розрахункова витрата повітря через нагрівач цього типорозміру становить $\approx 5500\text{--}6800$ м³/год при перепаді тиску близько **60 Па**. Для нашої установки фактична витрата суттєво менша (не більше 800–1000 м³/год), тому:

- швидкість повітря у перерізі калорифера не перевищує 0,7–1,0 м/с (що істотно менше дозволених 3–4 м/с);
- теплова потужність нагрівача використовується з великим запасом, що гарантує можливість нагрівати зовнішнє повітря від -22 °С до $18\text{--}20$ °С навіть при зниженні температури води в мережі чи частковому забрудненні ламелей;
- робочий тиск у системі опалення навчального корпусу (орієнтовно до 0,6–0,8 МПа) значно нижчий за паспортні 1,6 МПа, що забезпечує підвищену надійність та запас міцності.

Розрахункова теплова потужність на нагрів припливного повітря оцінювалася за формулою:

$$Q \approx 0,335 \cdot L \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

де L – витрата повітря, м³/год, Δt – підвищення температури. При $L = 800$ м³/год та $\Delta t \approx 35\text{--}40$ °С отримуємо необхідну потужність порядку 9–11 кВт. За каталогними графіками для НКВ 800×500-2 при таких витратах повітря та стандартному водяному графіку 70/50 °С забезпечується більша теплова потужність, тобто обраний калорифер має достатній запас.

3.9.2 Водяний охолоджувач. Для літнього режиму та режиму осушення повітря за схемою (див. водяний охолоджувач перед нагрівачем) приймається каналний водяний охолоджувач ВЕНТС ОКВ 800×500-3. Охолоджувач призначений для систем вентиляції прямокутного перерізу, має три ряди мідних труб з алюмінієвими ламелями, корпус із оцинкованої сталі, комплектується краплевловлювачем та дренажним піддоном для відведення конденсату. Максимальний робочий тиск – 1,5 МПа.



Рис. 3.3. Водяний охолоджувач ВЕНТС ОКВ 800×500-3

Охолоджувач використовується з водяним контуром чиллера (холодоносії 7/12 °С) і забезпечує охолодження та осушення припливного повітря до температури точки роси, після чого водяний нагрівач виконує функцію догріву до комфортних 18–20 °С. Розрахунковий перепад температури повітря через охолоджувач у режимі осушення приймається 8–12 К, що дає необхідну холодопродуктивність порядку 6–9 кВт при витраті 800 м³/год за тією ж формулою $Q \approx 0,335 \cdot L \cdot \Delta t$. Каталогні характеристики ОКВ 800×500-3 з надлишком покривають цю потребу, працюючи при нашій витраті повітря лише в нижній

частині робочої діаграми, що забезпечує додатковий запас по продуктивності та надійності.

Приклад розрахунку параметрів

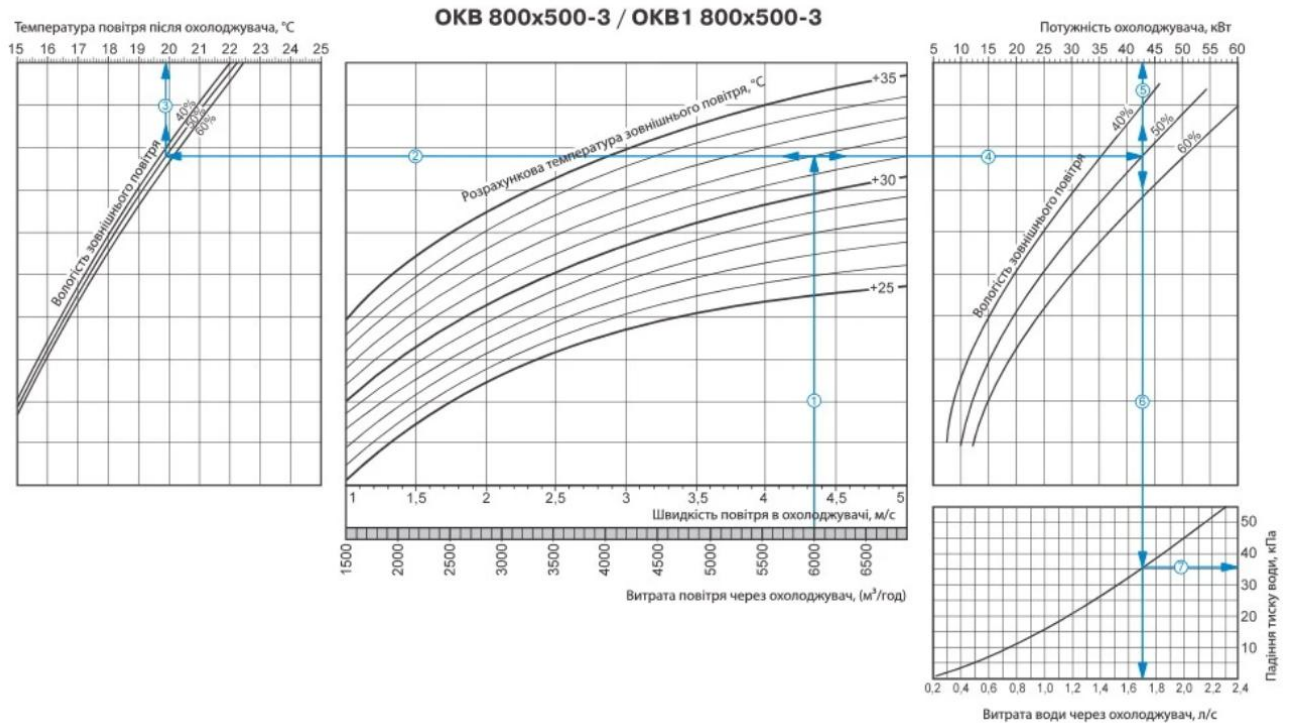


Рис. 3.4. Приклад розрахунку параметрів для водяного охолоджувача ВЕНТС ОКВ 800×500-3

3.9.3 Пластинчастий рекуператор. Для утилізації тепла витяжного повітря обирається пластинчастий рекуператор ВЕНТС ПР 800×500 для прямокутних каналів. Корпус виконаний з оцинкованої сталі, теплообмінник – пакет тонких алюмінієвих пластин з перехресним протіканням повітря. У стандартному виконанні передбачено штуцер для відведення конденсату, маса апарата близько 61 кг, розміри під приєднання – 800×500 мм.

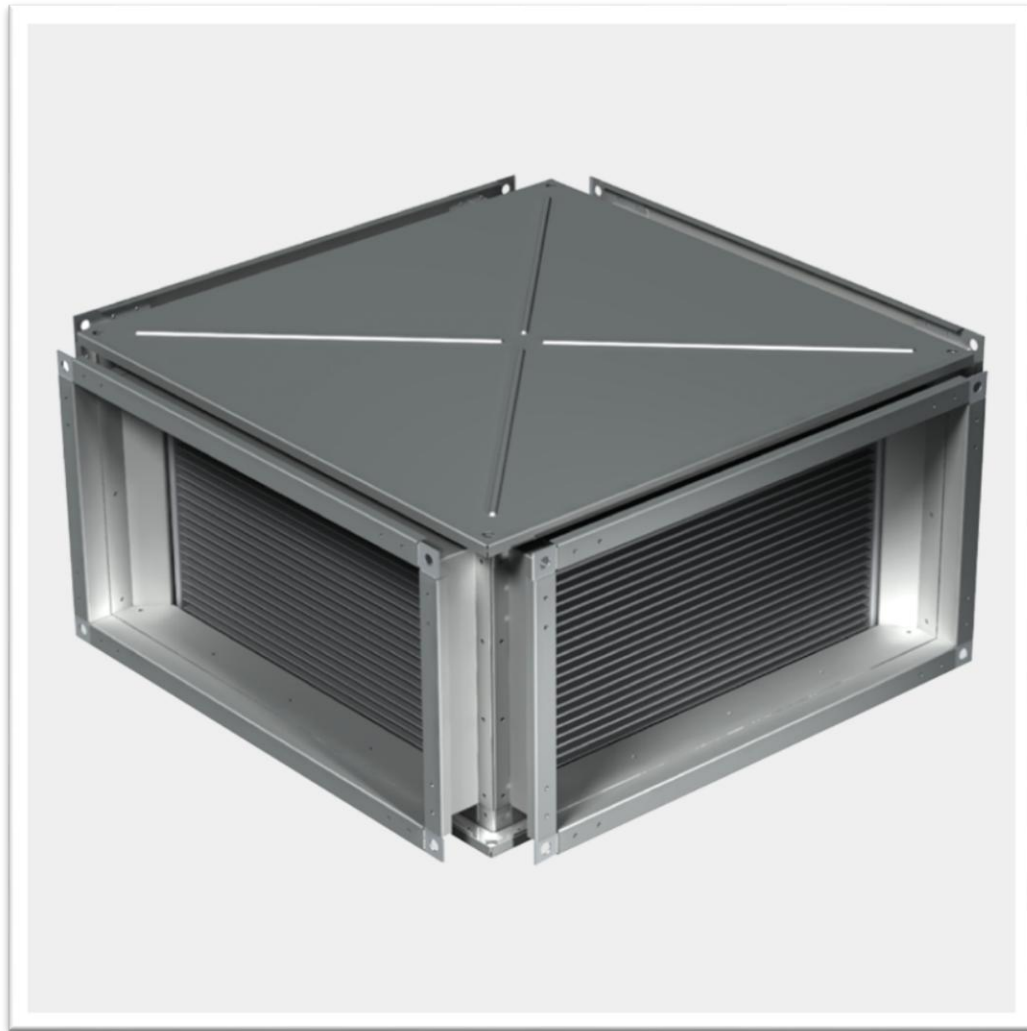


Рис. 3.5. Пластинчастий рекуператор ВЕНТС ПР 800×500

Основні параметри для проекту:

- тепловий ККД рекуператора (за каталогом) для діапазону наших витрат 600–800 м³/год становить 60–70 % при помірному аеродинамічному опорі;
- опір рекуператора при таких витратах повітря знаходиться в межах 60–90 Па, що враховано при розрахунку напору вентиляторів.

При зовнішній температурі $-15\dots-20$ °С та внутрішній 22 °С рекуператор дозволяє попередньо підігріти приплив повітря до $\approx 0\dots+5$ °С, що зменшує теплове навантаження на водяний нагрівач приблизно в 2–2,5 рази та суттєво скорочує витрати теплової енергії.

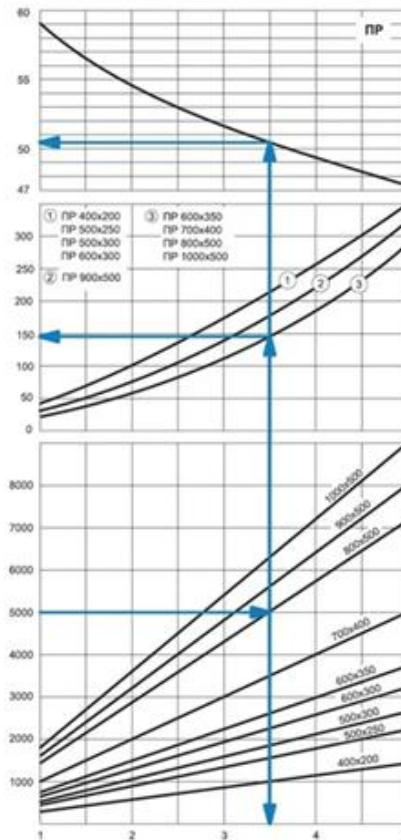


Рис. 3.6. Аеродинамічні характеристики пластинчастого рекуператора ВЕНТС ПР 800×500

3.9.4 Байпас рекуператора та повітряні заслінки. Для реалізації літнього байпасу рекуператора, перемикання потоків та аварійного перекриття повітряних каналів застосовуються прямокутні повітряні заслінки ВЕНТС КР 800×500 або регулятор витрати повітря ВЕНТС РРВ 800×500 з можливістю встановлення електропривода.

Як виконавчий механізм прийнято **електропривод Belimo LM24A-SR** (24 В АС/DC, крутний момент 5 Н·м, діапазон керування 2–10 В). Такий привід забезпечує:

- безступінчасте (аналогове) регулювання ступеня відкриття байпасу від 0 до 100 % відповідно до сигналу контролера;
- час повороту близько 150 с, достатній для плавної роботи без гідро- й аеродинамічних ударів;

- напругу живлення низької напруги 24 В, що відповідає вимогам електробезпеки для допоміжних ланцюгів автоматики.

У зимовий час байпас працює переважно в закритому стані (повітря проходить через рекуператор), у міжсезоння та влітку алгоритм автоматики відкриває байпас при сприятливій температурі зовнішнього повітря (free-cooling), а також при необхідності дефросту рекуператора.

3.9.5 Датчики температури, вологості, тиску та CO₂. Система автоматизації вентиляційної установки спирається на набір контрольно-вимірювальних приладів, підібраних таким чином, щоб їх робочі діапазони повністю перекривали можливі зміни параметрів повітря та теплоносія, а похибки вимірювання не впливали на якість регулювання.

3.9.6 Датчики температури та відносної вологості в повітроводі. Для контролю температури та вологості припливного повітря після охолоджувача й нагрівача обрано комбінований датчик Siemens QFA3160 (серія QFA31..) з аналоговим виходом 0–10 В. Робочий діапазон температур: 0...50 °С, вологість: 0...100 % RH, типова похибка вимірювання температури $\pm 0,2$ К, вологості – ± 2 % RH у діапазоні 10–90 % RH.

Розрахункова робоча зона нашої системи – температура припливу 16–25 °С, відносна вологість у підвалі 40–65 %. Отже, вимірювані значення знаходяться всередині діапазону датчика, а відносна похибка вимірювання не перевищує 1–2 % від реального значення, що є достатнім для ПД-регуляції та контролю конденсації на поверхнях.

3.9.7 Кімнатні датчики CO₂, температури та вологості. Для зонального керування по якості повітря застосовано настінні датчики Siemens QPA2000 (CO₂ + температура) у поєднанні з окремими датчиками вологості або комбіновані модифікації серії QPA.

Робочий діапазон по CO₂ – 0...2000 ppm, похибка – приблизно $\pm(50 \text{ ppm} + 2\%$ від виміряного значення); по температурі – 0...50 °C з похибкою близько $\pm 0,6$ °C.

Нормативне обмеження для навчальних приміщень – рівень CO₂ не вище 1000 ppm. Для цього діапазону максимальна похибка не перевищує ~ 70 ppm (менше 7 % від порогового значення), що дозволяє надійно підтримувати CO₂ нижче граничних значень. Діапазон температури повністю перекриває очікувані коливання в підвалі (+16...+26 °C).

3.9.8 Датчики різниці тисків на фільтрах і рекуператорі. Для контролю забруднення фільтрів та аеродинамічного опору рекуператора прийнято диференціальні датчики тиску Siemens QBM3020-3 з діапазоном вимірювання 0...300 Па та виходом 0–10 В. Згідно технічних даних, основна похибка датчика не перевищує приблизно $\pm 1\%$ від верхньої межі діапазону.

Розрахункові перепади тисків на чистих фільтрах – 40–60 Па, на забруднених – до 150 Па; на рекуператорі – 60–90 Па. Таким чином, вимірювані значення лежать у центральній частині шкали 0–300 Па, а абсолютна похибка ≈ 3 Па є значно меншою за різницю між порогами «чистий/забруднений», що дозволяє коректно відпрацьовувати сигнал обслуговування.

3.9.9 Датчики температури зовнішнього повітря та теплоносія. Для зовнішнього повітря застосовується стандартний датчик температури типу канално-зовнішній з діапазоном $-50...+80$ °C та похибкою не більше $\pm 0,5$ °C (наприклад, один із датчиків серії Siemens QAC/QAM або аналог вітчизняного виробництва). Для контролю температури теплоносія в подаючому та зворотному трубопроводах нагрівача й охолоджувача використовуються занурювальні датчики Pt1000 у гільзах (діапазон 0...120 °C, похибка не гірша класу B згідно IEC 60751, тобто $\pm(0,3-0,5)$ °C у робочому діапазоні). Це дозволяє точно визначати фактичний температурний графік мережі та реалізовувати захист від замерзання калорифера.

3.9.10 Протизамерзальний термостат калорифера. На виході водяного нагрівача передбачено механічний протизамерзальний термостат з капілярним датчиком (діапазон уставки $0...+15$ °С, типовий поріг спрацювання $+5$ °С, точність близько ± 1 К). При падінні температури повітря після калорифера нижче уставки термостат подає сигнал аварії: вентилятор вимикається, запірний клапан на калорифері відкривається на максимум, вмикається циркуляційний насос – що запобігає замерзанню теплообмінника.

3.9.11 Вентилятори для приточної та витяжної систем. Для забезпечення необхідного повітрообміну згідно сценаріїв експлуатації (до 800 м³/год) та з урахуванням опору рекуператора типу ВЕНТС ПР 800×500 (розрахунковий Δp $60-90$ Па), прийнято наступні вентилятори:

Притяжний вентилятор — Systemair MUB 042 500E4, каналного типу з діагональним робочим колесом, максимальною витратою до 900 м³/год при 100 Па. Оснащений двигуном з керуванням по $0-10$ В, що дозволяє реалізувати плавне регулювання швидкості за сигналом від контролера (PID по CO_2/RH). Клас захисту IP54, рівень шуму не перевищує 55 дБ(А), можливе монтажне виконання зі звукопоглинальним кожухом.

Витяжний вентилятор — Salda RIRS 500×800 EC з прямокутним корпусом і EC-двигуном. Забезпечує до 900 м³/год при аналогічних параметрах. Має вбудований перетворювач частоти та підтримує керування по $0-10$ В. Може працювати з невеликим перевищенням продуктивності над припливом (на $5-10$ %) для запобігання поширенню запахів.

Як бюджетна альтернатива для обох потоків може застосовуватись вентилятор ВЕНТС ВКПФ 500×800 E2, що забезпечує достатню продуктивність і сумісність з прийнятою системною аеродинамікою. Усі варіанти підтримують VFD-керування, сумісні з байпасом рекуператора і сценаріями захисту від замерзання.

3.10 Попередній кошторис і комплектність (орієнтовно)

- Вузли T/RH/CO₂ (корпус, кріплення) — ×6;
- Датчики Pt1000 у гільзах — ×4;
- Теплолічильник з M-Bus — ×1;
- Контролер-шлюз із LTE — ×1;
- UPS/АКБ (LiFePO₄ 12 В 20–40 А·год) — ×1–2;
- Кабель, короби, шафа IP54, фурнітура — комплект;
- ПНР, калібрування, навчання персоналу — пакет.

Пояснення. Кошторис — це інструмент планування ризиків. Окремим рядком закладаємо змінні капсули RH-сенсорів, фільтри вентиляції та альтернативний канал зв'язку (SIM іншого оператора). Замість однієї «великої» АКБ іноді краще дві середні з можливістю швидкої заміни однієї — система не зупиняється.

3.11 Реєстр ризиків (витяг)

- R1: Відсутність зв'язку під час тривалої тривоги → буфер ≥ 14 діб, дубльований оператор, SMS-ескалація.
- R2: Дрейф RH-сенсорів → квартальна перевірка, змінні капсули.
- R3: Знеструмлення 36–48 год → профіль деградації + збільшена АКБ.
- R4: Людський фактор («вимкнули вентилятор, щоб не шумів») → журнал змін, інструктаж, візуальні попередження.

Пояснення. Реєстр переглядаємо щомісяця разом із журналом подій: нові інциденти — нові дії. Так документ залишається «живим», а не архівом минулого сезону.

3.12 Критерії приймання системи

- Точність сенсорів у межах допуску після 30 діб роботи;
- 100% доставка «червоних» подій мінімум двом адресатам ≤ 60 с;
- Успішне відтворення історії після 24-год блекауту без втрати часових міток;
- Середній час відновлення сервісів після перезапуску < 90 с.

Пояснення. Не приймаємо «по паспорту». Перед підписанням акту проводимо 7-денну дослідну експлуатацію з двома штучними інцидентами (піковий CO₂, імітація блекауту). Критерії пройдені — система готова до зими; ні — повертаємось до налаштувань і повторюємо іспит.

3.13 Інтеграція проєктної схеми рекупераційної вентиляції (опис, сенсори, алгоритми)

Вихідні дані. У системі використано припливно-витяжну установку з пластинчастим рекуператором, байпасом рекуператора, двома відцентровими вентиляторами (приплив/витяжка), каналним водяним охолоджувачем (для контрольованого осушення та зниження температури) та водяним нагрівачем (для догріву припливного повітря).

Схема передбачає прямі сенсори та виконавчі пристрої:

- $t_{зовн}$ — температура зовнішнього повітря;
- $t_{вит}$ — температура повітря на витяжці з приміщень;
- $t_{після/фпісля}$ — температура та відносна вологість повітря після теплообмінників;
- $t_{зона/фзона/CO_2зона}$ — параметри у підвалі на рівні зони перебування (1,1–1,5 м);
- $\Delta P_1 \dots \Delta P_4$ — перепади тиску на фільтрах та рекуператорі;
- SPV1/SPV2 — приводи заслінок (забір, витяжка);

- SPV3 — привід байпасу рекуператора;
- $Y_1(h)/Y_2(h)$ — електроприводні клапани на гідравлічних контурах охолодження/нагріву;
- M1/M2 — циркуляційні насоси відповідних контурів.

Рекуператор виконує функцію пасивного нагріву припливного повітря за рахунок передачі теплоти витяжному потоку. Це дозволяє зменшити навантаження на нагрівач узимку та уникнути перегріву в міжсезоння. Байпасна лінія дозволяє у разі зовнішньої температури в комфортному діапазоні ($t_{\text{зовн}} \approx 12...18 \text{ }^\circ\text{C}$) направляти повітря в обхід теплообмінника, реалізуючи режим "вільного охолодження" (free cooling) або дефросту (розмерзання рекуператора).

Охолоджувач працює у парі з нагрівачем, утворюючи контур осушення з догрівом:

повітря охолоджується нижче точки роси ($t < t_{\text{роси}}$), волога конденсується, потім повітря догрівається до $+18...+20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Два окремі вентилятори дозволяють балансувати тиск у підвалі щодо суміжних зон на рівні $0...+5 \text{ Па}$, запобігаючи інфільтрації запахів і пилу з технічних приміщень.

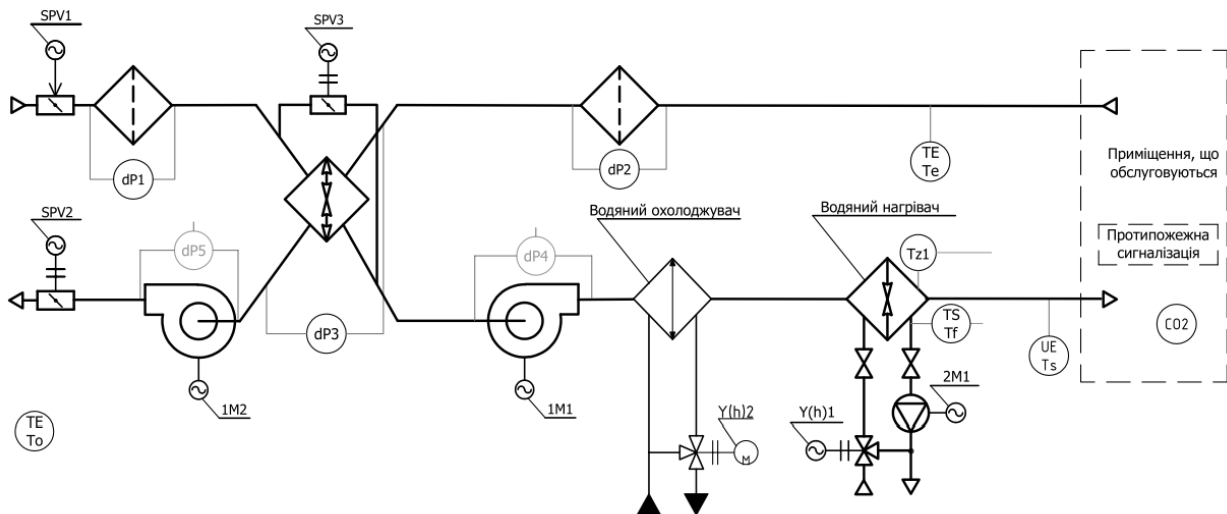


Рис. 3.7. Схема вентиляційної системи

Сенсори та їх стек.

- Зовнішнє повітря: $t_{зовн} + \phi_{зовн}$ у захищеному від сонця місці; дані використовуються для логіки байпасу та "вільного охолодження".
- Після рекуператора: $t_{після\ рекуп.} + \Delta P_{рекуп.}$ — для контролю енергоефективності та виявлення обмерзання; при зниженні $t_{після}$ або зростанні ΔP активується алгоритм дефросту (часткове відкриття байпасу).
- Після охолоджувача: $t_{після\ охол.}/\phi_{після\ охол.} + \text{сигнал переливу}$ — контролюють осушення повітря та аварійну ситуацію при переповненні ванни.
- Після нагрівача / перед подачею: $t_{подачі}$ — контрольована величина для підтримки цільового мікроклімату.
- У зоні підвалу: 2–3 вузли CO₂зона, $t_{зона}$, $\phi_{зона}$ на висоті 1,1–1,5 м — основні керуючі змінні для вентиляції та осушення.
- Фільтри: ΔP фільтр припливу, ΔP фільтр витяжки — визначають ступінь забруднення та необхідність технічного обслуговування.

Базові алгоритми (узгоджені з розділом 4):

1. CO₂-контур (ведучий): PID за CO₂ zone (середнє або максимум) керує VFD обох вентиляторів, утримуючи 900...1000 ppm; межі 500...800 м³/год на зону.
2. RH-контур (осушення): якщо RH zone > 65%, спершу підвищуємо приплив; якщо бракує — опускаємо температуру на охолоджувачі нижче точки роси, увімкнувши догрів до T подачі 18...20 °C.
3. T-контур: зима — підтримуємо температуру подачі, використовуючи рекуперацію + догрів; міжсезоння/літо — free-cooling/осушення з reheat.
4. Байпас: відчинений, якщо $t_{зовн}$ в вікні комфорту (приблизно 12...18 °C) і RH out невисока, або для дефросту при зниженні температури після рекуператора.

5. Аварії: пожежна тривога — згорання у безпечний режим (заслінки, вентилялі, насоси згідно ПЯ), сигнал переливу — зупинка вентилятора/осушення.

Без зміни принципової схеми ці алгоритми лише оживляють закладені апаратні можливості й становлять підрозділ Автоматизація у дипломі.

3.14 Підбір обладнання на основі схеми (орієнтовні технічні діапазони)

Вентилятори. Продуктивність для однієї зони V приблизно 300 м³ — 600–800 м³/год (за CO₂ та RH з розділу 4); сумарно з урахуванням втрат/фільтрів і запасу — 1000–1200 м³/год по припливу та витяжці на гілку. Необхідні VFD-приводи, ККД класу IE3/IE4, рівень шуму не вище 55 dB(A) після глушників. Фільтри. Приплив: ePM1 55–60% (F7/F8); витяжка: ePM10 50% (M5/F6). dP-контроль, сервісний доступ без демонтажу секції. Рекуператор. Пластинчастий, ефективність температури 60–75%, низький витік, байпас зі щільними заслінками. dP номінальний не вище 150 Па. Водяний охолоджувач. Потік повітря 1000–1200 м³/год, краплевловлювач, ванна конденсату з гідрозатвором; за водою — пластинчастий теплообмінник з гліколем 25–30% (антифриз). Орієнтовна холодопродуктивність для осушення: 3–5 кВт на гілку. Водяний нагрівач. Теплова потужність 4–8 кВт для догріву притоку при –5...0 °C і витраті 1000–1200 м³/год. Клапан триходовий з приводом, датчик температури подачі після котушки. Насоси і гідравліка. Кожен контур — свій насос із резервом напору 20–30 кПа, грязьовики, балансувальні клапани, термоманометри, зворотні клапани. Для гліколю — матеріали, сумісні з інгібіторами. Шумоглушення/вставки/опори. Глушники після вентиляторів, еластичні вставки, віброопори для підвальної плити. Датчики/виконавці. Як у пункті 3.13 плюс поверхневі датчики точки роси на холодних стінах; приводи заслінок з поверненням пружиною (fail-safe) на критичних положеннях. Електрика/шафа. IP54, VFD у відсіку, окремий АВР/UPS для контролера та зв'язку; клеми під сервісний байпас живлення.

Примітка. Усі діапазони орієнтовні для стадії дипломного проєкту. Точний підбір (каталожні позиції) виконується після погодження планувань, трас і дозволених рівнів шуму; для економіки у розділі 6 використовуються середні ринкові ціни на класи обладнання.

3.15 Контролери та платформи автоматизації: від Arduino до PLC

Мотивація. В умовах воєнного часу критично важливі передбачуваність і ремонтпридатність. Нижче подано еволюційну лінійку — від навчальних рішень до повноцінних PLC, з обґрунтуванням, де кожен клас доречний у нашій системі.

(а) Arduino-клас (UNO/MEGA/Nano плюс індустріальні шильди). Переваги: низька ціна, просте ПЗ, великий ком'юніті. Можна реалізувати базові задачі: опитування T/RH/CO₂, логіка байпасу, прості реле. Недоліки: відсутність сертифікацій, слабка ЕМС, відсутність вбудованих промислових інтерфейсів (RS-485 ізоляція лише зовнішнім модулем), нема захисту від зависання і журналювання на рівні, потрібному експлуатації. Висновок: добре для тестового стенду/лабораторії, але недостатньо для постійної експлуатації укриття.

(б) Одноплатні комп'ютери (Raspberry Pi/Orange Pi) як edge-шлюз. Сильні сторони: Linux-стек, MQTT/Influx/Grafana, хмарні клієнти. Слабкі місця: SD-карти, чутливість до живлення/температур, відсутність жорсткого watchdog, потреба в додаткових платах для гальванічної розв'язки. Роль у нашій системі: візуалізація й кешування, але не як основний ПЛК процесу.

(в) Мікро-PLC та релейні контролери (Schneider LOGO!, Siemens LOGO!, OWEN ПЛК-20 тощо). Плюси: компактні, мають дискретні входи-виходи, простий середовище програмування, базові протоколи Modbus RTU/TCP. Мінуси: обмежені ресурси, слабкий ПД, обмежений логінг. Застосування: локальні функції (дефрост, аварії, логіка заслінок), як твердий підрівень під візуалізацію на ПК/шлюзі.

(г) Повноцінні PLC середнього рівня (Schneider Modicon M221/M241/M251; Siemens S7-1200). Це золота середина для нашої задачі. Інтерфейси: вбудовані RS-485, Ethernet, Modbus RTU/TCP; розширення аналогових входів 4–20 мА/0–10 В, RTD Pt1000. Надійність: апаратний watchdog, енергонезалежна пам'ять, підписані прошивки/ОТА, гарна ЕМС. ПД і час: готові блоки керування (Т, RH), швидкі переривання для захистів (антифриз, перелив). Інтеграція: легкий обмін з edge-шлюзом через MQTT-шлюз або OPC UA. Рекомендація: S7-1200 або M241/M251 як центральний контролер вентиляційної установки.

(г) PLC високого рівня (Siemens S7-1500, Schneider M340/M580). Резервування, безпека SIL, багатоканальні мережі, повноцінний Trace/Diagnostics. Для одного підвального крила — надлишково, але доречно, якщо проєкт масштабуватиметься на весь корпус або кампус.

Протоколи та кібербезпека. Мінімум — Modbus RTU/TCP до польових пристроїв, VPN/TLS на зовнішні сервіси, розділення OT/IT VLAN. Логи — на локальний сервер із буфером 14 днів; ескалація аварій — SMS плюс месенджер через шлюз.

Висновок по вибору. Для дипломної й реального впровадження обґрунтовано PLC середнього рівня (S7-1200 або Modicon M241/M251) плюс edge-шлюз (Raspberry Pi або індустріальний ПК) для MQTT і візуалізації. Arduino залишаємо для лабораторних макетів та резервного ручного пульта випробувань.

3.16. Нотатка про економічну ефективність (перехід до розділу 6)

У фінальному розділі диплома виконується розрахунок економічної ефективності. Щоб пов'язати його з цією схемою, фіксуємо методику наперед — це полегшить збір вихідних даних у пусконаладжувальних роботах.

Метод життєвого циклу LCC плюс простий термін окупності PP:

- Капітальні витрати (CAPEX): вентиляційна установка з рекуператором, котушки, VFD, фільтри, датчики, PLC, шафа, монтаж і ПНР.
- Експлуатаційні (OPEX): електроенергія вентиляторів/нагрівача/насосів, вода/тепло для котушок, фільтри, сервіс, калібрування сенсорів, зв'язок, АКБ раз на N років.
- Ефект економії: теплоутилізація рекуператора; керування за CO2/RH (менша середня кратність проти постійного максимуму); free-cooling у міжсезоння через байпас; цільове осушення замість пересушування всього об'єму.
- Формула PP: $PP = CAPEX / (\text{Економія річна} - \text{приріст OPEX})$. Далі рахуємо NPV/IRR за ставкою дисконту університету.

Приклад вихідних полів, які збиратимемо для розділу 6:

1. Середня тривалість сценаріїв S1/S2/S3 на тиждень (з розкладу).
2. Середня тривалість сценаріїв C1/C2/C3 на тиждень (статистика за військовий час в опалювальний сезон).
3. Фактичні витрати повітря у кожному сценарії та час у free-cooling.
4. Теплові навантаження до/після рекуператора (TE return, TE supply, витрата повітря).
5. Споживання електроенергії вентиляторами (за лічильниками VFD) і насосами.
6. Вартість енергоносіїв (тепло/електроенергія/вода) для НУБіП.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ВІДПОВІДНОСТІ РОЗРАХУНКІВ З ВИМОГАМИ

4.1 Методологія і сценарії експлуатації

Підхід. Моделюємо підвал як добре змішану зону (well-mixed): у межах однієї аудиторії просторові градієнти вважаємо малими порівняно з часовими змінами. Це типова інженерна апроксимація для розрахунків повітрообміну й вологості у громадських будівлях.

Сценарії заповнення (S1/S2/S3/C1/C2/C3). Для числових прикладів беремо репрезентативну зону об'ємом $\sim 300 \text{ м}^3$ і кількістю людей: S1 - 60, S2 - 70, S3 - 80 осіб. Для критичних сценаріїв беремо повний об'єм приміщення $\sim 3100 \text{ м}^3$ і кількості людей: C1 – 250, C2 – 500, C3 – 750 осіб. Ці значення «з запасом» і задають гірший випадок по CO_2 і RH.

Довідкові питомі виділення:

- CO_2 : $0,005 \text{ м}^3/\text{год}$ на особу;
- Волога: $60 \text{ г}/\text{год}$ на особу;
- Тепло: 80 Вт на особу. Діапазони узгоджені з нормами для аудиторій і з практичними вимірюваннями в аналогічних укриттях.

Прийняті припущення для розрахунків:

- Геометрія зони: площа $100 \pm 20 \text{ м}^2$, висота 3 м , отже об'єм $280\text{--}340 \text{ м}^3$ (у прикладах 300 м^3).
- Геометрія зони: площа $1030 \pm 20 \text{ м}^2$, висота 3 м , отже об'єм $3030\text{--}3150 \text{ м}^3$ (у прикладах 3090 м^3).
- Пороги якості повітря: ціль $\text{CO}_2 \leq 1000 \text{ ppm}$ (попереджувальний 1100 , критичний 1400).
- Ціль RH $40\text{--}65\%$ (критично $> 70\%$).

- Температура комфорту: 18–22 °С.
- Зовнішні умови "зима": $T_{\text{ott}} = 0 \text{ °С}$, $RH_{\text{ott}} = 90\%$ (абсолютна вологість $\sim 3,8 \text{ г/м}^3$);
- Зовнішні умови "міжсезоння": $T_{\text{ott}} = 10 \text{ °С}$, $RH_{\text{ott}} = 75\%$ ($\sim 7,2 \text{ г/м}^3$);
- Інфільтрація в підвалі вважається малою порівняно з організованим повітрообміном (але її вплив обговорюємо в аналізі чутливості).

4.2 Повітрообмін за критерієм CO₂

Балансна ідея. Швидкість зміни CO₂ у приміщенні дорівнює сумі «внутрішнього джерела» від людей та розбавлення зовнішнім повітрям. У стаціонарі потрібна витрата повітря \dot{V} така, щоб різниця (CO₂_внутр – CO₂_зовн) не перевищувала допустиму.

Розрахунок G_{CO_2} (м³/год):

- S1: $60 \times 0,005 = 0,30 \text{ м}^3/\text{год}$
- S2: $70 \times 0,005 = 0,35 \text{ м}^3/\text{год}$
- S3: $80 \times 0,005 = 0,40 \text{ м}^3/\text{год}$
- C1: $250 \times 0,005 = 1,25 \text{ м}^3/\text{год}$
- C2: $500 \times 0,005 = 2,5 \text{ м}^3/\text{год}$
- C3: $750 \times 0,005 = 3,75 \text{ м}^3/\text{год}$

Потрібна витрата для цілі 1000 ppm: Різниця до зовнішнього фону 1000–400 = 600 ppm = 0,0006 частки об'єму. Тому $\dot{V} \geq G_{\text{CO}_2} / 0,0006$.

- S1: $V_{S1} = 0,30 / 0,0006 \approx 500 \text{ м}^3/\text{год}$
- S2: $V_{S2} = 0,35 / 0,0006 \approx 583 \text{ м}^3/\text{год}$
- S3: $V_{S3} = 0,40 / 0,0006 \approx 667 \text{ м}^3/\text{год}$
- C1: $V_{C1} = 1,25 / 0,0006 \approx 2083 \text{ м}^3/\text{год}$
- C2: $V_{C2} = 2,5 / 0,0006 \approx 4166 \text{ м}^3/\text{год}$
- C3: $V_{C3} = 3,75 / 0,0006 \approx 6250 \text{ м}^3/\text{год}$

Динамічний вихід на режим. Часова стала

$$\tau = V / \dot{V}. \quad (4.1)$$

Для $V = 300 \text{ м}^3$ і $\dot{V} = 600 \text{ м}^3/\text{год}$, або $V = 3090 \text{ м}^3$ і $\dot{V} = 6250 \text{ м}^3/\text{год}$, отримаємо:

$$\tau \approx 0,5 \text{ год}. \quad (4.2)$$

За одну τ концентрація наближається до цілі приблизно на 63%; за 3τ — на 95%. Це важливо для алгоритмів «продувки» перед заняттям і «післядії» після виходу людей.

Чутливість. Якщо активність вища ($G_{\text{CO}_2} +20\%$), то для S3 треба вже близько - $800 \text{ м}^3/\text{год}$, а для С3 - $7000 \text{ м}^3/\text{год}$, або погоджуємось на 1100 ppm як робочу межу і зменшуємо витрату на 10–15%.

4.3 Осушення/вологість і «вузьке місце» взимку

Баланс вологи. Вологовиділення людей на 300 м^3 без розбавлення дає приріст $12\text{--}16 \text{ г}/\text{м}^3$ за годину (S1...S3), та $50\text{--}150 \text{ г}/\text{м}^3$. За зовнішньої абсолютної вологості $3,5\text{--}4,0 \text{ г}/\text{м}^3$ і цілі $RH \leq 65\%$ ($\approx 11,4 \text{ г}/\text{м}^3$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$) видно, що саме вологість, а не CO_2 , часто стає лімітуючим фактором узимку.

Приклад (S2):

$$G_w = 70 \times 60 = 4200 \text{ г}/\text{год}. \quad (4.3)$$

Стаціонарна

$$w^* = w_{\text{вх}} + (G_w / \dot{V}) / V = 4 + 14 / \dot{V} \text{ (г/м}^3\text{)}. \quad (4.4)$$

Щоб забезпечити $w^* \leq 11,4$, треба $\dot{V} \geq 14 / 7,4 \approx 1900 \text{ м}^3\text{/год}$. Це показує, що довго тримати велику групу без пульсуючих режимів припливу або локального осушення — складно.

Практика. Рішення — комбінувати:

пульсуючий підйом витрати на 10–15 хв під час піків RH;

осушення котушкою з подальшим догрівом до 18–20 °С;

післядія 20–30 хв після виходу людей.

4.4 Теплові баланси і комфорт

Внутрішнє тепло від людей: $70 \times 80 \text{ Вт} \approx 5,6 \text{ кВт}$ (для S2). Навіть за втрат через огороження 2,4 кВт (умовний UA 120 Вт/К при ΔT 20 К) маємо чистий надлишок $\sim 3,2 \text{ кВт}$, а для C2 – $500 \times 80 \text{ Вт} \approx 40 \text{ кВт}$, відповідно надлишок $\sim 37,6 \text{ кВт}$. Отже, у зимових сценаріях вентиляція виконує роль «безкоштовного охолодження» — це узгоджується з вимогою підвищених витрат по волозі.

Керування подачею. Задаємо температуру подачі TE_supply 18–20 °С узимку; у міжсезоння вікно free-cooling ($T_o \sim 12\text{--}18 \text{ °С}$) з байпасом рекуператора.

4.5 Резерв живлення і блекаут-режими

Споживання автоматики без вентиляторів: контролер 3–5 Вт, модем 1–3 Вт, сенсори + комутатор 1–3 Вт \rightarrow 6–13 Вт. АКБ 12 В 20 А·год ($\approx 240 \text{ Вт}\cdot\text{год}$) дає 18–40 год залежно від профілю.

Режими деградації:

- Рівень А — опитування 60 с, MQTT у реальному часі.
- Рівень В — 120–180 с, пакетна передача, легкий дашборд.

- Рівень С — 300 с, лише тривоги (SMS), веб read-only. Перемикання за SOC АКБ 70/40/20%.

4.6 Розміщення сенсорів і валідація

- Не менше **двох-трьох вузлів** CO₂+T+RH у зоні (центр, тиха зона, біля холодної стіни).
- Канальні: TE після рекуператора, TE/RH після охолоджувача, TE подачі.
- dP на фільтрах і рекуператорі; контакт «перелив» у ванні конденсату; поверхневі датчики точки роси на холодних огородженнях.
- Раз на квартал — «обхід еталоном» і корекція зсувів датчиків (паспорт точок).

4.7 Приклади сценаріїв

S1 (60 осіб): 10 хв попередньої продувки $\dot{V} \approx 700$ м³/год → старт 450–500 ppm; через 35–40 хв стабілізація ~900–1000 ppm; RH 55–60%. Післядія 15 хв повертає до 600–700 ppm і RH < 55%.

S2 (70 осіб): без продувки пік 1200–1300 ppm; з продувкою і $\dot{V} \approx 600$ –700 м³/год утримуємо 1000–1100 ppm. RH прагне 65–68% — допомагають пульси припливу й осушення котушкою з reheat.

S3 (80 осіб): для стабільності по RH потрібна середня $\dot{V} \approx 700$ –800 м³/год або локальні осушувачі на період піків. При добовому блекауті лишаємо мінімальний моніторинг (3–5 хв опитування) і SMS-тривоги.

C1 (250 осіб): для стабільності по RH потрібна середня $\dot{V} \approx 2200$ м³/год або локальні осушувачі на період піків. При добовому блекауті лишаємо мінімальний моніторинг (3–5 хв опитування) і SMS-тривоги.

C2 (500 осіб): для стабільності по RH потрібна середня $\dot{V} \approx 4400 \text{ м}^3/\text{год}$ або локальні осушувачі на період піків. При добовому блекауті лишаємо мінімальний моніторинг (3–5 хв опитування) і SMS-тривоги.

C3 (750 осіб): для стабільності по RH потрібна середня $\dot{V} \approx 6600 \text{ м}^3/\text{год}$ або локальні осушувачі на період піків. При добовому блекауті лишаємо мінімальний моніторинг (3–5 хв опитування) і SMS-тривоги.

4.8 Алгоритми керування, узгоджені зі схемою

CO₂ — ведуча змінна: PID → VFD обох вентиляторів (баланс тисків $\pm 5 \text{ Па}$).

RH — при перевищенні 65% спершу збільшуємо повітрообмін; якщо не вистачає — вмикаємо осушення охолоджувачем до точки роси з подальшим догрівом подачі.

T — узимку підтримка 18–20 °C на подачі; в міжсезоння — free-cooling + байпас.

Байпас — відкривається за вікном комфорту зовні або для дефросту (за TE після рекуператора та dP).

Аварії — пожежа/перелив/антифриз виконуються негайно незалежно від інших контурів.

4.9 Тепловий баланс вентиляції та ефект рекуперації для розрахункових витрат повітря. Економічний ефект

Беремо ті ж умови, що вже задані в розділі:

Зовнішні умови “зима”: $T_{out} = 0^\circ\text{C}$.

Температура у приміщенні (витяжне повітря): $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ (в межах комфорту 18–22°C)

Температура подачі в зимовому режимі: $T_{sup} = 20^{\circ}\text{C}$ (як “верхня” межа; для 18°C див. примітку нижче)

Розрахункові витрати повітря (з підпункту про CO_2):

$$V_{S1} = 500 \text{ м}^3/\text{год}, \Rightarrow \eta_t = 0.65$$

$$V_{S2} = 583 \text{ м}^3/\text{год}, \Rightarrow \eta_t = 0.65$$

$$V_{S3} = 667 \text{ м}^3/\text{год}, \Rightarrow \eta_t = 0.65$$

$$V_{C1} = 2083 \text{ м}^3/\text{год}, \Rightarrow \eta_t = 0.57$$

$$V_{C2} = 4166 \text{ м}^3/\text{год}, \Rightarrow \eta_t = 0.52$$

$$V_{C3} = 6250 \text{ м}^3/\text{год}, \Rightarrow \eta_t = 0.49$$

Для рекуператора приймаємо температурний ККД η_t – відповідно до графіків, зазначених наданих до нашого рекуператора, де ККД буде змінюватись, залежно від витрати. Це буде досить точна розрахункова оцінка, для представлення економічності.

4.9.1 Потужність калорифера для звичайної вентиляції (без рекуперації). Теплова потужність на підігрів припливного повітря:

$$Q_{conv} = 0.33 \cdot \dot{V} \cdot \frac{T_{sup} - T_{out}}{1000} \text{ кВт} \quad (4.5)$$

де 0.33 — наближене ρc_p повітря у перерахунку на $\text{м}^3/\text{год}$.

За $T_{sup} = 20^{\circ}\text{C}$ і $T_{out} = 0^{\circ}\text{C}$ маємо $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$.

2) Потужність калорифера для вентиляції з рекуператором

Температура припливу після рекуператора:

$$T_{rec} = T_{out} + \eta_t \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (4.6)$$

За $T_{out} = 0$, $T_{in} = 20$, $\eta_t = 0.65$:

$$T_{rec} = 0 + 0.65 \cdot 20 = 13^\circ C \quad (4.7)$$

Тоді калорифер гріє лише від $13^\circ C$ до $20^\circ C$, тобто $\Delta T = 7^\circ C$:

$$Q_{rec} = 0.33 \cdot \dot{V} \cdot (T_{sup} - T_{rec})/1000 \quad (4.8)$$

Зауваження: якщо $T_{sup} \approx T_{in}$, то

$$Q_{rec} \approx Q_{conv} \cdot (1 - \eta_t) \quad (4.9)$$

тобто економія по теплу на нагрів припливу приблизно дорівнює η_t .

Таблиця 4.1 - Розрахунок економичності режимів роботи системи

Режим (за CO ₂)	V, м ³ /год	Q _{conv} , кВт (без рекуп.)	Q _{rec} , кВт (з рекуп.)	Економія тепла, кВт	Відносна економія
S1	500	3.30	1.16	2.15	~65%
S2	583	3.85	1.35	2.50	~65%
S3	667	4.40	1.54	2.86	~65%
C1	2083	13.75	5.91	7.84	~57%
C2	4166	27.5	13.2	14.3	~52%
C3	6250	41.24	21.03	20.21	~49%

Аналіз таблиці показав, що у всіх трьох режимах економія від рекуператора майже однакова у відсотках (оскільки η_t - стала), але з ростом витрати повітря економія в кВт зростає.

Прийmemo ціну за Гкал теплоти як 3647.82 грн (для “інші споживачі”, з ПДВ).

Тариф і перерахунок у грн/кВт·год тепла - 1 Гкал = 1162,22 кВт·год теплової енергії (стандартний перерахунок).

Отже, вартість 1 кВт·год тепла:

$$C_{heat} = \frac{3647,81}{1162,22} \approx 3,14 \text{ грн/кВт*год} \quad (4.10)$$

Економія на нагріві припливу (для витрат 500/583/667 м³/год). З попередньої таблиці теплових потужностей (зима, $T_{out} = 0^\circ C$, $T_{sup} = 20^\circ C$, $\eta_t = 0.65$) економія потужності калорифера:

$$S1 (500 \text{ м}^3/\text{год}): \Delta Q \approx 2,145 \text{ кВт}$$

$$S2 (583 \text{ м}^3/\text{год}): \Delta Q \approx 2,501 \text{ кВт}$$

$$S3 (667 \text{ м}^3/\text{год}): \Delta Q \approx 2,861 \text{ кВт}$$

$$C1 (2083 \text{ м}^3/\text{год}): \Delta Q \approx 7,84 \text{ кВт}$$

$$C2 (4166 \text{ м}^3/\text{год}): \Delta Q \approx 14,3 \text{ кВт}$$

$$C3 (6250 \text{ м}^3/\text{год}): \Delta Q \approx 20,21 \text{ кВт}$$

Грошова економія за 1 годину роботи:

$$\Delta C_{1h} = \Delta Q \cdot c_{heat}. \quad (4.11)$$

Отримуємо (також враховуємо що загальна площа приміщення не 100 м², як в прикладі, а 1030 м² – тож врахуємо це для розрахунку повної економії приміщення):

- S1: $2,145 \cdot 3,14 \approx 6,73 \text{ грн/год} \Rightarrow 6,73 \cdot 10 = 67,3 \text{ грн/год}$
- S2: $2,501 \cdot 3,14 \approx 7,85 \text{ грн/год} \Rightarrow 7,85 \cdot 10 = 78,5 \text{ грн/год}$
- S3: $2,861 \cdot 3,14 \approx 8,98 \text{ грн/год} \Rightarrow 8,98 \cdot 10 = 89,8 \text{ грн/год}$
- C1: $7,84 \cdot 3,14 \approx 24,62 \text{ грн/год} \Rightarrow 24,62 \cdot 10 = 246,2 \text{ грн/год}$
- C2: $14,3 \cdot 3,14 \approx 44,9 \text{ грн/год} \Rightarrow 44,9 \cdot 10 = 449 \text{ грн/год}$
- C3: $20,21 \cdot 3,14 \approx 63,46 \text{ грн/год} \Rightarrow 63,46 \cdot 10 = 634,6 \text{ грн/год}$

Щоб мати “презентаційні” числа, беру типовий місяць активного використання: 176 год/міс (22 робочі дні × 8 год).

Кількість годин, взятих за роботу в критичних режимах, будемо брати на основі статистики взятої з відкритих джерел, що до статистики кількості годин з тривогами в місті Києв за опалювальний сезон – 537 годин.

Таблиця 4.2 - Підсумок економічного ефекту за сезон/місяць

Режим	Економія, грн/год	Економія, грн/міс (S - 176 год) (C - 89.5 год)	Економія, грн/сезон (S - 6×176 год) (C - 6×89.5 год)
S1 (500 м³/год)	~67,3	~11 850	~71 095
S2 (583 м³/год)	~78,5	~13 820	~82 895
S3 (667 м³/год)	~89,8	~15 810	~94 840
C1 (2083 м³/год)	~246,2	~22 034	~132 204
C2 (4166 м³/год)	~449	~40 185	~241 110
C3 (6250 м³/год)	~634,6	~56 797	~340 782

Візьмемо за режим для подальших розрахунків середній режим навантаження S2 – будемо вважати його сезонною економією 82895 гривень.

Також врахуємо накладання критичних годин роботи на робочі години корпусу. Загалом опалювальний сезон \approx 4320 годин. Таким чином кількість тривоги, відносно загальної кількості годин:

$$K = \frac{537}{4320} = 0.124 \quad (4.12)$$

Врахуємо статистичне накладання годин по коефіцієнту (4.12) на години в нормальному режимі роботи з урахуванням погодинної економічного ефекту (E) відповідних режимів:

$$\begin{aligned}
 E_{S2} \times 1056 \times (1 - K) + 1056 \times K \times E_{C2} = \\
 78,5 \times 1056 \times (1 - 0.124) + 1056 \times 0.124 \times 449 = \quad (4.13) \\
 131\,410.75 \text{ грн/сезон}
 \end{aligned}$$

4.10 Проміжні висновки

- Для зони 300 м³ і заповнення 60–80 осіб потрібна витрата 500–700 (до 800) м³/год з урахуванням цілі по СО₂.
- По вологості взимку вимоги жорсткіші — доцільно застосовувати пульсуючі режими припливу та осушення з reheat.
- Взимку «внутрішнє тепло» людей робить вентиляцію ефективним «безкоштовним охолодженням».
- Автономність моніторингу на АКБ 12 В 20 А·год — доба і більше в економному профілі.
- Запропоноване розміщення сенсорів і щоквартальна валідація роблять дані придатними для управлінських рішень і економрозрахунків у фінальному розділі.

4.11 Принцип роботи пластинчастого рекуператора та байпас

Рекуператор — це теплообмінник, у якому тепловий потік передається від витяжного (теплішого) потоку повітря до припливного (холоднішого) без їх змішування. У нашому проєкті використовується пластинчастий перехресно-потоківий теплообмінник (перегородки з алюмінію або полімеру), що забезпечує простоту, відсутність рухомих частин та нульову ймовірність перетікання запахів/аерозолів між потоками. За рахунок збільшеної площі пластин і організації зустрічних каналів коефіцієнт тепловіддачі залишається високим навіть за малих швидкостей повітря, що важливо для режимів нічного або укріттевого мінімуму.

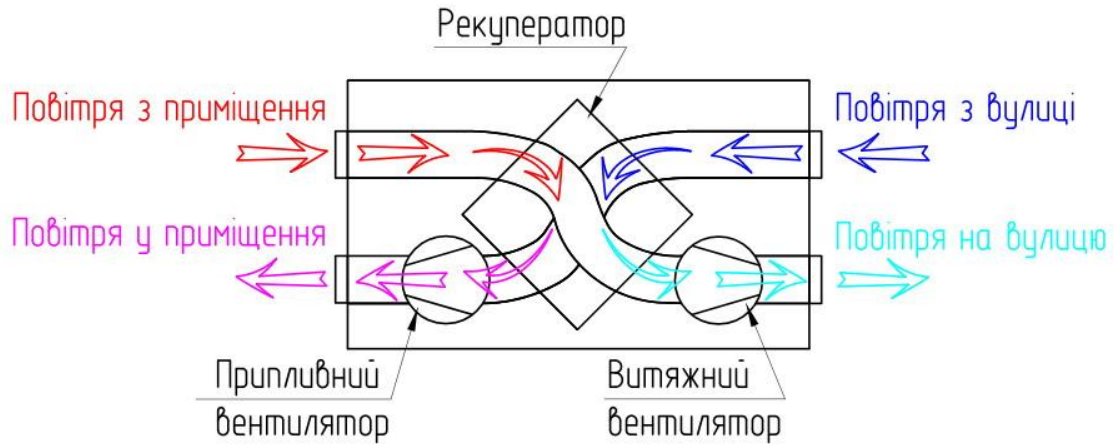


Рис. 4.1. Принцип роботи вентиляції з рекуператором

Енергетичний сенс: ми повертаємо частину ентальпії з витяжного повітря, зменшуючи навантаження на водяний нагрівач узимку і на водяний охолоджувач у перехідні періоди. Для кількісної оцінки зручно вводити:

Температурний ККД (η_t):

$$\eta_t = \frac{T_{\text{припл,після рек}} - T_{\text{зовн}}}{T_{\text{витяж}} - T_{\text{зовн}}} \cdot 100\%. \quad (4.14)$$

де $T_{\text{припл,після рек}}$ — температура припливного повітря після рекуператора, $T_{\text{зовн}}$ — зовнішня температура, $T_{\text{витяж}}$ — температура витяжного. Типові значення для якісного пластинчастого теплообмінника — 60–80 %.

Ентальпійний ККД (η_h), якщо застосовано ентальпійні мембрани з частковою передачею вологи:

$$\eta_h = \frac{h_{\text{припл,після рек}} - h_{\text{зовн}}}{h_{\text{витяж}} - h_{\text{зовн}}} \cdot 100\%, \quad (4.15)$$

де h — питомі ентальпії повітря; показник важливий для зимового осушення/зволоження.

Гідравлічні зони та потоки. Витяжний канал подає тепле вологе повітря з укриття в теплообмінник; припливний канал протитечією бере холодніше зовнішнє повітря. Завдяки ламінаризації каналів та турбулізаторам на пластинах зменшуються локальні теплові опори. Жодного контакту між потоками немає — лише теплопровідність крізь пластини.

Байпас рекуператора. У міжсезоння або влітку, коли догрів припливу не потрібен (а іноді навіть шкідливий), відкривається повітряний байпас: припливний потік минає теплообмінник через байпасну заслінку. Це зменшує аеродинамічний опір (вищий ККД вентиляторів) і запобігає перегріву припливу.

Антифрост-захист. За низьких зовнішніх температур на витяжному боці можлива кристалізація вологи. Типові стратегії: (а) імпульсне зниження витрати припливу (дефрост), (б) часткове прикриття байпасу для підвищення температури на пластинах, (в) догрів невеликим теплообмінником upstream. Ми приймаємо комбінований підхід: дефрост за ΔP на рекуператорі + догрів від водяного нагрівача у критичних точках.

Баланс повітря. Для запобігання підсмоктуванню запахів із санвузлів витяжний вентилятор тримаємо на 5–10 % продуктивнішим за припливний у звичайних режимах; під час тривалого перебування людей (сценарії S1/S2/S3/C1/C2/C3) приплив і витяжку вирівнюємо, орієнтуючись на CO₂.

РОЗДІЛ 5

НАДІЙНІСТЬ, БЕЗПЕКА Й ЕКСПЛУАТАЦІЯ

5.1 Загальна архітектура надійності

Принципи:

- Fail-safe: кожен критичний виконавчий орган має безпечну позицію при знеструмленні (закриті пожежні заслінки, байпас у безпечному положенні, клапани з пружинним поверненням).
- Fail-operational (частково): моніторинг продовжує роботу від АКБ навіть за відключення мережі; мінімальні алгоритми аварій зберігаються у PLC.
- Degraded-mode: визначені «щаблі» деградації функцій (повноцінний → економний → мінімальний), які автоматично вмикаються за SOC АКБ/втратою каналів зв'язку.

Ієрархія керування:

1. PLC (S7-1200/Modicon M241/251) — жорстка логіка реального часу: PID T/RH, антифриз, дефрост, пожежні інтерлоки.
2. Edge-шлюз (індустріальний ПК/Raspberry Pi) — візуалізація, MQTT, буфер журналів, аналітика.
3. Хмара/сервер університету — довготривале зберігання, звіти, бекапи конфігурацій.

Резервування/надмірність:

- Живлення: окрема лінія з АВР (мережа/UPS/генератор), окремий БЖ для PLC та модему; АКБ на 24–36 год моніторингу.
- Дані: кільцевий лог — у PLC (критичні події), на шлюзі (14 діб), у «хмарі» (1 рік+).
- Комунікації: MQTT через LTE + резервний Wi-Fi/ethernet до локальної мережі корпусу (коли доступно).

Показники надійності (орієнтовно):

- MTBF вузлів класу PLC/датчиків CO₂ промислових — 50–100 тис. год; вентилятори з підшипниками — 30–60 тис. год (за паспортом).
- MTTR (типові): фільтр — 10 хв; датчик — 20–40 хв; привід заслінки — 60–90 хв; насос — 2–4 год.
- Ціль SLA для моніторингу: $\geq 99\%$ часу доступності в навчальний період.

5.2 Функціональна безпека та пожежні інтерлоки

Інтерфейси з протипожежною системою. Сигнали «Пожежа», «Дим» — жорсткі входи PLC/шафи. Логіка:

- негайне припинення роботи вентиляторів (або перехід у заданий димовий режим за проектом ПБ);
- закриття пожежних клапанів у каналах;
- клапани теплоносія — у безпечну позицію (закриття/ відсічення теплоносія);
- на дашборді — червоний банер, SMS/дзвінок черговому.

Антифриз і дефрост. На виході водяної котушки — термостат «мінімум» (апаратний) + програмний контроль TE після рекуператора. При ризику замерзання:

1. Відчиняється байпас.
2. Вентилятори знижують витрату.
3. 3-ходовий клапан нагрівача відкривається на 100% тепло.
4. У разі необхідності — стоп притоку до стабілізації.

Конденсат. Контакт «перелив» у ванні охолоджувача → негайний стоп осушення, повідомлення, перевірка сифона.

5.3 Електробезпека та живлення в умовах блекаутів

- Заземлення й зрівнювання потенціалів для шафи, рекуператора, насосів, VFD.
- UPS для автоматики (контролер+модем+комутатор) з байпасом та віддаленим моніторингом SOC.
- АВР (ввід-резерв) між мережею та генератором за наявності.
- Селективність захистів: автомати на вентилятори/насоси окремо, окрема лінія на PLC; РКУ на обслуговуваних розетках.
- EMC: фільтри/дроселі на VFD, екранировані сигнальні кабелі, гальванічна розв'язка 4–20 мА/RS-485.
Профілі роботи при відключенні.
- 0–2 год: повний режим моніторингу, щільне опитування (60 с).
- 2–12 год: економний (120–180 с), графіки зниженої частоти, критичні події в realtime.
- 12–36 год: мінімальний (300 с), збереження журналів локально, SMS-ескалація.

5.4 Кібербезпека ОТ/ІТ

Сегментація мереж: окремий VLAN для автоматики; доступ з ІТ-мережі лише через VPN.

Шифрування та автентифікація: TLS для MQTT/HTTPS; облікові записи з MFA для адміністраторів.

Ролі й політики: «оператор», «адміністратор», «сервіс» з мінімально необхідними правами.

Журнали/аудит: системні події, авторизації, зміни у PID-налаштуваннях — зберігати 1 рік.

Бекапи: тижневі бекапи проекту PLC та конфігів шлюзу; офлайн-копія в сейфі кафедри.

Оновлення: вікно оновлень ПЗ поза парами; політика «спочатку стенд — потім продакшн».

5.5 Сенсори: якість, калібрування та розміщення

Типи: CO₂ — NDIR промислові з автокорекцією ABC (вимикаємо ABC, якщо зона постійно зайнята); RH — емнісні з корекцією температури; T — Pt1000 або термістори з каліброваними входами; t-surf — контактні датчики на холодних стінах.

Розміщення: по 2–3 вузли CO₂+T+RH на зал, висота 1,1–1,5 м; каналні TE/RH після котушок; TE перед подачею; dP на фільтрах/рекуператорі.

Калібрування: раз на 6–12 міс. (CO₂ — за еталонним газом/вентиляцією; RH — сольові еталони; T — порівняння з еталонним Pt100). Паспорт точки вимірювання: ID, місце, дата, відхилення, коефіцієнти.

5.6 Техобслуговування та життєвий цикл

План ТО (мінімальний рекомендований):

- Щодня/перед заняттями: візуальна перевірка дашборду; тривоги; огляд дренажу; відсутність незвичних шумів.
- Щотижня: огляд фільтрів (dP), конденсату, запис показників енергії; тест кнопки аварійної зупинки.
- Щомісяця: очистка датчиків (пил), перевірка приводів заслінок, тест аварійних сценаріїв (перелив/антифриз у «сухому» режимі).
- Щокварталу: «обхід еталоном» по сенсорах; перевірка сифонів; змащення/огляд вентиляторів/насосів.

- Щопівроку: заміна фільтрів (або за dP), ревізія кріплень, бекап проєктів PLC/шлюзу.
- Щороку: повний акт ПНР-2 — вимір ККД рекуператора, калібрування, ревізія електрики, навчання персоналу.

ЗНЗ (запасні частини): фільтри (комплект ×2), реміні/муфти, датчик CO₂, RH/T, привід заслінки, клапан 3-ходовий комплект ущільнень, насос (1 шт. на 2 контури), модем LTE, БЖ 24 В, запобіжники.

5.7 Операційні процедури (SOP) для персоналу

SOP-01. Запуск перед заняттями.

1. Перевірити «зелений» статус дашборду.
2. Увімкнути режим продувки 10–15 хв (\dot{V} підвищена).
3. Перейти в автоматичний режим по CO₂/RH.

SOP-02. Вихід групи.

1. Тримати післядію 15–30 хв (осушення/розбавлення).
2. Переконатися, що CO₂ < 700 ppm, RH < 60%.

SOP-03. Блекаут.

1. PLC автоматично переходить в рівень В/С; зберігаємо мінімальний моніторинг.
2. Оператор перевіряє стан АКБ (SOC) і фіксує час події в журналі.

SOP-04. «Перелив» конденсату.

1. Автоматика зупиняє осушення;
2. перевірити сифон/злив;
3. після усунення — контрольний запуск.

SOP-05. Пожежна тривога.

1. Система виконує сценарій ПБ;
2. оператор підтверджує подію, інформує відповідальних;

3. після дозволу — поступовий запуск із перевітками.

5.8 Реєстр ризиків і FMEA (узагальнено)

Типові відмови та дії:

- Забитий фільтр → зростання dP, падіння витрати → сигнал попередження → заміна фільтра, перевірка ущільнень.
- Обмерзання рекуператора → TE низька + dP зростає → дефрост: байпас/баланс витрат/підвищення тепла → чистка пластин.
- Відмова датчика CO₂ → розбіжність між точками/діагностика → перехід у витратний режим за розкладом до заміни.
- Зависання модему/LTE → watchdog перезапуск → альтернативний канал (Wi-Fi/ethernet) → сервіс.
- Аварія насоса охолоджувача → RH росте → автоматика обмежує оссурансу/збільшує приплив → заміна насоса.
- Витік конденсату → контакт «перелив» → стоп осушення, усунення причини, тест.

Оцінка впливу (словесно): найбільший вплив на навчальний процес мають вологість/конденсація (ризик плісняви, слизькі підлоги) та втрата повітрообміну при великій заповнюваності (CO₂>1400 ppm). Мітигації вже закладено: пульсуючі режими, сигналізації, запасні витрати, регламент ТО.

5.9 Вимоги до документування та навчання

Паспорти точок (сенсори, приводи, клапани) з фото-орієнтирами.

Схеми з'єднань (електрика/мережі/гідравліка), актуальні версії у репозиторії кафедри.

Журнали: інциденти, ТО, калібрування, зміни в налаштуваннях, енергозвіти.

Навчання персоналу: щорічний тренінг 2–3 год (сценарії, SOP, безпека).

5.10 Відповідність нормам і політики якості

Система проектується з урахуванням чинних вимог щодо вентиляції, пожежної безпеки, електробезпеки, охорони праці, внутрішніх регламентів НУБіП. На етапі робочого проекту уточнюються посилання на відповідні ДБН/ДСН/ДСТУ та локальні інструкції ДСНС/енергетичної служби університету. Для забезпечення постійної відповідності запроваджується внутрішній аудит якості (щорічно) з актом виконаних робіт і планом поліпшень.

Запропоновані конструктивні заходи, алгоритми й експлуатаційні регламенти гарантують, що система залишається керованою, безпечною і ремонтпридатною у штатних і позаштатних умовах. Це створює основу для обґрунтованих економічних розрахунків у наступному розділі.

РОЗДІЛ 6

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ

6.1 Методика та вихідні припущення

Фінансова методика. Використовуємо: PP (Payback Period) — простий термін окупності; NPV (Net Present Value); LCC (Life-Cycle Cost) — сукупна вартість володіння.

Основні припущення (для прикладів):

- Базова зона: $V \approx 300$ м³, розрахункова витрата повітря 600–800 м³/год.
- Тарифи (актуальні для НУБіП станом на 2025 р.): електроенергія близько 6,0 грн за кВт·год, тепла енергія близько 2698 грн за Гкал (приблизно 3,14 грн за кВт·год теплоти).
- Дисконтування: ставка $r = 12\%$ річних (внутрішній норматив університету).
- Індекс інфляції/зростання тарифів не враховуємо в базовому сценарії (окремо в чутливості аналізі).

Примітка: всі числа наведено з урахуванням отриманих фактичних даних (комерційних пропозицій) та актуальних тарифів НУБіП.

6.2 Структура витрат (CAPEX та OPEX)

CAPEX (на одну установку з обслуговуванням підвального блоку аудиторій):

1. Припливно-витяжна установка з пластинчастим рекуператором, байпасом, двома вентиляторами, секціями фільтрів — А1 тис. грн.
2. Водяні котушки (охолоджувач + нагрівач) з краплевловлювачем, гідравліка (насоси, клапани, теплообмінник з гліколем) — А2 тис. грн.
3. Автоматика: PLC середнього рівня (S7-1200 або Modicon M241/251), шафа, VFD ×2, сенсори CO₂/T/RH, TE/UE/TS, dP, поверхневі датчики, аварійні контакти — А3 тис. грн.

4. Диспетчеризація/зв'язок: edge-шлюз, модем LTE, маршрутизатор, ліцензії ПЗ/сервер — А4 тис. грн.
 5. Монтажні роботи, матеріали, пусконаладження, проєкт/експертиза, навчання персоналу — А5 тис. грн.
 6. Резерв/непередбачені витрати (5–10%) — А6 тис. грн.
- Разом:

$$\text{CAPEX} = A = A1+A2+A3+A4+A5+A6. \quad (6.1)$$

Таблиця 6.1 - Кошторис на впровадження системи

№	Найменування	Модель/тип	К-сть	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Рекуператор пластинчастий прямокутний	VENTS PR 800×500	1	72 573	72 573
2	Нагрівач водяний (калорифер)	VENTS НКВ 800×500-3	1	25 397	25 397
3	Охолоджувач водяний каналний	VENTS ОКВ 800×500-3	1	59 973	59 973
4	Вентилятор припливний (для квадратних каналів)	Systemair MUB 042 500E4	1	117 900	117 900
5	Вентилятор витяжний прямокутний	Salda VKS 800×500-4 L3	1	69 927	69 927
6	Клапан/заслінка прямокутна	VENTS КР 800×500	3	4 140	12 420
7	Електропривід заслінки 24В, 5 Н·м	Belimo LM24A	3	7 547	22 641
8	Датчик CO ₂ настінний з Modbus (для DCV)	SM-500.S8 (RS485/Modbus)	3	6 579	19 737
9	Датчик перепаду тиску (контроль фільтрів/каналу)	Belimo 01APS-104	2	1 508	3 016
10	Датчик температури каналний (Pt1000)	TeS-A12-Pt1000	2	1 335	2 670
11	Частотний перетворювач 0,75 кВт, 3×380В	CHINT NVF5-0.75/TS4-B	2	11 810	23 620
12	PLC (контролер керування установкою)	Siemens S7-1200 CPU 1212C	1	15 981	15 981
13	Пластинчастий теплообмінник (для гідравлічного контуру/розв'язки)	Теплообмінник 20 пластин	1	13 939	13 939
14	Насос циркуляційний (гідравлічний контур)	Grundfos ALPHA1 L 25-60	1	7 995	7 995

Продовження таблиці 6.1

15	Триходовий клапан DN25 (регулювання теплоносія)	Belimo/серія R3025 (DN25)	1	5 456	5 456
16	Повітроводи оцинк. 0,7 мм (матеріал, м ²)	орієнтир 1130 грн/м ²	40	1 130	45 200
17	Теплоізоляція (каучук/самоклейка), м ²	орієнтир 384 грн/м ²	40	384	15 360
18	Гнучкий повітропровід, 1 м	Вентс Алювент Н 160/1	10	191	1910
19	Монтажні роботи та пусконаладження (мінімальні розцінки по позиціях)	монтаж ПВУ/вентиляторів/автоматики/ПЧ тощо	1	36 700	36 700
20	Інжиніринг/налаштування/випробування (одноразово)	комплект робіт	1	10 000	10 000

Підсумок: CAPEX₀ = 602 214 грн.

Резерв на непередбачені витрати 10% (логістика, кріплення/фасонні частини, дрібна електрика, витратні матеріали, доукомплектація):

$$\text{CAPEX}_{\text{res}} = 0,10 \cdot \text{CAPEX}_0 = 60\,221 \text{ грн.} \quad (6.2)$$

Разом капітальні витрати:

$$\text{CAPEX} = \text{CAPEX}_0 + \text{CAPEX}_{\text{res}} = 662\,435 \text{ грн.} \quad (6.3)$$

OPEX (річний): електроенергія вентиляторів і насосів (з урахуванням VFD та режимів CO2/RH); тепла енергія на догрів і re-heat, холод/осушення; фільтри, гліколь, сервіс і калібрування; канали зв'язку, ПЗ, UPS/АКБ.

6.3 Енергетичний ефект: з чого складається економія

6.3.1 Економія теплоти від рекуперації. Рекуператор повертає частину теплоти витяжного повітря у припливне, зменшуючи потребу в догріві калорифером. Для узгодження з розділом 4 економію визначаємо через зменшення теплової потужності калорифера ΔQ у режимі S2 з накладаннями критичних режимів C2. Грошова економія за 6 місяців (розраховані в формулі 4.13):

$$S_{6m} = 131\,410.75 \text{ грн} \quad (6.8)$$

Або в середньому за місяць (у ці 6 “активних” місяців):

$$S_{month} = \frac{S_{6m}}{6} \approx 21\,910.79 \frac{\text{грн}}{\text{міс}} \quad (6.9)$$

6.3.2 Економія електроенергії від DCV (керування за CO₂). Для вентиляторів діє наближення: споживана потужність $\sim (\dot{V}/\dot{V}_{nom})^3$.

При середній витраті 0,7 від номінальної:

$$kP = 0,7^3 = 0,343 \quad (6.10)$$

Тобто споживання зменшується приблизно на:

$$1 - 0,343 = 0,657 (\approx 65,7\%) \quad (6.11)$$

Приймаємо сумарну електропотужність двох вентиляторів у номіналі:

$$P = 1,5 \text{ кВт} \quad (6.12)$$

Час роботи за рік:

$$t = 3600 \text{ год/рік} \quad (6.13)$$

Без DCV:

$$E_0 = 1,5 \cdot 3600 = 5400 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік} \quad (6.14)$$

З DCV:

$$E_1 = 0,343 \cdot 5400 = 1852 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік} \quad (6.15)$$

Економія:

$$\Delta E = 5400 - 1852 = 3548 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік} \quad (6.16)$$

Грошовий ефект (електроенергія $C_e = 6,0$ грн/кВт·год):

$$S_{DCV} = 3548 \cdot 6,0 = 21\,288 \approx 21\,300 \text{ грн/рік} \quad (6.17)$$

6.3.3 Free-cooling через байпас. Для консервативної оцінки приймаємо:

$$S \approx 2\,000 \text{ грн/рік} \quad (6.18)$$

6.3.4 Додаткові витрати (насос і сервіс). Електроспоживання насоса (оцінка):

$$P = 0,1 \text{ кВт} \quad (6.19)$$

$$E = 0,1 \cdot 3600 = 360 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (6.20)$$

$$C = 360 \cdot 6,0 = 2\,160 \text{ грн/рік} \quad (6.21)$$

Регламентний сервіс і витратні матеріали (фільтри, огляд, чистка):

$$C \approx 8\,000 \text{ грн/рік} \quad (6.22)$$

6.4 Розрахунок строку окупності

Річний сумарний економічний ефект:

$$S = S_{\text{rec}} + S_{\text{DCV}} + S_{\text{free}} - C_{\text{pump}} - C_{\text{serv}} \quad (6.23)$$

Підстановка:

$$S = 131\,411 + 21\,300 + 2\,000 - 2\,160 - 8\,000 \quad (6.24)$$

$$S = 144\,551 \text{ грн/рік} \quad (6.25)$$

Простий строк окупності:

$$PP = CAPEX / S \quad (6.26)$$

При CAPEX = 662 435 грн:

$$PP = 662\,435 / 144\,551 = 4,6 \text{ року} \quad (6.27)$$

6.5 Нефінансові вигоди

Покращення якості навчання ($\text{CO}_2 < 1000 \text{ ppm}$), захист конструкцій ($\text{RH} < 65\%$), аварійна готовність (блекаут-режими), аналітика й звітність для грантів.

6.6 Фінансування та закупівлі

Бюджет університету; гранти/донори; спонсори. Закупівлі: прозорий тендер з 2–3 пропозиціями; гарантія 24 міс., ЗП, протоколи випробувань, паспорти датчиків.

6.7 План впровадження (roadmap)

Етап 0: підготовка (2–4 тижні). Етап 1: закупівлі (4–6 тижнів). Етап 2: монтаж (4–8 тижнів). Етап 3: ПНР (2–3 тижні). Етап 4: експлуатаційна перевірка (4 тижні). Етап 5: передача на баланс.

6.8 KPI та M&V

Часи в межах порогів (CO_2 , RH), енергоінтенсивність, середня ефективність рекуператора, аптайм моніторингу, витрати на ТО. Метод M&V — порівняння до/після з нормалізацією по погоді та навантаженню.

6.9 Екологічний аспект

Переклад енергозбереження у скорочення CO_2 -еквіваленту за офіційними коефіцієнтами викидів для електрики і тепла. Корисно для грантів і ESG-звітності.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розроблено та обґрунтовано систему дистанційного моніторингу показників теплоспоживання і мікроклімату укриття (підвального поверху) навчального корпусу НУБіП України з урахуванням реалій воєнного стану — частих повітряних тривог, нерівномірної заповнюваності приміщень та періодичних відключень електроенергії. На основі аналітичного огляду, порівняння технічних рішень і власних розрахунків сформовано цілісну архітектуру, яка поєднує рекупераційну вентиляцію з байпасом, керування за $\text{CO}_2/\text{RH}/\text{T}$, водяний охолоджувач для осушення та водяний нагрівач для догріву, а також надійний контур автоматизації на базі PLC середнього класу з дистанційною візуалізацією і журналюванням.

1. Розроблено логічно завершену систему, здатну в режимі реального часу забезпечувати нормативну якість повітря (ціль $\text{CO}_2 \leq 1000$ ppm, RH 40–65%, T 18–22 °C) в підвальних аудиторіях з нерівномірним добовим і тижневим навантаженням. Запропоновані алгоритми керування (ведучий контур CO_2 , допоміжні RH і T, економайзер/байпас, дефрост і антифриз-захист) узгоджені зі схемою вентиляційної установки і забезпечують передбачувану роботу в усіх сценаріях S1/S2/S3/C1/C2/C3.

2. Для репрезентативного приміщення об'ємом ≈ 300 м³ доведено, що для досягнення цілей по CO_2 необхідні витрати припливного повітря ≈ 500 –700 (до 800) м³/год залежно від заповнюваності; при цьому вологість узимку часто стає лімітуючим фактором, що обґрунтовує включення водяної котушки-осушувача з reheat і пульсуючих режимів повітрообміну. Рекомендовано пластинчастий рекуператор (η_t 60–75%) з герметичним байпасом, VFD на обох вентиляторах, фільтри класу ePM1/ePM10 із dP-контролем, а також розширений комплект сенсорів (зональні $\text{CO}_2+\text{T}+\text{RH}$, каналні TE/RH, TE після рекуператора і на подачі, dP на фільтрах/рекуператорі, контакт «перелив»).

3. Проведено градацію від Arduino/одноплатних ПК (доцільні лише для лабораторних макетів і візуалізації) до PLC середнього рівня (Siemens S7-1200 або Schneider Modicon M241/M251), які мають належну EMC-стійкість, апаратний watchdog, промислові інтерфейси (RS-485/Ethernet, Modbus RTU/TCP), готові ПД-блоки та підтримують суворі аварійні інтерлоки (пожежа, антифриз, перелив). Рекомендовано виділене UPS-живлення автоматики й edge-шлюз для MQTT/графіки з локальним буфером журналів на випадок блекаутів.

4. Рекуперація повертає істотну частку теплоти витяжного повітря в зимово-міжсезонний період; керування за CO₂ (DCV) і «free-cooling» через байпас знижують електроспоживання вентиляторів і потребу в механічному холоді. Ілюстративні розрахунки підтвердили, що для одного приміщення ефект відчутний, але справжня економіка розкривається на рівні блоку аудиторій, де спільні секції і масштаби зменшують CAPEX на зону. Для реалістичних тарифів і інтенсивного використання очікуваний термін окупності становить ~5–7 років (за консервативних тарифів — довше), при цьому слід враховувати неенергетичні вигоди: зниження ризиків конденсації та плісняви, продовження ресурсу конструкцій і помітне підвищення якості навчального процесу.

5. Запропоновано fail-safe/operational архітектуру: безпечні позиції виконавців, деградовані режими моніторингу за низького SOC АКБ, жорсткі пожежні інтерлоки, антифриз-захист котушок, контроль переливу конденсату, сегментацію мереж OT/IT, VPN/TLS, рольову модель доступу, регулярні бекапи конфігурацій. Сформовано практичні SOP-процедури для персоналу та план ТО із чіткими інтервалами і переліком ЗІП.

6. Складено покроковий roadmap: від робочого проєкту й закупівель до ПНР-1/ПНР-2 з валідацією моделей та підбором порогів керування. Визначено KPI/M&V (часи в межах CO₂/RH, енергоінтенсивність, ефективність рекуперації, аптайм моніторингу), що робить досягнутий ефект вимірюваним і придатним до періодичного аудиту якості.

7. Робота поєднує для умов укриття навчального закладу: (а) енергозберігаючу вентиляційну схему з рекуперацією, осушенням і байпасом; (б) контури керування, «заточені» під динамічну зміну наповнення (S1/S2/S3/C1/C2/C3) і вимоги до CO₂/RH у тісному підвальному просторі; (в) блекаут-стратегії з довготривалим буферним журналюванням і ступенями деградації функцій; (г) прозорі економічні метрики із чутливим аналізом. Така інтеграція безпосередньо адресує поточні виклики освітньої інфраструктури України.

8. Ілюстративні розрахунки виконані для репрезентативної зони та типових тарифів; для фінального кошторису потрібні комерційні пропозиції, фактичні години використання і кліматичні дані кампусу. Перспективними є: (1) польове калібрування ПД-контурів під реальні тепловологісні інерції підвалу; (2) автоматична оптимізація параметрів DCV за історією CO₂; (3) інтеграція «heat-recovery» з тепловим насосом для зменшення залежності від зовнішніх джерел тепла; (4) порівняння продуктивності різних датчиків CO₂ у запиленому середовищі підвалу; (5) оцінка впливу поліпшеної якості повітря на когнітивні показники студентів як додатковий нефінансовий КРІ.

Запропонована система є технічно здійсненою, енергетично виправданою і експлуатаційно стійкою до умов воєнного часу. Вона підвищує безпеку перебування в укритті, покращує якість навчального процесу й створює кероване середовище з прозорою економікою і зрозумілими правилами обслуговування. Впровадження на рівні підвального блоку аудиторій із подальшою масштабізацією на весь корпус є логічним і стратегічно доцільним кроком для університету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Офіц. вид.
2. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Чинний з 01.11.2023.
3. ДБН В.2.2-5:2023. Інформматеріали МІУ щодо набуття чинності (презентац.).
4. ДСанПіН / Санітарний регламент для закладів загальної середньої освіти (МОЗ/МОН).
5. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні.
6. EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings — Ventilation for buildings — Indoor environmental input parameters.
7. prEN 15251 (draft). Indoor environmental input parameters... (попередня версія).
8. EN 308:2022. Heat exchangers — Test procedures (витяги/огляд).
9. Eurovent REC 17-14 (2025). Moisture recovery in ventilation and air-conditioning systems.
10. ANSI/ASHRAE 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (повний стандарт/аддендум).
11. Trane ENL (2021). ASHRAE 62.1-2019 — огляд ключових змін.
12. Bhatia A. HVAC — Guide to Demand Control Ventilation (техн. курс/пояснення DCV).
13. Siemens (Sitrain). Demand-controlled ventilation (брошура).
14. BB101 (UK Schools) Technical Guide (2018): Ventilation in schools, DCV-підхід.
15. Coley D.A., Beisteiner A. Carbon Dioxide Levels and Ventilation Rates in Schools.
16. Satish U. et al. (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects... (EHP).

17. Allen J.G. et al. (2015). Associations of Cognitive Function Scores with CO₂, Ventilation, VOC (EHP/Harvard COGfx).
18. NASA JSC (2016). Effects of Acute Exposures to Carbon Dioxide upon Cognitive Performance.
19. Zhang X. et al. (2015). Effects of Exposure to CO₂ and Human Bioeffluents on Performance.
20. Fan Y. et al. (2023). Short-term exposure to indoor CO₂ and cognitive performance (Building and Environment).
21. Laurent J.G.C. et al. (2021). Associations between acute indoor PM_{2.5}/CO₂ and cognition.
22. Systematic review/meta-analysis (2023): Short-term CO₂ and cognitive tasks.
23. The COGfx Study (2021) — інфографіка результатів (Harvard/Carrier).
24. Siemens. SIMATIC S7-1200 System Manual (EN/RU), технічні дані PLC, безпека, інтерфейси.
25. Schneider Electric. Modicon M241 — Programming Guide (різні редакції).
26. Vaisala. GMW90 Series CO₂/T/RH Transmitters — User's Guide / Quick Guides (Modbus/BACnet).
27. Heatex. Plate Heat Exchangers — Technical Information (примітки щодо EN 308).
28. Zern Engineering (2022). Heat exchangers catalogue (ентальпійні/перехресноточні).
29. Держпродспоживслужба (методичні матеріали): температурні режими та мікроклімат у навчальних приміщеннях.
30. ASHRAE — Read-Only portal стандартів (для перевірки редакцій 62.1).