

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



10 червня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»
на тему: Енергоефективний модульний будинок з автономними системами
життєзабезпечення

Виконав: студент групи 4341



(підпис) **Мельниченко Д.О.**

Керівник роботи:

зав. каф. КСУ, д.т.н., проф.



(підпис) **Черно О.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ННІ	автоматики та електротехніки
Кафедра	комп'ютеризованих систем управління
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Спеціальність	174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
ОПП	«Комп'ютеризовані системи управління і автоматика»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри КСУ

Черно О.О.
03 лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Мельниченку Дмитру Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Енергоефективний модульний будинок з автономними системами життєзабезпечення

Керівник роботи: Черно Олександр Олександрович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу № УЧ-343 від "23" квітня 2025 р.

2. Термін подання роботи: 10.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Енергоспоживання: Середньодобове 20–25 кВт·год, пікове навантаження 4–5 кВт, автономія 1–2 доби.

Кліматичні умови: Миколаїв, інсоляція 1200–1400 кВт·год/м²/рік, температура від -15°C до +25°C.

Конструкція: Два контейнери (житловий 14 м², технічний), сендвіч-панелі з PIR ($U=0,22$ Вт/(м²·К)).

5. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

Аналіз принципів побудови, компоновання та основних технічних характеристик автономного модульного будинку.

Розрахунок і підбір електрообладнання, розробка функціональної та електричної схеми системи керування автономним будинком.

Моделювання динаміки системи керування автономними системами будинку та визначення параметрів цифрових регуляторів.

Охорона праці та екологічна безпека в процесі будівництва та експлуатації модульного будинку.

6. Перелік презентаційних матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Ілюстрація автономного будинку

Схема поперечного розрізу сендвіч-панелі

План житлового контейнера

Solar Paths Mykolaiv

Кут встановлення сонячних панелей

Характеристики сонячного поля та акумуляторів

Коефіцієнт продуктивності

Схема системи моніторингу

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці та екологічна безпека</i>	Черно О.О., зав. каф. КСУ	03.02.2025 	10.06.2025 

8. Дата видачі завдання: «03» лютого 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва етапів роботи	Термін виконання	Примітка
1	<i>Аналіз енергоефективних технологій та автономних систем</i>	26.04.2025	<i>Виконано</i>
2	<i>Розробка концепції енергоефективного модульного будинку</i>	03.05.2025	<i>Виконано</i>
3	<i>Система автономного електропостачання та вибір електрообладнання</i>	14.05.2025	<i>Виконано</i>
4	<i>Системи опалення, кондиціонування та вентиляції</i>	17.05.2025	<i>Виконано</i>
5	<i>Автономне водопостачання та каналізація</i>	22.05.2025	<i>Виконано</i>
6	<i>Підсумок концепції автономного модульного будинку</i>	23.05.2025	<i>Виконано</i>
7	<i>Охорона праці та екологічна безпека</i>	10.06.2025	<i>Виконано</i>

Студент


(підпис)

Мельниченко

Д.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Черно О. О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота представлена на 70 сторінки та містить 8 рисунків, 3 таблиць і 11 використаних джерел.

У кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризовану систему керування електроприводами подач модульного будинку, що складається з двох контейнерів — житлового та технічного. Під час розробки системи керування виконано наступне: створено функціональну схему комп'ютеризованої системи керування електроприводами для забезпечення автономних систем будинку; розроблено динамічну структурну схему системи керування електроприводами, адаптовану до потреб модульного будинку; визначено структуру та параметри коригувальних пристроїв для стабільної роботи системи; проведено розрахунок перехідних процесів; оцінено якість керування та запаси стійкості системи; розглянуто аспекти охорони праці під час експлуатації автономних систем модульного будинку в умовах України.

Ключові слова: модульний будинок, електропривод, автоматичне керування, коригувальні пристрої, моделювання, автономні системи.

ABSTRACT

The qualification thesis is presented on 70 pages and includes 8 figures, 3 tables, and 11 referenced sources.

The thesis focuses on the development of a computerized control system for the electric drives of a modular house, consisting of two containers—residential and technical. During the development of the control system, the following tasks were accomplished: a functional diagram of the computerized control system for the electric drives was created to support the house's autonomous systems; a dynamic structural diagram of the electric drive control system, tailored to the needs of the modular house, was developed; the structure and parameters of corrective devices for stable system operation were determined; transient processes were calculated; the quality of control and system stability margins were evaluated; and aspects of occupational safety during the operation of the modular house's autonomous systems in Ukraine's conditions were addressed.

Keywords: modular house, electric drive, automatic control, corrective devices, modeling, autonomous systems.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА АВТОНОМНИХ СИСТЕМ	11
1.1. Основні поняття енергоефективності та автономії житлових будинків....	11
1.2. Сучасні матеріали та технології енергоефективного будівництва	13
1.3. Огляд автономних систем життєзабезпечення: електро-, тепло- та водопостачання.....	16
Висновок за розділом 1	19
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО МОДУЛЬНОГО БУДИНКУ	21
2.1. Архітектурно-планувальні рішення	21
2.2. Вибір матеріалів і конструктивних рішень для енергоефективності	24
2.3. Загальна структура автономної інженерії будинку	27
Висновок за розділом 2.....	29
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	31
3.1. Розрахунок електричних навантажень.....	31
3.2. Кліматично-інсоляційний аналіз регіону встановлення	32
3.6. Захист, автоматика та система моніторингу	37
Висновок за розділом 3.....	40
РОЗДІЛ 4. СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ, КОНДИЦІОНУВАННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ	41
4.1. Вибір типу опалення для модульного будинку	41
4.2. Використання теплових насосів: види, ефективність	42

4.3. Рекуперація повітря та вентиляція приміщень	44
4.4. Інтеграція систем опалення з автономним електропостачанням	46
Висновок за розділом 4.....	48
РОЗДІЛ 5. АВТОНОМНЕ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА КАНАЛІЗАЦІЯ.....	49
5.1. Джерела водопостачання.....	49
5.2. Насосне обладнання та системи фільтрації.....	50
5.3. Вибір системи очищення стічних вод.....	53
5.4. Схема та компонування водопровідно-каналізаційної системи	55
Висновок за розділом 5.....	57
РОЗДІЛ 6. ПІДСУМОК КОНЦЕПЦІЇ АВТОНОМНОГО МОДУЛЬНОГО БУДИНКУ	58
6.1. Узагальнення ідеї автономного будинку	58
6.2. Повна концепція та її обґрунтування	59
Висновок за розділом 6.....	60
РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА	61
7.1. Загальні вимоги охорони праці у будівництві модульних будинків	61
7.2. Аналіз потенційних ризиків при експлуатації автономних систем	63
7.3. Екологічні аспекти та зменшення вуглецевого сліду.....	65
Висновок за розділом 7.....	67
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ПВ – сонячні панелі;

LiFePO₄ – літій-залізо-фосфатні акумулятори;

MPPT – контролер максимальної точки потужності;

BMS – система управління батареєю;

SPD – пристрій захисту від перенапруги;

COP – коефіцієнт перетворення енергії;

PIR – пінополіізоціанурат (утеплювач);

U – коефіцієнт теплопередачі;

R – тепловий опір;

VIP – вакуумні ізоляційні панелі;

Wi-Fi – бездротова мережа;

Bluetooth – технологія бездротового зв'язку;

ΔT – різниця температур;

PVset – програма для розрахунку сонячних систем.

ВСТУП

Актуальність. Сучасний світ стикається з викликами, пов'язаними зі зміною клімату, зростанням цін на енергоресурси та необхідністю забезпечення сталого розвитку. У цьому контексті енергоефективне будівництво та використання автономних систем життєзабезпечення стають ключовими напрямками для створення екологічно безпечного та економічно вигідного житла [1]. Модульні будинки, завдяки своїй гнучкості, швидкості зведення та можливості інтеграції інноваційних технологій, є перспективним рішенням для забезпечення енергоефективності та автономності.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в розробці концепції енергоефективного модульного будинку з автономними системами життєзабезпечення, які забезпечують комфортне проживання, мінімізують вплив на навколишнє середовище та оптимізують енергоспоживання. Для досягнення цієї мети в роботі розв'язано наступні завдання:

- проведено аналіз сучасних енергоефективних технологій та автономних систем;
- розроблено архітектурно-планувальні і конструктивні рішення для модульного будинку;
- здійснено розрахунок характеристик системи автономного електропостачання на основі сонячної енергії, обрано її основні елементи;
- надано пропозиції ефективних рішень для систем опалення, вентиляції та кондиціонування, розробку схеми автономного водопостачання та каналізації;
- розглянуті питання охорони праці та екологічної безпеки.

Об'єктом дослідження є енергоефективний модульний будинок, а предметом – технології та системи, що забезпечують його автономність та енергоефективність. Методи дослідження включають аналіз наукової літератури, порівняльний аналіз технологій, кліматично-інсоляційний аналіз,

розрахунок електричних навантажень, моделювання інженерних систем та оцінку екологічних ризиків.

Практична цінність роботи полягає в створенні концепції модульного будинку, яка може бути використана для будівництва доступного, екологічного та енергоефективного житла, а також у розробці рекомендацій щодо вибору матеріалів, обладнання та технологій для автономних систем.

Ідея роботи полягає в комплексному підході до розробки модульного будинку, який поєднує сучасні енергоефективні матеріали, архітектурні рішення та автономні системи життєзабезпечення, адаптовані до кліматичних умов України. Практична цінність роботи полягає в створенні концепції модульного будинку, яка може бути використана для будівництва доступного, екологічного та енергоефективного житла, а також у розробці рекомендацій щодо вибору матеріалів, обладнання та технологій для автономних систем.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА АВТОНОМНИХ СИСТЕМ

1.1. Основні поняття енергоефективності та автономії житлових будинків

Енергоефективність та автономія житлових будинків є ключовими концепціями сучасного будівництва, спрямованими на зменшення впливу на довкілля, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення комфортних умов проживання. Енергоефективність передбачає раціональне використання енергетичних ресурсів за рахунок оптимізації конструктивних рішень, використання сучасних матеріалів та інноваційних технологій. Автономія, у свою чергу, означає здатність будинку функціонувати незалежно від централізованих систем електро-, тепло-, водопостачання та каналізації. Поєднання цих двох концепцій дозволяє створювати модульні будинки, які є економічно вигідними, екологічно безпечними та адаптованими до сучасних викликів, таких як зміна клімату чи нестабільність енергопостачання.

Енергоефективність будинку визначається його здатністю мінімізувати втрати енергії та оптимізувати її використання для забезпечення всіх потреб мешканців. Основна мета — знизити енергоспоживання на опалення, охолодження, вентиляцію, освітлення та роботу побутових приладів. Це досягається за рахунок:

- Високоєфективної теплоізоляції стін, даху та підлоги, що зменшує тепловтрати;
- Використання вікон із низькоемісійним склом, яке пропускає світло, але блокує теплове випромінювання;
- Впровадження енергоефективних систем опалення, таких як теплові насоси чи сонячні колектори;
- Інтеграції розумних систем управління, які оптимізують споживання енергії залежно від потреб мешканців.

Автономія передбачає створення будинку, який може функціонувати без підключення до централізованих інженерних мереж. Це особливо актуально для віддалених регіонів, де доступ до електромереж, газопостачання чи водопроводу обмежений. Автономні системи включають:

- Електропостачання: сонячні панелі, вітрогенератори, акумуляторні батареї;
- Теплопостачання: теплові насоси, сонячні колектори, твердопаливні котли;
- Водопостачання та каналізація: свердловини, системи збору дощової води, біологічні очисні споруди.

Автономний будинок не лише забезпечує незалежність, але й сприяє економії ресурсів та зниженню вуглецевого сліду. Наприклад, використання сонячних панелей із накопичувальними батареями дозволяє будинку генерувати та зберігати електроенергію, що забезпечує безперебійне живлення навіть уночі чи за відсутності сонця.



Рис. 1.1. Ілюстрація автономного будинку

Енергоефективність та автономія взаємодоповнюють одна одну. Наприклад, енергоефективний будинок із низьким енергоспоживанням потребує меншої потужності автономних систем, що знижує їхню вартість та складність. Водночас автономні системи, такі як сонячні панелі чи теплові насоси, підвищують енергоефективність, оскільки використовують відновлювані джерела енергії. Важливим аспектом є інтеграція цих систем у єдину інфраструктуру, що керується автоматикою для оптимального використання ресурсів. Наприклад, розумна система може автоматично перенаправляти надлишок електроенергії від сонячних панелей на зарядку акумуляторів або живлення теплового насоса.

1.2. Сучасні матеріали та технології енергоефективного будівництва

Сучасні матеріали та технології енергоефективного будівництва відіграють ключову роль у створенні модульних будинків, зокрема тих, що базуються на конструкції з двох контейнерів: одного для розміщення електричного обладнання та іншого як житлового модуля. Використання сендвіч-панелей як основного конструктивного елемента дозволяє досягти високої енергоефективності завдяки їхнім теплоізоляційним властивостям, легкості монтажу та модульності. У цьому підпункті розглядаються основні матеріали, конструктивні рішення та технології, які забезпечують енергоефективність модульного будинку з контейнерів, а також їхнє застосування до специфіки такого типу будівництва [7].

Сендвіч-панелі є багатошаровими конструкціями, що складаються з двох зовнішніх металевих або композитних листів та внутрішнього шару утеплювача. Для модульних будинків, побудованих на базі контейнерів, сендвіч-панелі забезпечують не лише міцність, але й високу теплоізоляцію. Найпоширенішими утеплювачами в сендвіч-панелях є:

- Пінополіуретан (PUR): має коефіцієнт теплопровідності $\lambda \approx 0,022\text{--}0,028$ Вт/(м·К), що робить його одним із найефективніших утеплювачів;

- Пінополіізоціанурат (PIR): вдосконалений варіант PUR із покращеною вогнестійкістю та аналогічною теплоізоляцією;
- Мінеральна вата: менш ефективна ($\lambda \approx 0,035\text{--}0,045 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), але екологічна та вогнестійка.

Для житлового контейнера рекомендується використовувати сендвіч-панелі з PIR-утеплювачем товщиною 100–150 мм, що забезпечує значення теплового опору $R \geq 4,5 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, достатнє для кліматичних умов України. У контейнері для електричного обладнання можна застосовувати панелі з мінеральною ватою товщиною 80–100 мм, оскільки тепловий комфорт там менш критичний, але потрібна вогнестійкість через наявність електрообладнання.

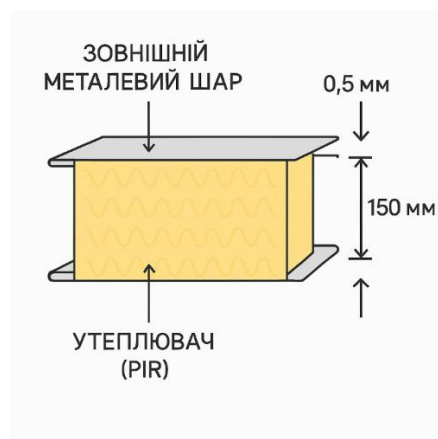


Рис. 1.2. Схема поперечного розрізу сендвіч-панелі

У житловому контейнері вікна та двері є потенційними місцями тепловтрат, тому їхній вибір є критично важливим. Сучасні енергоефективні вікна мають багатошарові склопакети з низькоемісійним покриттям і заповненням аргоном. Наприклад, двокамерний склопакет із коефіцієнтом теплопередачі $U \leq 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ забезпечує мінімальні тепловтрати. Рами вікон можуть бути виготовлені з ПВХ або алюмінію з терморозривом, що зменшує теплопровідність. Для дверей рекомендується використовувати конструкції з утеплювачем (наприклад, пінополіуретаном) та ущільнювачами, щоб уникнути продування.

Для модульного будинку з контейнерів важливим є використання технологій пасивного опалення та охолодження, які зменшують залежність від активних систем. До таких технологій належать:

- Орієнтація вікон: розміщення великих вікон на південній стороні контейнера для максимізації сонячного тепла взимку;
- Зовнішні жалюзі або козирки: зменшують перегрівання житлового модуля влітку;
- Зелені дахи: використання рослинного покриття на даху контейнера для додаткової ізоляції та зниження температури влітку.

Для контейнера з електричним обладнанням необхідно передбачити вентиляційні отвори з автоматичними клапанами, щоб уникнути перегрівання обладнання, особливо інверторів та акумуляторів.

Таблиця 1.1

Порівняння матеріалів для сендвіч-панелей

Утеплювач	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	Вогнестійкість	Екологічність	Товщина для $R=4,5$ $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, мм
Пінополіуретан (PUR)	0,022– 0,028	Середня	Низька	100–120
Пінополіізоціану рат (PIR)	0,022– 0,026	Висока	Низька	100–110
Мінеральна вата	0,035– 0,045	Висока	Висока	150–180

Ця таблиця показує, що PIR є оптимальним вибором для житлового контейнера завдяки високій теплоізоляції та вогнестійкості, тоді як мінеральна вата підходить для технічного контейнера через її екологічність і стійкість до високих температур.

Сучасні технології, такі як вакуумні ізоляційні панелі (VIP), дозволяють досягти високого теплового опору при меншій товщині ($\lambda \approx 0,004\text{--}0,008 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Проте їхня висока вартість обмежує використання в бюджетних модульних будинках. Іншим перспективним рішенням є аерогелі, які мають надзвичайно низьку теплопровідність ($\lambda \approx 0,013\text{--}0,020 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), але також є дорогими. Для модульного будинку з контейнерів доцільніше використовувати перевірені рішення, такі як PIR-панелі, які балансують між вартістю та ефективністю.

1.3. Огляд автономних систем життєзабезпечення: електро-, тепло- та водопостачання

Автономні системи життєзабезпечення є основою функціонування модульного будинку, побудованого з двох контейнерів: одного для розміщення електричного обладнання та іншого як житлового модуля. Ці системи забезпечують незалежність від централізованих мереж, що особливо важливо для віддалених або екологічно орієнтованих проєктів. У контексті модульного будинку з сендвіч-панелей автономні системи електро-, тепло- та водопостачання мають бути компактними, енергоефективними та адаптованими до обмеженого простору контейнерів. У цьому підпункті розглядаються основні типи автономних систем, їхні компоненти та особливості застосування в модульних будинках [7].

Автономне електропостачання базується на використанні відновлювальних джерел енергії, що дозволяє забезпечити електрикою як

житловий контейнер, так і технічний модуль із обладнанням. Основні компоненти системи включають:

- Сонячні панелі: встановлюються на даху житлового або технічного контейнера для генерації електроенергії. Монокристалічні панелі з ККД 20–22% є оптимальними для обмеженої площі даху контейнера (стандартний розмір контейнера — близько 30 м²);
- Акумулятори: літій-іонні батареї (наприклад, LiFePO₄) забезпечують накопичення енергії для використання вночі або за низької сонячної активності. Для модульного будинку достатньо батареї ємністю 5–10 кВт·год;
- Інвертор: перетворює постійний струм від сонячних панелей у змінний для живлення побутових приладів. Гібридні інвертори з функцією управління зарядом акумуляторів є оптимальними для автономних систем;
- Система моніторингу: розумні контролери дозволяють відстежувати генерацію, споживання та стан акумуляторів, що підвищує ефективність системи.

У технічному контейнері розміщуються інвертор, акумулятори та контролери, що забезпечує захист обладнання від зовнішніх впливів та легкий доступ для обслуговування.

Теплопостачання модульного будинку має забезпечувати комфортну температуру в житловому контейнері, мінімізуючи енергоспоживання. Основні рішення включають:

- Теплові насоси: повітряні або геотермальні теплові насоси є енергоефективними, оскільки використовують тепло з навколишнього середовища. Для компактного модульного будинку оптимальним є повітряний тепловий насос потужністю 3–5 кВт, який може працювати як на обігрів, так і на охолодження;

- Сонячні колектори: плоскі або вакуумні колектори для нагріву води, що використовується для побутових потреб або низькотемпературного опалення (наприклад, у системі теплої підлоги);

- Електричні обігрівачі: як резервне рішення для пікових навантажень, особливо в холодному кліматі.

Тепловий насос і накопичувальний бак для гарячої води розміщуються в технічному контейнері, тоді як система теплої підлоги або радіатори — у житловому модулі.

Автономне водопостачання забезпечує доступ до чистої води, а каналізаційна система — утилізацію стоків. Основні компоненти:

- Джерела води: свердловини або системи збору дощової води. Для модульного будинку компактна система збору дощової води з даху контейнерів є економічним рішенням, особливо якщо поєднується з резервуаром об'ємом 1000–2000 л.

- Насосне обладнання: насоси для подачі води зі свердловини або резервуара до житлового контейнера. Компактні насоси з низьким енергоспоживанням (0,5–1 кВт) підходять для модульних будинків.

- Фільтрація: системи зворотного осмосу або багатоступеневі фільтри для очищення води до питної якості.

- Каналізація: біологічні септики або компактні очисні станції для переробки стічних вод, які можна розмістити поряд із контейнерами.

Резервуар для води та очисна станція розташовуються поза контейнерами, тоді як фільтри та насоси можуть бути в технічному модулі.

Порівняння енергоспоживання систем

Система	Споживана потужність, кВт	Щоденне споживання, кВт·год (при 8 год роботи)
Тепловий насос (обігрів)	2–5	24–40
Сонячний колектор (нагрів води)	0,5–1	4–8
Насос водопостачання	0,5–1	4–8
Побутові прилади (освітлення, техніка)	1–2	8–16

Ця таблиця показує, що тепловий насос є основним споживачем енергії, тому сонячна електростанція має бути розрахована на пікове навантаження до 40 кВт·год на добу. Для зменшення навантаження рекомендується комбінувати тепловий насос із сонячним колектором.

У модульному будинку з двох контейнерів важлива інтеграція всіх систем для оптимального використання простору та енергії. Технічний контейнер слугує "енергетичним центром", де розміщуються акумулятори, інвертор, тепловий насос, насоси водопостачання та система моніторингу. Житловий контейнер містить кінцеві пристрої: освітлення, побутову техніку, теплу підлогу та сантехніку.

Висновок за розділом 1

Розділ 1 визначає основи енергоефективності та автономії модульного будинку з двох контейнерів, підкреслюючи важливість інтеграції сучасних матеріалів і технологій для зниження енергоспоживання та забезпечення незалежності від централізованих мереж. Використання сендвіч-панелей із PIR-утеплювачем ($R \geq 4,5 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$), енергоефективних вікон ($U \leq 0,8 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$) і

технологій пасивного опалення оптимізує тепловтрати, тоді як автономні системи електропостачання (сонячні панелі, LiFePO₄ акумулятори), теплопостачання (тепловий насос 3–5 кВт) і водопостачання (збір дощової води, біологічна очисна станція) забезпечують функціональність будинку в умовах України, сприяючи економії ресурсів і зниженню вуглецевого сліду.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО МОДУЛЬНОГО БУДИНКУ

2.1. Архітектурно-планувальні рішення

Архітектурно-планувальні рішення модульного будинку, що складається з двох контейнерів — житлового та технічного, є ключовими для забезпечення енергоефективності, функціональності та комфорту. Контейнерна конструкція з сендвіч-панелей визначає компактність і модульність, що вимагає ретельного планування простору для оптимального розміщення житлових зон і технічних систем. У цьому підпункті розглядаються принципи архітектурного планування, зонування приміщень, орієнтація контейнерів та їх інтеграція для створення енергоефективного та зручного житлового простору [9].

Модульний будинок із двох контейнерів вимагає компактного, але функціонального планування. Основні принципи включають:

- Максимізація корисного простору: використання модульної конструкції для швидкого монтажу та гнучкого зонування;
- Енергоефективність: орієнтація вікон і розташування контейнерів для оптимального використання сонячного світла та тепла;
- Ергономічність: створення комфортного житлового простору з урахуванням потреб мешканців (1–2 особи);
- Інтеграція систем: розміщення технічного обладнання в окремому контейнері для зниження шуму та забезпечення безпеки.

Житловий контейнер призначений для проживання, тому включає зони для сну, відпочинку, кухні та санвузла. Технічний контейнер містить обладнання для електро-, тепло- та водопостачання, що дозволяє ізолювати шум і тепло від технічних систем [9].

Житловий контейнер площею приблизно 14 м² потребує компактного зонування. Пропонується наступний розподіл простору:

- Зона відпочинку/сну: компактне ліжко (1,4 м × 2 м), що трансформується в диван для економії простору;
- Кухонна зона: модульна кухня (2 м × 0,6 м) з мийкою, плитою та невеликою робочою поверхнею;
- Санвузол: душова кабіна (0,8 м × 0,8 м), унітаз і компактна раковина, відокремлені перегородкою;
- Зона зберігання: вбудовані шафи вздовж стін для оптимізації простору.



Рис. 2.1. План житлового контейнера

Орієнтація будинку суттєво впливає на енергоефективність. Для максимізації сонячного освітлення та тепла в кліматичних умовах України:

- Житловий контейнер розміщується так, щоб вікна (площею 2–3 м²) були орієнтовані на південь для пасивного обігріву взимку;
- Технічний контейнер розташовується поруч із житловим (з'єднання через дверний отвір або коридор), бажано на північній стороні, щоб мінімізувати теплові втрати від обладнання;

- Сонячні панелі та колектори розміщуються на даху обох контейнерів, нахилених під кутом 30–40° для оптимального поглинання сонячної енергії.

Для захисту від перегріву влітку на південних вікнах передбачаються зовнішні жалюзі або козирки.

Технічний контейнер слугує для розміщення обладнання: інвертора, акумуляторів, теплового насоса, насосів водопостачання та системи моніторингу. Його планування включає:

- Зона обладнання: стелажі для акумуляторів (1,5 м × 1 м) та інвертора;
- Зона тепlopостачання: місце для теплового насоса та накопичувального бака (1 м × 1 м);
- Вентиляція: отвори з автоматичними клапанами для охолодження обладнання.

З'єднання між контейнерами забезпечується через утеплений дверний отвір, що мінімізує тепловтрати. У житловому контейнері прокладаються комунікації (електрика, вода, опалення) від технічного модуля через ізольовані канали в сендвіч-панелях.

Розрахунок площі та енергоефективності

Елемент	Площа, м ²	Коефіцієнт теплопередачі U, Вт/(м ² ·К)	Тепловтрати при $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, Вт
Сендвіч-панелі (стіни, дах)	40	0,22 (PIR, 100 мм)	176
Вікна	3	0,8	48
Двері	2	1,0	40
Загалом			264

Ця таблиця показує, що загальні тепловтрати житлового контейнера становлять близько 264 Вт за різниці температур 20°C , що підтверджує ефективність сендвіч-панелей із PIR-утеплювачем та енергоефективних вікон. Для компенсації цих втрат достатньо теплового насоса потужністю 0,5–1 кВт [10].

2.2. Вибір матеріалів і конструктивних рішень для енергоефективності

Вибір матеріалів і конструктивних рішень для модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного — є критично важливим для забезпечення енергоефективності, довговічності та комфорту. Оскільки будинок базується на конструкції з сендвіч-панелей, вибір матеріалів має враховувати їхні теплоізоляційні властивості, міцність, екологічність і адаптацію до компактної модульної структури. У цьому підпункті розглядаються оптимальні матеріали для стін, вікон, дверей, підлоги, даху, а також конструктивні рішення, які сприяють зниженню тепловтрат і підвищенню енергоефективності [10].

Основним конструктивним елементом модульного будинку є сендвіч-панелі, які забезпечують міцність і теплоізоляцію. Для житлового контейнера рекомендуються сендвіч-панелі з пінополіізоціануратом (PIR) товщиною 100–120 мм, оскільки вони мають низький коефіцієнт теплопровідності ($\lambda \approx 0,022\text{--}0,026 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) і високу вогнестійкість. Для технічного контейнера, де тепловий комфорт менш критичний, але важлива безпека обладнання, доцільно використовувати сендвіч-панелі з мінеральною ватою товщиною 80–100 мм ($\lambda \approx 0,035\text{--}0,045 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), що забезпечує додаткову вогнестійкість і екологічність [9].

Зовнішнє покриття панелей — оцинкована сталь із полімерним покриттям — захищає від корозії та атмосферних впливів. Внутрішнє оздоблення житлового контейнера може бути виконано з гіпсокартону або дерев'яних панелей із низьким вмістом формальдегіду для забезпечення здорового мікроклімату.

Вікна в житловому контейнері мають забезпечувати максимальну теплоізоляцію та природне освітлення. Рекомендується використовувати двокамерні склопакети з низькоемісійним покриттям і заповненням аргоном ($U \leq 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$). Рами вікон із ПВХ із терморозривом зменшують теплопровідність. Для дверей оптимальними є конструкції з утеплювачем (пінополіуретан або мінеральна вата) та подвійними ущільнювачами, що забезпечують герметичність ($U \leq 1,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$). У технічному контейнері двері можуть бути металевими з мінімальною ізоляцією, оскільки основна функція — захист обладнання.

Підлога житлового контейнера має бути теплоізольованою та міцною. Рекомендується конструкція:

- Основа: сендвіч-панель із PIR товщиною 100 мм ($R \geq 4,5 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$);

- Покриття: ламінат або вінілова плитка з низькою теплопровідністю, сумісна з системою теплої підлоги.

Дах обох контейнерів також виготовляється з сендвіч-панелей із PIR (житловий модуль) або мінеральною ватою (технічний модуль). Для підвищення енергоефективності дах житлового контейнера може мати додаткове покриття у вигляді зеленого даху (шар ґрунту з рослинами товщиною 10–15 см), що забезпечує ізоляцію та захист від перегріву влітку. На даху технічного контейнера передбачаються кріплення для сонячних панелей і колекторів із нахилом 30–45°.

Для підвищення енергоефективності модульного будинку застосовуються наступні конструктивні рішення:

- Герметизація стиків: використання ущільнювальних стрічок і силіконових герметиків у місцях з'єднання сендвіч-панелей для виключення містків холоду;

- Пасивне опалення: розміщення вікон площею 2–3 м² на південній стороні житлового контейнера для максимального використання сонячного тепла;

- Вентиляція з рекуперацією: встановлення компактної системи вентиляції з рекуператором тепла (ефективність до 85%) у житловому контейнері для зменшення тепловтрат;

- Тепла підлога: низькотемпературна система водяного опалення, інтегрована з тепловим насосом, для рівномірного розподілу тепла в житловому модулі.

Для технічного контейнера передбачається вентиляція з автоматичними клапанами для охолодження обладнання, що знижує ризик перегріву акумуляторів та інвертора.

2.3. Загальна структура автономної інженерії будинку

Автономна інженерія модульного будинку, що складається з двох контейнерів — житлового та технічного, забезпечує незалежність від централізованих мереж електро-, тепло- та водопостачання, а також каналізації. Конструкція з сендвіч-панелей і компактні розміри контейнерів (приблизно 6 м × 2,4 м × 2,6 м кожен) вимагають інтеграції всіх систем у єдину, ефективну та компактну інфраструктуру. У цьому підпункті розглядається загальна структура автономної інженерії, включаючи компоненти систем, їх розміщення та взаємодію між житловим і технічним контейнерами.

Автономна інженерія модульного будинку базується на трьох ключових системах: електропостачання, теплопостачання та водопостачання з каналізацією. Усі основні компоненти, такі як інвертори, акумулятори, тепловий насос Daikin Altherma 3 H HT (EHS03CBX / ERLQ003C) та насосне обладнання, розташовуються в технічному контейнері, який слугує енергетичним і технічним центром. Житловий контейнер містить кінцеві пристрої: освітлення, побутову техніку, теплу підлогу, сантехніку та вентиляцію. Інтеграція систем забезпечується через ізольовані канали в сендвіч-панелях, що мінімізують тепловтрати та забезпечують безпечну експлуатацію.

Електропостачання базується на сонячних панелях, установлених на даху обох контейнерів, із загальною площею приблизно 30 м². Монокристалічні панелі з ККД 20–22% генерують електроенергію, яка накопичується в літій-іонних акумуляторах (LiFePO₄, ємність 5–10 кВт·год), розміщених у технічному контейнері. Гібридний інвертор перетворює постійний струм у змінний і розподіляє енергію між побутовими приладами, тепловим насосом Daikin Altherma 3 H HT і насосами водопостачання. Система моніторингу, також розташована в технічному контейнері, дозволяє відстежувати генерацію та споживання електроенергії через мобільний додаток або дисплей.

Електричні кабелі прокладаються через ізольовані канали в стінах від технічного контейнера до житлового, забезпечуючи живлення освітлення, розеток і теплої підлоги. Для безпеки передбачені автоматичні вимикачі та захист від перенапруги.

Теплопостачання забезпечується повітряним тепловим насосом Daikin Altherma 3 H HT (EHS03CBX / ERLQ003C) потужністю 3–5 кВт, розташованим у технічному контейнері. Цей насос є високоефективним рішенням, яке використовує тепло зовнішнього повітря для обігріву житлового контейнера через систему водяної теплої підлоги, інтегрованої в підлогу житлового модуля. Насос вирізняється високим коефіцієнтом перетворення енергії (COP), що дозволяє виробляти 3–4 кВт тепла на 1 кВт спожитої електроенергії, що ідеально підходить для автономної системи з обмеженою генерацією сонячних панелей. Крім того, він адаптований до низьких температур (до -15°C), що забезпечує надійне опалення в зимовий період. Накопичувальний бак для гарячої води (об'єм 100–200 л) також розміщується в технічному контейнері та під'єднується до сонячного колектора на даху для додаткового нагріву води. Для резервного обігріву в житловому контейнері передбачені електричні конвектори, які активуються за низьких температур або в разі пікових навантажень. Вентиляційна система з рекуператором тепла (ефективність до 85%) установлена в житловому контейнері для забезпечення свіжого повітря та зменшення тепловтрат [10].

Водопостачання базується на зборі дощової води з даху обох контейнерів у резервуар об'ємом 1000–2000 л, розташований поза контейнерами. Компактний насос (0,5–1 кВт) у технічному контейнері подає воду до системи фільтрації (зворотний осмос або багатоступеневі фільтри), після чого вона надходить до санвузла та кухні житлового контейнера. Труби водопостачання прокладаються через ізольовані канали в сендвіч-панелях для запобігання замерзанню.

Каналізація реалізована через компактну біологічну очисну станцію, розташовану поза контейнерами, яка переробляє стічні води до рівня, придатного для скидання в ґрунт. Стоки з санвузла та кухні житлового контейнера відводяться через труби до очисної станції.

Усі інженерні системи інтегруються через центральну систему управління, розташовану в технічному контейнері. Розумний контролер координує роботу сонячних панелей, акумуляторів, теплового насоса Daikin Altherma 3 H HT та насосів водопостачання, оптимізуючи енергоспоживання. Наприклад, надлишок електроенергії від сонячних панелей спрямовується на зарядку акумуляторів або нагрів води в накопичувальному баку. Технічний контейнер забезпечує ізоляцію обладнання від житлового простору, знижуючи шум і теплові впливи. З'єднання між контейнерами здійснюється через утеплений дверний отвір і ізольовані канали для кабелів і труб, що мінімізують тепловтрати.

Висновок за розділом 2

Розробка концепції енергоефективного модульного будинку, описана в розділі 2, забезпечує створення компактного, функціонального та автономного житла для 1–2 осіб на основі двох контейнерів — житлового та технічного. Архітектурно-планувальні рішення оптимізують простір житлового контейнера (14 м²) шляхом зонування на зони відпочинку, кухні, санвузла та зберігання, з південною орієнтацією вікон для пасивного обігріву та мінімальними тепловтратами (264 Вт при $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$). Технічний контейнер ізолювано для розміщення обладнання, що знижує шум і підвищує безпеку. Вибір матеріалів, зокрема сендвіч-панелей із PIR-утеплювачем ($U=0,22 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$), двокамерних склопакетів ($U\leq 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$) і теплої підлоги, забезпечує високу енергоефективність, довговічність і комфорт. Загальна структура автономної інженерії (підпункт 2.3) інтегрує системи електропостачання (сонячні панелі, акумулятори, інвертор), теплопостачання (тепловий насос Daikin Altherma 3 H

НТ, рекуператор) і водопостачання з каналізацією (збір дощової води, біологічна очисна станція), керовані розумним контролером для оптимального енергокористування. Концепція відповідає принципам енергоефективності, автономності та екологічності, створюючи сучасне рішення для модульного житла [9].

РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

3.1. Розрахунок електричних навантажень

Розрахунок електричних навантажень є ключовим етапом проєктування автономної системи електропостачання модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і призначений для компактного проживання 1–2 осіб, електричні навантаження мають бути мінімальними, але достатніми для забезпечення комфорту та роботи автономних систем. У цьому підпункті розглядається методика розрахунку електричних навантажень для визначення необхідної потужності сонячних панелей, акумуляторів та інвертора [8].

Розрахунок передбачає визначення загального енергоспоживання всіх пристроїв у житловому та технічному контейнерах. Основна мета — забезпечити достатню потужність для побутових потреб, опалення, водопостачання та інших систем, враховуючи пікові навантаження та добове споживання. Для цього враховуються:

- Постійні навантаження: освітлення, холодильник, вентиляція;
- Періодичні навантаження: тепловий насос, насос водопостачання, побутова техніка;
- Резерв потужності: для пікових навантажень або додаткових пристроїв.

Перелік основних споживачів електроенергії

Електричні навантаження розподіляються між житловим і технічним контейнерами. Основні споживачі:

- У житловому контейнері: світлодіодне освітлення (100–200 Вт), холодильник (150 Вт), мікрохвильова піч (800 Вт), електричний чайник (1000 Вт), тепла підлога (500–1000 Вт).

- У технічному контейнері: тепловий насос (3500 Вт), насос водопостачання (500–1000 Вт), інвертор (50–100 Вт у режимі очікування), система моніторингу (20–50 Вт).

Для оцінки загального енергоспоживання визначається середньодобове споживання електроенергії. Постійні споживачі (освітлення, холодильник) працюють більшу частину доби, тоді як тепловий насос і побутова техніка вмикаються періодично. Приблизний розрахунок:

- Освітлення: $150 \text{ Вт} \times 6 \text{ год} = 0,9 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$.
- Холодильник: $150 \text{ Вт} \times 24 \text{ год}$ (з урахуванням циклічної роботи) $= 1,2 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$.
- Тепловий насос: $3500 \text{ Вт} \times 5 \text{ год} = 17,5 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$ (основний споживач у холодний період).
- Насос водопостачання: $750 \text{ Вт} \times 2 \text{ год} = 1,5 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$.
- Побутова техніка (чайник, мікрохвильова піч): $1000 \text{ Вт} \times 1 \text{ год} = 1 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$.

Загальне середньодобове споживання становить приблизно 20–25 кВт·год. Пікове навантаження (одночасна робота теплового насоса, насоса водопостачання та побутової техніки) може досягати 4–5 кВт.

Для забезпечення автономії протягом 1–2 діб за низької сонячної активності додається резерв 20–30% до середньодобового споживання. Таким чином, необхідна добова потужність системи становить близько 25–30 кВт·год. Це визначає вимоги до ємності акумуляторів (40 кВт·год, 8 одиниць Weso 5K3) і потужності сонячних панелей (8,08 кВт із 16 панелей AE Solar 505MD-132 для генерації 20–25 кВт·год/добу в сонячний день). Усі розрахунки виконано за допомогою програми PVset.

3.2. Кліматично-інсоляційний аналіз регіону встановлення

Кліматично-інсоляційний аналіз регіону встановлення модульного будинку є важливим для визначення ефективності автономної системи

електропостачання, зокрема сонячних панелей, які є основним джерелом енергії. Аналіз кліматичних умов і рівня інсоляції дозволяє оптимізувати розміщення сонячних панелей, їхню потужність та забезпечити достатнє енергопостачання для житлового та технічного контейнерів. У цьому підпункті розглядаються ключові кліматичні параметри для регіону Миколаїв, Україна.

Клімат Миколаєва характеризується помірно-континентальними умовами. Основні параметри, що впливають на систему:

- Середньорічна температура: від -5°C взимку до $+25^{\circ}\text{C}$ влітку [8].
- Кількість сонячних годин: приблизно 2000–2400 годин на рік, із піком у літні місяці (червень–серпень).
- Опади: середньорічна норма 400–500 мм, із можливістю збору дощової води.
- Сніговий покрив: взимку до 10–20 см, що може впливати на ефективність панелей.

Ці умови враховуються для стабільної роботи систем опалення та електропостачання.

Інсоляція є ключовим фактором для розрахунку продуктивності сонячних панелей. Середньорічна інсоляція в Миколаєві становить $1200\text{--}1400\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на рік:

- Максимальна інсоляція: до $6\text{--}7\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на день улітку.
- Мінімальна інсоляція: $1\text{--}2\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на день узимку.
- Оптимальний кут нахилу панелей: 45° (азимут 0°), що забезпечує максимальне поглинання сонячної енергії протягом року.

Для системи з 16 панелей AE Solar 505MD-132 (загальна потужність 8,08 кВт) середньодобова генерація становить $20\text{--}25\text{ кВт}\cdot\text{год}$ улітку та $5\text{--}10\text{ кВт}\cdot\text{год}$ узимку, що підтверджено розрахунками в PVset.

Вплив кліматичних умов на системи будинку:

- Електропостачання: низька зимова інсоляція вимагає акумуляторів із запасом ємності ($40\text{ кВт}\cdot\text{год}$).

- Теплопостачання: тепловий насос потужністю 3500 Вт адаптовано до низьких температур ($-5\dots-15^{\circ}\text{C}$) [8].
- Водопостачання: система збору дощової води потребує захисту від замерзання взимку.

Рекомендації для проєктування:

- Розташування панелей на даху обох контейнерів із нахилом 45° та азимутом 0° .
- Використання теплового насоса повітряного типу.
- Встановлення ізольованого резервуара для дощової води.

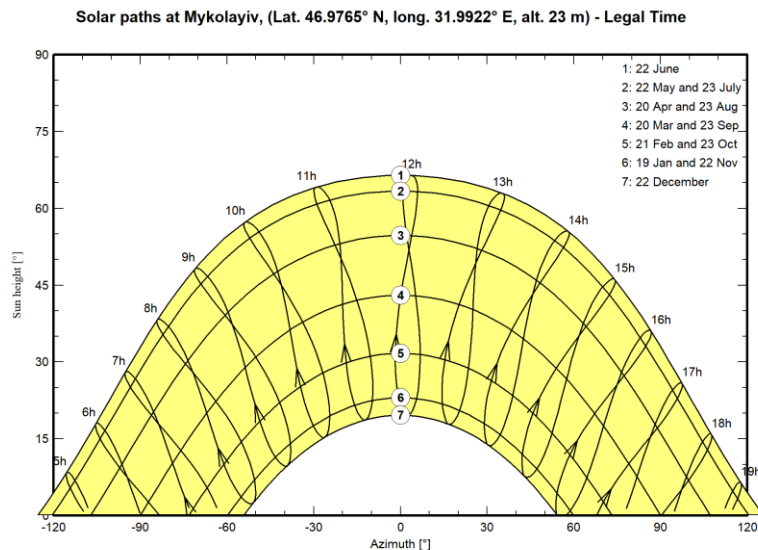


Рис. 3.1. Solar Paths Mykolaiv

3.3. Вибір та обґрунтування типу сонячних панелей

Вибір сонячних панелей для модульного будинку є критично важливим для забезпечення ефективного автономного електропостачання. Обмежена площа даху ($\sim 30 \text{ m}^2$) вимагає компактних і ефективних панелей, адаптованих до клімату Миколаєва.

Типи сонячних панелей:

- Монокристалічні: ККД 18–22%, висока ефективність, компактність.
- Полікристалічні: ККД 15–18%, дешевші, але менш ефективні.
- Тонкоплівкові: ККД 10–14%, потребують більшої площі.

Критерії вибору:

- Висока ефективність для обмеженої площі.
- Стійкість до низьких температур і хмарності.
- Довговічність (25+ років).
- Економічна доцільність.

Обґрунтування вибору AE Solar 505MD-132:

Обрано 16 монокристалічних панелей AE Solar 505MD-132:

- Потужність: 505 Вт на панель, загальна — 8,08 кВт;
- Високий ККД (~20%) для генерації 20–25 кВт·год/добу влітку;
- Ефективність за низької інсоляції, що підтверджено PVset;
- Довговічність: деградація 0,5–0,7% на рік.

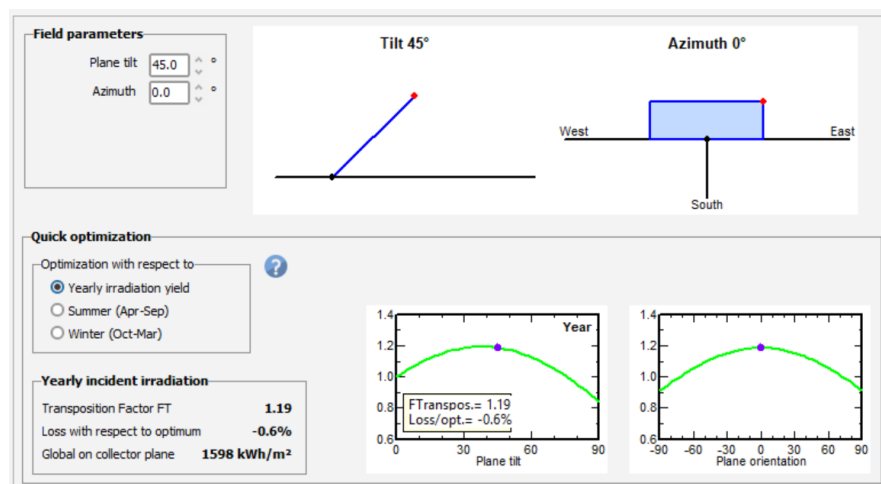


Рис. 3.2. Кут встановлення сонячних панелей

PV Array			
PV modules	AE 505MD-132	Battery:	5K3 module LV/HV 52V / 105 Ah
Nominal power	6.06 kWp	Battery voltage	53 V
MPP voltage	39.2 V	Total capacity	864 Ah
MPP current	12.9 A		

Рис. 3.3. Характеристики сонячного поля та акумуляторів

3.4. Вибір інвертора: тип, потужність, функціональні особливості

Інвертор перетворює постійний струм від панелей у змінний для живлення приладів. Він має бути компактним і ефективним для технічного контейнера.

Критерії вибору:

- Потужність: 4–5 кВт (пікове навантаження).
- ККД: не нижче 95%.
- Функціональність: управління акумуляторами, моніторинг.

Обрано інвертор Victron MultiPlus-II 48/8000, який є гібридним інвертором/зарядним пристроєм. Цей інвертор підтримує до 8 кВт потужності та забезпечує зарядку акумуляторів ємністю 40 кВт·год. Для максимізації генерації від сонячних панелей використовуються окремі MPPT-контролери Victron 250/100 24V (3 одиниці), які підключаються до інвертора. Інвертор має високу гнучкість і дозволяє моніторити систему через мобільний додаток VictronConnect [1, 2].

3.5. Вибір акумуляторів: типи, ємність, режими експлуатації

Акумулятори накопичують енергію для використання вночі чи за низької інсоляції. Вони мають бути компактними та надійними.

Типи акумуляторів:

- Свинцево-кислотні: низький ККД, короткий термін служби.
- Літій-іонні (LiFePO₄): ККД 95–98%, довговічні.

Обґрунтування вибору Weco 5K3:

- Обрано 8 акумуляторів Weco 5K3:
- Ємність: 5 кВт·год на одиницю, загальна — 40 кВт·год.
- Довговічність: 2000–5000 циклів.
- Стійкість до низьких температур.

Режими експлуатації:

- Влітку: зарядка вдень, живлення вночі.
- Взимку: компенсація дефіциту для теплового насоса (16 кВт·год/добу).

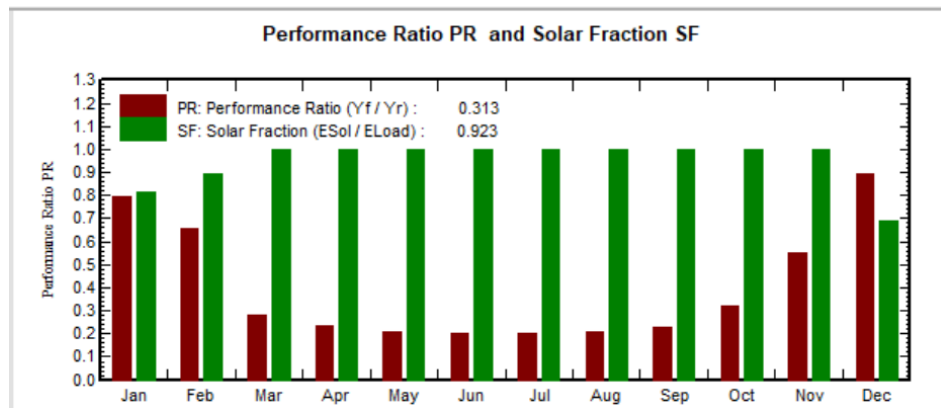


Рис. 3.4. Коефіцієнт продуктивності

3.6. Захист, автоматика та система моніторингу

Система захисту, автоматики та моніторингу є невід’ємною частиною автономного електропостачання модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного. Вона забезпечує безпеку обладнання, стабільність роботи систем і контроль енергоспоживання. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і залежить від сонячних панелей, акумуляторів та інвертора, ці системи мають бути компактними, надійними та адаптованими до обмеженого простору технічного контейнера. У цьому підпункті розглядаються компоненти захисту, автоматики, моніторингу, їхні функції та інтеграція в автономну систему будинку.

Система захисту відіграє ключову роль у запобіганні пошкодження обладнання та забезпеченні безпеки мешканців. Основні загрози для автономної системи включають перенапругу, коротке замикання, перегрів акумуляторів і перевантаження інвертора. Для їхньої нейтралізації застосовуються спеціалізовані пристрої, розташовані переважно в технічному контейнері. Наприклад, автоматичні вимикачі та запобіжники захищають електричні ланцюги від перевантажень, а пристрої захисту від перенапруги

(SPD) оберігають сонячні панелі та інвертор від стрибків напруги, спричинених блискавками чи нестабільною генерацією. Акумулятори типу LiFePO₄ оснащені вбудованою системою управління батареєю (BMS), яка контролює зарядку, розрядку та температуру, запобігаючи перегріву чи глибокому розряду. Для додаткової безпеки в технічному контейнері встановлюються датчики температури та диму, які сигналізують про потенційні аварійні ситуації.

Автоматика забезпечує ефективне управління системами електропостачання, опалення та водопостачання, оптимізуючи енергоспоживання та знижуючи потребу в ручному втручанні. Центральним елементом є розумний контролер, розташований у технічному контейнері, який координує роботу сонячних панелей, інвертора, акумуляторів і теплового насоса. Основні функції автоматики:

- Пріоритетне використання сонячної енергії перед акумуляторами для економії заряду.
- Автоматичне перемикання на резервні конвектори за низької температури або недостатньої генерації.
- Регулювання роботи насоса водопостачання залежно від рівня води в резервуарі.

Розумний контролер інтегрується з гібридним інвертором, що має вбудований MPPT-контролер для максимізації генерації сонячних панелей. Це дозволяє, наприклад, спрямовувати надлишок енергії на нагрів води в накопичувальному баку, коли акумулятори повністю заряджені.

Система моніторингу забезпечує контроль і аналіз роботи всіх компонентів автономної системи. Вона включає датчики, які відстежують параметри сонячних панелей (генерація енергії), акумуляторів (рівень заряду, температура), інвертора (споживана потужність) і теплового насоса (температура теплоносія). Для централізованого управління та моніторингу

системи використовується комунікаційний центр Victron Cerbo GX (або Color Control GX), який з'єднує інвертор, MPPT-контролери та батареї. Cerbo GX забезпечує передачу всіх даних у хмарний портал Victron Remote Management (VRM), де користувачі можуть моніторити систему онлайн, переглядати графіки напруг, струмів, стану заряду батарей, а також віддалено налаштовувати параметри системи. Мобільний додаток VictronConnect дозволяє локально налаштовувати трекери та інвертор через Bluetooth або Wi-Fi, а нова Cerbo GX має функцію "Smart Bluetooth" для зручного підключення без додаткових проводів. Безкоштовний хмарний сервіс VRM надає можливість віддаленого оновлення прошивки пристроїв і керування системою з будь-якого місця у світі, що значно розширює можливості аналітики та планування енергоспоживання [1].



Рис. 3.5. Схема системи моніторингу

Інтеграція систем захисту, автоматики та моніторингу відбувається в технічному контейнері, який слугує центральним вузлом управління. Усі компоненти з'єднані через ізольовані кабелі, що проходять через сендвіч-панелі, забезпечуючи компактність і безпеку. Наприклад, датчики температури в технічному контейнері можуть автоматично активувати вентиляцію, якщо

температура акумуляторів перевищує 25°C. Система також передбачає резервне живлення для контролера, щоб забезпечити його роботу в разі збоїв.

Для забезпечення надійності системи захисту та автоматики використовуються такі компоненти:

- Автоматичні вимикачі з номіналом 32–40 А для основних ланцюгів.
- SPD із номінальною напругою 600–1000 В для захисту від блискавок.
- Розумний контролер із підтримкою протоколів Modbus або Zigbee для інтеграції з іншими системами.

Висновок за розділом 3

Автономна система електропостачання модульного будинку забезпечує надійне живлення для 1–2 осіб завдяки 16 сонячним панелям AE Solar 505MD-132 (8,08 кВт), 3 MPPT Victron 250/100 24V, 8 акумуляторам Weco 5K3 (40 кВт·год) та інвертору Victron MultiPlus-II 48/8000, покриваючи середньодобове споживання 20–25 кВт·год і пікове навантаження 4–5 кВт, включаючи тепловий насос (3500 Вт). Кліматично-інсоляційний аналіз Миколаєва (1200–1400 кВт·год/м²/рік) підтверджує ефективність панелей при нахилі 45°, а системи захисту, автоматики та моніторингу з розумним контролером і BMS забезпечують безпеку, оптимальне енергокористування та віддалений контроль, що відповідає концепції енергоефективності та автономності.

РОЗДІЛ 4. СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ, КОНДИЦІОНУВАННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ

4.1. Вибір типу опалення для модульного будинку

Вибір типу опалення для модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного — є ключовим для забезпечення комфорту мешканців і енергоефективності системи. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і призначений для компактного проживання 1–2 осіб, система опалення має бути економічною, компактною та сумісною з автономним електропостачанням на основі сонячних панелей. У цьому підпункті розглядаються можливі типи опалення, їхні особливості та обґрунтування вибору оптимального рішення для модульного будинку в умовах клімату України [4].

Для модульного будинку важливим є баланс між тепловтратами, які, згідно з попередніми розрахунками, становлять близько 396 Вт за різниці температур 30°C, і доступною електроенергією від сонячних панелей. Основними варіантами опалення, які розглядаються, є електричні конвектори, інфрачервоні обігрівачі, тепла підлога та теплові насоси. Електричні конвектори прості в установці й недорогі, але споживають значну кількість електроенергії, що може перевантажувати акумулятори в зимовий період із низькою інсоляцією. Інфрачервоні обігрівачі ефективні для локального обігріву, але менш придатні для рівномірного розподілу тепла в компактному житловому контейнері площею 14 м².

Тепла підлога, особливо водяна, є привабливим варіантом завдяки рівномірному розподілу тепла та низькотемпературному режиму роботи, що знижує енергоспоживання. Вона добре інтегрується в конструкцію підлоги з сендвіч-панелей і забезпечує комфорт у зоні відпочинку та кухні. Однак сама по собі тепла підлога потребує джерела тепла, що приводить до розгляду теплових насосів як основного рішення. Теплові насоси використовують енергію зовнішнього середовища (повітря, ґрунту чи води) для обігріву, що

робить їх значно ефективнішими порівняно з прямим електричним опаленням. У контексті модульного будинку перевага надається повітряним тепловим насосам через їхню простоту встановлення та компактність [4].

Повітряний тепловий насос є оптимальним вибором для модульного будинку з кількох причин. По-перше, він має високий коефіцієнт перетворення енергії (COP), який зазвичай становить 3–4, що означає, що на 1 кВт спожитої електроенергії насос виробляє 3–4 кВт тепла. Це особливо важливо для будинку, який залежить від обмеженої генерації сонячних панелей узимку (5–10 кВт·год/добу). По-друге, повітряні теплові насоси не потребують складних земляних робіт, на відміну від ґрунтових, що знижує витрати на встановлення та робить їх придатними для модульної конструкції. По-третє, насос може бути розташований у технічному контейнері, а система водяної теплої підлоги — у житловому, що забезпечує ефективне використання простору та ізоляцію шумів від обладнання [4].

У кліматичних умовах України, де зимові температури можуть опускатися до -15°C , сучасні повітряні теплові насоси здатні працювати ефективно завдяки технологіям інверторного компресора, які адаптуються до низьких температур. Для додаткової надійності в періоди екстремальних холодів або пікових навантажень у житловому контейнері передбачається резервне опалення у вигляді електричних конвекторів. Це дозволяє компенсувати можливий дефіцит тепла, якщо генерація сонячних панелей буде недостатньою для живлення теплового насоса.

4.2. Використання теплових насосів: види, ефективність

Теплові насоси є основним елементом системи опалення модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного, забезпечуючи енергоефективне теплопостачання для компактного проживання. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і залежить від автономного електропостачання на основі сонячних панелей, тепловий насос має бути

економічним, компактним і адаптованим до кліматичних умов України. У цьому підпункті розглядаються види теплових насосів, їхні особливості, ефективність і обґрунтування вибору для модульного будинку [11].

Теплові насоси працюють за принципом перенесення тепла з одного середовища (повітря, ґрунту чи води) до іншого, використовуючи мінімальну кількість електроенергії. Основними видами теплових насосів, які можуть застосовуватися в модульному будинку, є повітряні, ґрунтові та водяні. Повітряні теплові насоси (типу "повітря-вода") беруть тепло з зовнішнього повітря і передають його в систему опалення, наприклад, водяну теплу підлогу. Вони прості в установці, не потребують значних земляних робіт і є компактними, що ідеально підходить для технічного контейнера. Однак їхня ефективність знижується за дуже низьких температур (нижче -15°C), що може бути обмеженням у холодні зими України.

Ґрунтові теплові насоси (типу "ґрунт-вода") використовують стабільну температуру ґрунту, що забезпечує вищу ефективність навіть у мороз. Вони мають коефіцієнт перетворення енергії (COP) у межах 4–5, що означає, що на 1 кВт електроенергії виробляється 4–5 кВт тепла. Проте встановлення ґрунтового насоса вимагає буріння свердловин або прокладання колекторів, що значно підвищує початкові витрати та ускладнює інтеграцію в модульну конструкцію будинку. Водяні теплові насоси, які використовують тепло підземних або поверхневих вод, також дуже ефективні (COP 4–6), але їхнє застосування обмежене через необхідність доступу до водойм, що не завжди можливо для модульного будинку.

Ефективність теплових насосів вимірюється показником COP, який залежить від типу насоса, температури зовнішнього середовища та конструкції системи опалення. Для модульного будинку, де тепловтрати становлять лише 396 Вт за різниці температур 30°C , повітряний тепловий насос із COP 3–4 є достатньо ефективним. Наприклад, для компенсації тепловтрат і підтримки температури $+20^{\circ}\text{C}$ у житловому контейнері насос потужністю 3–5 кВт

споживатиме 0,75–1,25 кВт електроенергії, що відповідає можливостям сонячних панелей (5–10 кВт·год/добу взимку). Сучасні повітряні насоси з інверторними компресорами адаптуються до низьких температур, зберігаючи стабільну ефективність навіть за -15°C , що робить їх придатними для клімату України [11].

Повітряний тепловий насос є оптимальним вибором для модульного будинку через кілька переваг. По-перше, його встановлення не потребує складних земляних робіт, що знижує витрати та спрощує монтаж у межах компактної конструкції. По-друге, насос легко інтегрується з водяною теплою підлогою, яка забезпечує рівномірний розподіл тепла в житловому контейнері. По-третє, повітряні насоси можуть працювати в режимі охолодження влітку, що додає універсальності системі. Для підвищення ефективності насос доповнюється сонячним колектором, який нагріває воду в накопичувальному баку, зменшуючи навантаження на електросистему.

Незважаючи на переваги, повітряні теплові насоси мають обмеження, пов'язані зі зниженням COP за екстремально низьких температур. Для таких випадків у модульному будинку передбачені резервні електричні конвектори, які активуються за температури нижче -15°C або в разі пікових навантажень. Це забезпечує надійність системи опалення навіть у найхолодніші періоди, коли генерація сонячних панелей може бути обмеженою.

4.3. Рекуперація повітря та вентиляція приміщень

Рекуперація повітря та вентиляція є важливими компонентами системи теплопостачання модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і характеризується високою герметичністю, ефективна вентиляція необхідна для забезпечення свіжого повітря, підтримання здорового мікроклімату та мінімізації тепловтрат. Рекуперація повітря дозволяє повернути частину тепла з відпрацьованого повітря, що особливо важливо для енергоефективного будинку, який залежить

від автономного електропостачання. У цьому підпункті розглядаються принципи рекуперації, типи вентиляційних систем і їхнє застосування в модульному будинку в умовах клімату України [4].

Герметична конструкція модульного будинку, зумовлена використанням сендвіч-панелей, зменшує тепловтрати, але створює потребу в контрольованій вентиляції. Без належного повітрообміну в житловому контейнері площею 14 м² може накопичуватися волога, вуглекислий газ і забруднюючі речовини, що негативно впливає на комфорт і здоров'я мешканців. Традиційна природна вентиляція через вікна чи витяжки призводить до значних тепловтрат, особливо взимку, коли температура зовнішнього повітря може опускатися до -15°C. Рекуперація повітря вирішує цю проблему, дозволяючи подавати свіже повітря, одночасно повертаючи до 85% тепла з відпрацьованого повітря за допомогою теплообмінника.

Основним елементом системи вентиляції з рекуперацією є рекуператор — пристрій, який забезпечує теплообмін між вихідним і вхідним потоками повітря. У модульному будинку найдоцільніше використовувати пластинчастий рекуператор, який є компактним і ефективним для невеликих приміщень. У такому пристрої тепле відпрацьоване повітря з житлового контейнера проходить через тонкі пластини, передаючи тепло холодному зовнішньому повітрю, що надходить. Це дозволяє підтримувати температуру в приміщенні без додаткового нагріву, зменшуючи навантаження на тепловий насос. Рекуператор розміщується в житловому контейнері, щоб мінімізувати довжину вентиляційних каналів і спростити інтеграцію в компактну конструкцію.

Ефективність рекуператора залежить від його конструкції та умов експлуатації. Для модульного будинку рекомендується пристрій із ефективністю теплообміну 80–85%, що дозволяє економити значну частину тепла, яке інакше втрачалося б через вентиляцію. Наприклад, за тепловтрат 396 Вт і температури зовнішнього повітря -10°C рекуператор може зменшити втрати тепла через вентиляцію на 70–80%, що еквівалентно економії 0,2–0,3

кВт·год електроенергії на годину. Такі показники особливо важливі для будинку, де електроенергія генерується сонячними панелями з обмеженою продуктивністю взимку (5–10 кВт·год/добу).

Вентиляційна система модульного будинку має бути компактною і енергоефективною, щоб відповідати обмеженням автономного електропостачання. Рекуператор із низьким енергоспоживанням (20–50 Вт) забезпечує необхідний повітрообмін на рівні 30–50 м³/год для 1–2 осіб, що відповідає санітарним нормам. Для підвищення ефективності система може бути оснащена датчиками вологості та CO₂, які автоматично регулюють інтенсивність вентиляції залежно від якості повітря в житловому контейнері. Це знижує енергоспоживання та забезпечує комфорт без надмірного провітрювання.

У технічному контейнері вентиляція має іншу функцію — охолодження обладнання, такого як інвертор і акумулятори, які чутливі до перегріву. Тут застосовується примусова вентиляція з автоматичними клапанами, що активуються за температури вище 25°C. Рекуперація в технічному контейнері не потрібна, оскільки тепловий комфорт не є пріоритетом, а основна мета — підтримання оптимальних умов для роботи обладнання.

4.4. Інтеграція систем опалення з автономним електропостачанням

Інтеграція систем опалення з автономним електропостачанням є ключовим аспектом забезпечення енергоефективності та комфорту в модульному будинку з двох контейнерів — житлового та технічного. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і повністю залежить від сонячних панелей для електроживлення, опалювальна система має бути оптимізованою для роботи з обмеженою генерацією електроенергії, особливо в зимовий період. У цьому підпункті розглядаються принципи інтеграції теплового насоса, теплої підлоги, рекуператора та резервних конвекторів із системою

електропостачання, а також їхня взаємодія для забезпечення стабільного теплопостачання в кліматичних умовах України [4, 11].

Система опалення модульного будинку базується на повітряному тепловому насосі типу "повітря-вода", який живить водяну теплу підлогу в житловому контейнері, доповнену сонячним колектором для нагріву гарячої води та резервними електричними конвекторами. Основне джерело електроенергії — сонячні панелі потужністю 5–6 кВт, які генерують 20–25 кВт·год/добу влітку та 5–10 кВт·год/добу взимку, накопичуючи енергію в акумуляторах LiFePO₄ ємністю 8–10 кВт·год. Тепловий насос, що споживає 0,75–1,25 кВт електроенергії для виробництва 3–5 кВт тепла, є основним споживачем, тому його інтеграція з електросистемою вимагає ретельного балансування.

Гібридний інвертор відіграє центральну роль у координації електропостачання для опалювальної системи. Він забезпечує пріоритетне використання сонячної енергії для живлення теплового насоса, спрямовуючи надлишок на зарядку акумуляторів або нагрів води в накопичувальному баку через сонячний колектор. Наприклад, у сонячний зимовий день, коли генерація досягає 8 кВт·год, інвертор може розподілити 4 кВт·год на тепловий насос, 2 кВт·год на акумулятори і 2 кВт·год на гарячу воду. У періоди низької інсоляції акумулятори забезпечують живлення насоса, підтримуючи опалення протягом 1–2 діб автономії. Розумний контролер, розташований у технічному контейнері, оптимізує цей процес, аналізуючи дані від системи моніторингу про генерацію, споживання та погодні умови.

Вентиляційна система з рекуператором, яка зменшує тепловтрати на 70–80%, також інтегрується з електросистемою. Рекуператор споживає лише 20–50 Вт, що мінімально впливає на загальне енергоспоживання, але значно знижує навантаження на тепловий насос. Датчики вологості та CO₂, підключені до розумного контролера, автоматично регулюють роботу рекуператора, забезпечуючи вентиляцію лише за потреби. Це дозволяє економити

електроенергію, яка могла б витрачатися на додаткове опалення для компенсації тепловтрат через вентиляцію.

Резервні електричні конвектори, розташовані в житловому контейнері, активуються в екстремальних умовах, наприклад, за температури нижче -15°C , коли ефективність теплового насоса знижується. Вони споживають 0,5–1 кВт електроенергії, що може бути забезпечено акумуляторами в періоди пікового навантаження. Розумний контролер автоматично перемикає систему на конвектори, якщо генерація сонячних панелей або заряд акумуляторів недостатні для теплового насоса, гарантуючи безперебійне опалення. Така інтеграція забезпечує гнучкість і надійність системи.

Для підвищення енергоефективності всі компоненти опалювальної системи — тепловий насос, рекуператор і конвектори — підключені до системи моніторингу, яка відстежує їхнє енергоспоживання та ефективність. Користувач може контролювати роботу через мобільний додаток, отримуючи дані про стан акумуляторів і прогноз генерації. Це дозволяє оптимізувати режими роботи, наприклад, знижувати температуру теплої підлоги вночі, коли мешканці менш активні, або спрямовувати енергію на гарячу воду вдень.

Висновок за розділом 4

Система опалення, кондиціонування та вентиляції модульного будинку забезпечує комфортне проживання 1–2 осіб завдяки інтеграції повітряного теплового насоса (3500 Вт, COP 3–4), водяної теплої підлоги, рекуператора (80–85% ефективності) та резервних електроконвекторів із автономним електропостачанням від 16 сонячних панелей AE Solar 505MD-132 (8,08 кВт) і 8 акумуляторів Weco 5K3 (40 кВт·год). Розумний контролер і гібридний інвертор оптимізують розподіл енергії, забезпечуючи стабільне опалення за тепловтрат 396 Вт, вентиляцію з мінімальними втратами тепла та резервне живлення в екстремальних умовах, що відповідає клімату України та концепції енергоефективності.

РОЗДІЛ 5. АВТОНОМНЕ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА КАНАЛІЗАЦІЯ

5.1. Джерела водопостачання

Автономна система водопостачання модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного — має забезпечувати стабільне постачання води для побутових потреб 1–2 осіб, враховуючи компактність конструкції на основі сендвіч-панелей та відсутність підключення до централізованих мереж. Вибір джерел водопостачання є першим кроком у проєктуванні системи, оскільки він визначає її структуру, обсяг резервуарів і методи очищення. У цьому підпункті розглядаються можливі джерела водопостачання, їхні особливості та обґрунтування вибору оптимального рішення для модульного будинку в умовах клімату України [5, 6].

Основною вимогою до системи водопостачання є забезпечення добової потреби у воді, яка для 1–2 осіб становить приблизно 100–150 літрів, враховуючи пиття, приготування їжі, гігієнічні потреби та технічне використання. У регіонах України, де централізоване водопостачання недоступне, основними джерелами є дощова вода, підземні води (свердловини чи колодязі) та привозна вода. Кожен із цих варіантів має свої переваги та обмеження, які необхідно врахувати для забезпечення автономії та ефективності системи.

Збір дощової води є привабливим рішенням для модульного будинку завдяки достатній кількості опадів у центральній Україні (500–600 мм на рік). Дощова вода збирається з даху контейнерів, який має площу близько 30 м², і спрямовується через водостічні труби до резервуара, розташованого в технічному контейнері або під землею. За середньорічної норми опадів із даху можна зібрати до 15–18 м³ води на рік, що теоретично покриває річні потреби (36–54 м³ для 100–150 л/добу). Однак дощова вода потребує фільтрації для видалення пилу, листя та інших забруднень, а також періодичного поповнення в посушливі місяці, коли опади мінімальні.

Підземні води, доступні через свердловини або колодязі, забезпечують більш стабільне джерело, оскільки не залежать від погодних умов. У центральній Україні глибина залягання водоносних шарів становить 10–30 м, що робить буріння свердловини технічно здійсненним. Вода зі свердловини зазвичай чистіша, ніж дощова, але може містити мінерали чи домішки, що потребують додаткового очищення. Основним недоліком є висока початкова вартість буріння та встановлення насосного обладнання, а також необхідність регулярного обслуговування свердловини, що може бути ускладненим для компактного модульного будинку.

Привозна вода є найпростішим, але найменш автономним рішенням. Вона передбачає доставку води в цистернах і зберігання в резервуарах. Для модульного будинку це може бути резервним варіантом, але регулярна залежність від постачальників суперечить концепції автономності. Крім того, транспортування води збільшує витрати та ускладнює логістику, особливо в зимовий період, коли дороги можуть бути важкодоступними.

Оптимальним рішенням для модульного будинку є комбінований підхід: основним джерелом слугує збір дощової води, доповнений свердловиною як резервним джерелом. Дощова вода покриває більшу частину потреб завдяки низьким витратам на збір і достатній кількості опадів, а свердловина забезпечує стабільне постачання в періоди посухи чи для питних цілей після належного очищення. Резервуар для дощової води об'ємом 2–3 м³, розташований у технічному контейнері, забезпечує запас на 15–20 діб за середнього споживання. Система фільтрації, що включає механічні та вугільні фільтри, гарантує якість води для побутових потреб.

5.2. Насосне обладнання та системи фільтрації

Насосне обладнання та системи фільтрації є ключовими компонентами автономної системи водопостачання модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і

використовує комбіноване водопостачання (дощову воду та свердловину), ці системи забезпечують подачу, очищення та розподіл води для побутових потреб 1–2 осіб. Компактність, енергоефективність і надійність обладнання є критично важливими для інтеграції в обмежений простір технічного контейнера та відповідності автономному електропостачанню. У цьому підпункті розглядаються типи насосного обладнання, системи фільтрації, їхні особливості та обґрунтування вибору для модульного будинку в умовах клімату України [5].

Насосне обладнання відповідає за подачу води з джерел (резервуара для дощової води або свердловини) до системи водопостачання будинку. Для модульного будинку, де добова потреба становить 100–150 літрів, необхідний насос із низьким енергоспоживанням, щоб мінімізувати навантаження на сонячні панелі та акумулятори. Для дощової води, що зберігається в резервуарі об'ємом 2–3 м³, оптимальним є поверхневий насос, розташований у технічному контейнері. Такі насоси компактні, прості в обслуговуванні та споживають 500–750 Вт, що дозволяє жити їх від гібридного інвертора навіть у періоди низької інсоляції. Для свердловини, яка є резервним джерелом, використовується занурювальний насос, здатний піднімати воду з глибини 10–30 м. Занурювальні насоси мають вищу потужність (800–1000 Вт), але їхнє використання обмежується періодами, коли дощової води недостатньо.

Енергоефективність насосів є критично важливою, оскільки вони працюють 1–2 години на добу для забезпечення тиску в системі та поповнення внутрішнього бака в житловому контейнері. Поверхневий насос для дощової води, наприклад, споживає близько 0,5–1,5 кВт·год/добу, що становить лише 3–5% від зимової генерації сонячних панелей (5–10 кВт·год/добу). Занурювальний насос для свердловини активується рідше, але його вища потужність вимагає координації з розумним контролером, який вмикає насос лише за достатнього заряду акумуляторів або під час пікової генерації сонячних панелей. Обидва насоси оснащуються автоматичними реле тиску, які

підтримують стабільний тиск у системі (2–3 бари) і вимикають обладнання, коли бак заповнений, що знижує енергоспоживання.

Система фільтрації забезпечує якість води, придатної для побутових і питних потреб. Дощова вода, що збирається з даху контейнерів, містить пил, листя та інші забруднення, тому потребує багатоступеневої очистки. На першому етапі встановлюється механічний фільтр грубої очистки (50–100 мкм), який видаляє великі частинки перед надходженням води в резервуар. Далі вода проходить через вугільний фільтр, що усуває органічні сполуки та запахи, і фільтр тонкої очистки (5–10 мкм) для видалення дрібних домішок. Для питних цілей додатково використовується зворотний осмос, який видаляє до 99% розчинених солей і мікроорганізмів, забезпечуючи високу якість води. Система зворотного осмосу встановлюється в житловому контейнері під мийкою, щоб мінімізувати втрати простору [6].

Вода зі свердловини, як правило, чистіша, але може містити підвищений вміст мінералів, заліза або марганцю, що характерно для центральної України. Для її очищення застосовується механічний фільтр грубої очистки, за яким слідує іонообмінний або вугільний фільтр для видалення мінеральних домішок. Якщо лабораторний аналіз води виявляє бактеріальне забруднення, додатково встановлюється ультрафіолетовий стерилізатор, який знищує мікроорганізми без використання хімікатів. Усі фільтри розміщуються в технічному контейнері поруч із насосами, що спрощує їхнє обслуговування та заміну картриджів.

Інтеграція насосів і фільтрів із системою електропостачання забезпечується гібридним інвертором і розумним контролером. Контролер відстежує рівень води в резервуарі та внутрішньому баку, активуючи насоси лише за потреби, що знижує енергоспоживання. Система моніторингу дозволяє користувачам через мобільний додаток перевіряти стан фільтрів і отримувати сповіщення про необхідність їхньої заміни. Для захисту від замерзання взимку резервуар і труби в технічному контейнері ізолюються, а насоси оснащуються датчиками температури, які вимикають обладнання за температури нижче 0°C.

5.3. Вибір системи очищення стічних вод

Система очищення стічних вод є невід'ємною частиною автономного водопостачання модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і призначений для компактного проживання 1–2 осіб без підключення до централізованої каналізації, очищення стічних вод має бути ефективним, компактным і екологічно безпечним. Стічні води, що утворюються від побутових потреб (кухня, душ, туалет), потребують обробки для запобігання забрудненню довкілля та відповідності санітарним нормам. У цьому підпункті розглядаються можливі системи очищення стічних вод, їхні особливості та обґрунтування вибору оптимального рішення для модульного будинку в умовах клімату України.

Добовий обсяг стічних вод для 1–2 осіб становить приблизно 100–150 літрів, враховуючи середнє споживання води для гігієнічних і побутових цілей. Ці стоки поділяються на "сірі" (від кухні та душу) та "чорні" (від туалету), що впливає на вибір системи очищення. Основними варіантами для автономного будинку є септики, біологічні очисні станції та компостувальні туалети. Кожен із них має свої переваги, але вибір залежить від компактності, енергоефективності та можливості інтеграції з обмеженим простором модульного будинку.

Септик є традиційним рішенням, яке передбачає механічне осадження твердих частинок у герметичному резервуарі з подальшим дренажем рідкої фракції в ґрунт через фільтраційні поля. Для модульного будинку септик об'ємом 1–2 м³ міг би обробляти стоки, але потребує значної площі для дренажного поля, що може бути проблематичним на невеликій ділянці. Крім того, септик вимагає періодичного відкачування осаду (1–2 рази на рік), що збільшує експлуатаційні витрати та залежність від зовнішніх служб. У зимових умовах України септик потребує утеплення, щоб запобігти замерзанню, що додає складнощів до його встановлення.

Біологічна очисна станція забезпечує глибше очищення стічних вод за допомогою аеробних бактерій, які розкладають органічні речовини. Такі системи компактніші, ніж септики, і дозволяють очищати воду до рівня, придатного для скидання в ґрунт або використання для технічних цілей, наприклад, поливу. Біологічна станція для 1–2 осіб займає мало місця (1–2 м²) і може бути встановлена поруч із технічним контейнером. Однак вона потребує електроенергії (50–100 Вт для компресора, що забезпечує аерацію), що створює додаткове навантаження на сонячні панелі та акумулятори. У кліматі України станція також потребує захисту від замерзання, але її ефективність залишається стабільною за низьких температур завдяки ізоляції.

Компостувальний туалет пропонує альтернативний підхід, розділяючи "чорні" та "сірі" стоки. Він перетворює фекалії на компост за допомогою природних процесів без використання води, що значно зменшує обсяг стічних вод. "Сірі" стічні води при цьому обробляються простішим фільтраційним блоком, наприклад, компактним септиком або біофільтром. Компостувальний туалет не потребує електроенергії та є екологічним, але вимагає регулярного обслуговування (видалення компосту раз на 6–12 місяців) і зміни звичок користувачів, що може бути незручним. Його компактність ідеально підходить для модульного будинку, але обробка "сірих" стоків усе ще потребує додаткової системи.

Оптимальним рішенням для модульного будинку є комбінація компостувального туалету та біологічної очисної станції для "сірих" стоків. Компостувальний туалет, розташований у житловому контейнері, усуває "чорні" стоки, зменшуючи загальний обсяг стічних вод до 60–80 літрів на добу. Біологічна станція обробляє "сірі" стоки від кухні та душу, забезпечуючи очищення до рівня, безпечного для скидання в ґрунт. Компактна станція (об'ємом 0,5–1 м³) встановлюється біля технічного контейнера, а її енергоспоживаюча (0,05–0,1 кВт·год/добу) є незначним порівняно з генерацією сонячних панелей (5–10 кВт·год/добу взимку). Система утеплюється для

захисту від морозів, а розумний контролер регулює роботу компресора, активуючи його лише за потреби.

5.4. Схема та компонування водопровідно-каналізаційної системи

Водопровідно-каналізаційна система модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного — забезпечує подачу чистої води для побутових потреб і відведення стічних вод, зберігаючи автономність і компактність конструкції на основі сендвіч-панелей. Оскільки будинок призначений для проживання 1–2 осіб і не підключений до централізованих мереж, система має бути ефективною, енергоощадною та адаптованою до обмеженого простору. У цьому підпункті розглядаються схема, компонування та принципи функціонування водопровідно-каналізаційної системи модульного будинку в умовах клімату України.

Водопровідна система забезпечує подачу води з двох джерел — резервуара для дощової води та свердловини — до точок споживання в житловому контейнері (кухня, ванна кімната). Основним джерелом є дощова вода, що збирається з даху площею 30 м² і зберігається в резервуарі об'ємом 2–3 м³, розташованому в технічному контейнері. Поверхневий насос потужністю 500–750 Вт подає воду з резервуара через систему фільтрації (механічний, вугільний і тонкий фільтри) до внутрішнього бака об'ємом 50–100 літрів у житловому контейнері. Для питних цілей вода додатково очищається системою зворотного осмосу, встановленою під кухонною мийкою. Свердловина слугує резервним джерелом, і занурювальний насос (800–1000 Вт) активується лише за недостатнього рівня дощової води, подаючи воду через окремий фільтраційний блок (механічний і іонообмінний фільтри) до того ж внутрішнього бака.

Компонування водопровідної системи оптимізовано для мінімізації втрат простору та енергії. У технічному контейнері розташовані резервуар, поверхневий насос, фільтри та трубопроводи, які проходять через ізольовані канали в сендвіч-панелях до житлового контейнера. Труби виготовлені з

поліпропілену, що забезпечує довговічність і стійкість до корозії. Для захисту від замерзання взимку резервуар і труби утеплюються, а насос оснащений датчиком температури, який вимикає обладнання за температури нижче 0°C. Розумний контролер, інтегрований із гібридним інвертором, відстежує рівень води в резервуарі та баку, активуючи насоси лише за потреби, що знижує споживання електроенергії до 0,5–1,5 кВт·год/добу, сумісного з генерацією сонячних панелей (5–10 кВт·год/добу взимку).

Каналізаційна система обробляє стічні води, які поділяються на "сірі" (від кухні та душу) та "чорні" (від туалету). Для мінімізації обсягу стоків (100–150 літрів на добу) у житловому контейнері встановлено компостувальний туалет, який усуває "чорні" стоки, перетворюючи їх на компост без використання води. "Сірі" стоки відводяться через каналізаційні труби діаметром 50 мм до біологічної очисної станції об'ємом 0,5–1 м³, розташованої біля технічного контейнера. Станція використовує аеробні бактерії для очищення води до рівня, безпечного для скидання в ґрунт через дренажну систему. Компресор станції (50–100 Вт) живиться від гібридного інвертора, споживаючи лише 0,05–0,1 кВт·год/добу. Труби каналізації утеплюються, а станція оснащується ізоляцією для роботи в зимових умовах України.

Інтеграція водопровідно-каналізаційної системи з електропостачанням забезпечується розумним контролером, який координує роботу насосів, компресора очисної станції та системи моніторингу. Моніторинг дозволяє відстежувати рівень води, стан фільтрів і потребу в обслуговуванні компостувального туалету через мобільний додаток. Компактне розташування обладнання в технічному контейнері та використання ізованих труб через сендвіч-панелі забезпечують ефективне використання простору. Дренажна система для очищених "сірих" стоків розташована на відстані 5–10 м від будинку, щоб уникнути забруднення ділянки.

Висновок за розділом 5

Автономна водопровідно-каналізаційна система модульного будинку забезпечує ефективне водопостачання та очищення стоків для 1–2 осіб без централізованих мереж, використовуючи комбінацію дощової води (15–18 м³/рік) і свердловини, компостувальний туалет і біологічну очисну станцію. Поверхневий (500–750 Вт) і занурювальний (800–1000 Вт) насоси, багатоступенева фільтрація (механічна, вугільна, зворотний осмос) та енергоощадне керування через розумний контролер забезпечують стабільне постачання 100–150 л/добу з мінімальним енергоспоживанням (0,5–1,6 кВт·год/добу). Компостувальний туалет зменшує стоки до 60–80 л/добу, а біологічна станція (0,05–0,1 кВт·год/добу) очищає "сірі" стоки, забезпечуючи екологічність і відповідність клімату України.

РОЗДІЛ 6. ПІДСУМОК КОНЦЕПЦІЇ АВТОНОМНОГО МОДУЛЬНОГО БУДИНКУ

6.1. Узагальнення ідеї автономного будинку

Ідея автономного модульного будинку полягає в створенні компактного, енергоефективного та екологічного житла, яке забезпечує комфортне проживання 1–2 осіб без підключення до централізованих мереж. Будинок складається з двох контейнерів — житлового (14 м²) та технічного, і базується на сендвіч-панелях, які забезпечують високу теплоізоляцію та мінімізують тепловтрати. Автономність досягається завдяки інтеграції систем електропостачання (16 сонячних панелей AE Solar 505MD-132 загальною потужністю 8,08 кВт, 3 MPPT контролери Victron 250/100 24V, 8 акумуляторів Weco 5K3 ємністю 40 кВт·год), теплопостачання (тепловий насос потужністю 3500 Вт, тепла підлога), водопостачання (дощова вода, свердловина) та каналізації (компостувальний туалет, біологічна очисна станція). Такий підхід дозволяє зменшити залежність від зовнішніх ресурсів, знизити вуглецевий слід і адаптувати будинок до кліматичних умов України, де температура може коливатися від -15°C взимку до +30°C влітку.

Основною перевагою концепції є її модульність і гнучкість. Контейнерна конструкція спрощує транспортування, монтаж і масштабування, а використання заводських сендвіч-панелей скорочує будівельні відходи. Автономні системи, керовані розумним контролером, забезпечують оптимальне використання ресурсів, що особливо важливо в умовах обмеженої генерації сонячної енергії взимку (5–10 кВт·год/добу). Екологічна спрямованість будинку підкріплюється використанням відновлюваних джерел енергії, економією води та безпечною утилізацією стоків, що відповідає принципам сталого розвитку.

6.2. Повна концепція та її обґрунтування

Повна концепція автономного модульного будинку поєднує архітектурно-планувальні рішення, енергоефективні матеріали та інноваційні інженерні системи для забезпечення автономності, комфорту та екологічності. Житловий контейнер включає компакту зону для проживання з кухнею, санвузлом і спальним місцем, тоді як технічний контейнер містить обладнання для електро-, тепло- та водопостачання. Сендвіч-панелі з теплоізоляцією зменшують тепловтрати до 396 Вт за різниці температур 30°C, що знижує енергоспоживання на опалення.

Система електропостачання базується на 16 сонячних панелях AE Solar 505MD-132 (8,08 кВт), 3 MPPT контролерах Victron 250/100 24V і 8 акумуляторах Weco 5K3 (40 кВт·год), що забезпечують автономію на 1–2 доби за низької інсоляції. Тепловий насос "повітря-вода" потужністю 3500 Вт з COP 3–4 живить теплу підлогу, а рекуператор із ефективністю 80–85% мінімізує тепловтрати через вентиляцію. Водопостачання реалізовано через збір дощової води (15–18 м³/рік) і свердловину з багатоступеневою фільтрацією для побутових і питних потреб. Каналізаційна система включає компостувальний туалет і біологічну очисну станцію, що обробляє "сірі" стоки з мінімальним енергоспоживанням (0,05–0,1 кВт·год/добу).

Обґрунтування концепції базується на її відповідності сучасним викликам: високій вартості енергоресурсів, потребі в екологічних рішеннях і попиті на мобільне житло. У порівнянні з традиційними будинками модульний будинок зменшує викиди CO₂ на 2–3 тонни на рік завдяки відновлюваній енергії та економії води на 30% через компостувальний туалет. Компактність і заводське виробництво знижують витрати на будівництво, а розумне керування системами підвищує ефективність експлуатації. Концепція адаптована до клімату України з урахуванням даних "Solar Paths Mykolaiv" (нахил панелей 45°, азимут 0°, "Performance Ratio and Solar Fraction"), що робить її практичною для регіонів із обмеженим доступом до централізованих мереж.

Висновок за розділом 6

Концепція автономного модульного будинку поєднує енергоефективність, екологічність і автономність, забезпечуючи комфортне проживання з мінімальним впливом на довкілля. Використання 16 сонячних панелей AE Solar (8,08 кВт), акумуляторів Weco 5K3 (40 кВт·год), теплового насоса (3500 Вт), дощової води та компостувального туалету обґрунтовує доцільність проєкту в умовах України, пропонуючи економічно вигідне та стає рішення для сучасного житла.

РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

7.1. Загальні вимоги охорони праці у будівництві модульних будинків

Охорона праці під час будівництва модульних будинків є критично важливою для забезпечення безпеки працівників, запобігання травматизму та створення належних умов праці. Модульні будинки, що складаються з двох контейнерів — житлового та технічного, виготовляються з використанням сендвіч-панелей і потребують виконання низки будівельних, монтажних та електротехнічних робіт. Специфіка таких проєктів полягає в компактності конструкцій, застосуванні легких матеріалів і частковій збірці на заводі, що впливає на організацію заходів з охорони праці. У цьому підпункті розглядаються загальні вимоги охорони праці, які необхідно дотримуватися під час будівництва модульних будинків в умовах України [3].

Будівництво модульних будинків включає підготовку майданчика, транспортування та встановлення контейнерів, монтаж сендвіч-панелей, прокладання комунікацій (електрика, водопостачання, каналізація) і встановлення обладнання, такого як сонячні панелі чи теплові насоси. Кожен етап пов'язаний із потенційними ризиками, такими як падіння з висоти, ураження електричним струмом, травми від інструментів чи важких елементів конструкції. Для мінімізації цих ризиків усі працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту, включаючи каски, захисні окуляри, рукавиці, взуття з посиленням носком і, за необхідності, страхувальні пояси для робіт на висоті. Використання засобів захисту є обов'язковим і контролюється відповідальними особами на будівельному майданчику.

Перед початком робіт необхідно провести інструктаж із техніки безпеки, ознайомивши працівників із особливостями проєкту, потенційними небезпеками та правилами поведінки з обладнанням. Наприклад, під час монтажу сонячних панелей на даху контейнерів працівники повинні знати, як безпечно працювати на висоті та уникати контакту з електричними

компонентами. Інструктаж також охоплює правила використання будівельних інструментів, таких як дрилі, зварювальні апарати чи різальні машини, щоб запобігти травмам. Додатково, для робіт із електрикою чи підключення теплового насоса залучаються лише кваліфіковані фахівці з відповідними допусками, що знижує ризик аварій.

Організація будівельного майданчика відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки. Майданчик має бути огорожений, щоб запобігти доступу сторонніх осіб, а зони зберігання матеріалів і роботи техніки чітко позначені. Сендвіч-панелі, контейнери та інші елементи конструкції зберігаються в стабільному положенні, щоб уникнути їхнього падіння. Роботи з підйому важких компонентів, таких як контейнери чи резервуари для води, виконуються за допомогою сертифікованих кранів і під наглядом сигнальника. У зимовий період, коли температура може опускатися нижче 0°C, майданчик очищається від снігу та льоду, а працівники забезпечуються теплим одягом і регулярними перервами для обігріву.

Пожежна безпека є ще одним важливим аспектом. На майданчику розміщуються вогнегасники, а зварювальні роботи проводяться з дотриманням протипожежних заходів, таких як ізоляція іскор і наявність засобів гасіння. Матеріали, що легко спалахують, зберігаються окремо від зон із відкритим вогнем чи електричним обладнанням. Крім того, під час монтажу електричних систем, таких як гібридний інвертор чи акумулятори, забезпечується захист від короткого замикання та перевантаження, а всі кабелі прокладаються в ізольованих каналах.

Гігієнічні умови також є частиною вимог охорони праці. На будівельному майданчику облаштовуються тимчасові санітарні зони з доступом до питної води та біотуалетів. Працівники забезпечуються можливістю для відпочинку та прийому їжі в захищеному від погодних умов місці. У разі тривалого будівництва влітку передбачається захист від спеки, наприклад, тенти чи регулярне постачання води, щоб запобігти тепловим ударами.

7.2. Аналіз потенційних ризиків при експлуатації автономних систем

Експлуатація автономних систем модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного — пов'язана з використанням складних технічних рішень, таких як сонячні панелі, акумулятори, тепловий насос, системи водопостачання та каналізації. Ці системи забезпечують комфорт і автономність, але їхня робота супроводжується потенційними ризиками, які можуть вплинути на безпеку мешканців, довговічність обладнання та навколишнє середовище. Оскільки будинок базується на сендвіч-панелях і розрахований на проживання 1–2 осіб, аналіз ризиків є важливим для запобігання аварій і забезпечення надійної експлуатації в умовах клімату України. У цьому підпункті розглядаються основні ризики, пов'язані з автономними системами електропостачання, теплопостачання, водопостачання та каналізації, а також заходи щодо їхньої мінімізації.

Одним із ризиків, пов'язаних із системою електропостачання, є ймовірність ураження електричним струмом або короткого замикання. Сонячні панелі, гібридний інвертор і акумулятори LiFePO₄, розташовані в технічному контейнері, працюють із високою напругою (до 200 В). Неправильне поводження під час технічного обслуговування, наприклад, заміна кабелів чи перевірка акумуляторів, може призвести до травм. Крім того, перегрівання акумуляторів через недостатню вентиляцію або перевантаження може викликати їхню деградацію. У зимовий період сніг на сонячних панелях знижує генерацію, що може призвести до дефіциту електроенергії для теплового насоса чи насосів водопостачання. Для зменшення цих ризиків необхідно регулярно перевіряти ізоляцію кабелів, забезпечувати вентиляцію технічного контейнера та очищати панелі від снігу. Система управління батареєю (BMS) і автоматичні вимикачі захищають від перевантажень, а доступ до електрообладнання обмежується для некваліфікованих осіб.

Система теплопостачання, що базується на повітряному тепловому насосі та водяній теплій підлозі, також має свої ризики. Зниження ефективності насоса

за температури нижче -15°C може призвести до недостатнього рівня обігріву, особливо якщо генерація обмежена. Поломка насоса або витік теплоносія з контуру теплої підлоги може зупинити опалення, що критично в зимовий період.

Водопостачання, що залежить від дощової води та свердловини, несе ризик нестачі води в посушливі періоди, коли опади мінімальні. Замерзання резервуара чи труб у технічному контейнері взимку може зупинити подачу води. Крім того, забруднення дощової води пилом або мікроорганізмами через несвоєчасну заміну фільтрів може погіршити її якість. Для мінімізації цих ризиків резервуар і труби утеплюються, а насоси оснащуються датчиками температури. Система фільтрації, що включає механічні, вугільні фільтри та зворотний осмос, регулярно обслуговується, а розумний контролер сповіщає про необхідність заміни картриджів. Свердловина як резервне джерело забезпечує воду в періоди посухи.

Каналізаційна система, що складається з компостувального туалету та біологічної очисної станції для "сірих" стоків, має ризик засмічення труб або переповнення очисної станції за неправильної експлуатації. Недостатня аерація в біологічній станції через поломку компресора може знизити якість очищення, що загрожує забрудненням ґрунту. Компостувальний туалет вимагає регулярного видалення компосту, і нехтування цим може призвести до неприємних запахів або антисанітарних умов. Для усунення цих ризиків станція утеплюється для захисту від морозів, а компресор підключається до системи моніторингу, яка сигналізує про несправності. Інструкція з експлуатації туалету надається мешканцям, а розумний контролер нагадує про необхідність обслуговування.

Загальним ризиком для всіх систем є людський фактор, зокрема неправильне використання обладнання чи ігнорування інструкцій. Наприклад, перевантаження електричної системи через одночасне ввімкнення кількох приладів може розрядити акумулятори. Для запобігання цьому система моніторингу

через мобільний додаток дозволяє відстежувати енергоспоживання, стан обладнання та отримувати сповіщення про потенційні проблеми. Регулярне навчання мешканців і технічне обслуговування систем спеціалістами забезпечують безпечну експлуатацію.

7.3. Екологічні аспекти та зменшення вуглецевого сліду

Екологічність є одним із ключових принципів проєктування та експлуатації модульного будинку з двох контейнерів — житлового та технічного, побудованого на основі сендвіч-панелей. Автономні системи електропостачання, теплопостачання, водопостачання та каналізації спрямовані на зменшення впливу на довкілля та зниження вуглецевого сліду, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку. Оскільки будинок розрахований на проживання 1–2 осіб і функціонує без підключення до централізованих мереж, його екологічні аспекти відіграють важливу роль у забезпеченні мінімального впливу на природу в умовах клімату України. У цьому підпункті розглядаються екологічні переваги модульного будинку, заходи зі зменшення вуглецевого сліду та їхній внесок у захист довкілля.

Одним із основних екологічних аспектів модульного будинку є використання відновлюваних джерел енергії. Сонячні панелі потужністю 5–6 кВт забезпечують електроенергію для всіх систем, включаючи тепловий насос, насоси водопостачання та біологічну очисну станцію. Це дозволяє уникнути споживання електрики, виробленої з викопного палива, що в Україні часто базується на вугіллі чи природному газі. За оцінками, будинок із сонячними панелями генерує 5–10 кВт·год/добу взимку та 20–25 кВт·год/добу влітку, що еквівалентно зменшенню викидів CO₂ на 2–3 тонни на рік порівняно з традиційним будинком, підключеним до електромережі. Акумулятори LiFePO₄, які накопичують надлишкову енергію, мають тривалий термін служби (10–15 років) і є більш екологічними, ніж свинцево-кислотні, завдяки меншій токсичності.

Система теплопостачання на основі повітряного теплового насоса типу "повітря-вода" також сприяє зменшенню вуглецевого сліду. З коефіцієнтом перетворення енергії (COP) 3–4 насос виробляє 3–5 кВт тепла на 1 кВт електроенергії, що значно ефективніше за електричні обігрівачі чи газові котли. У поєднанні з водяною теплою підлогою, яка працює в низькотемпературному режимі, система знижує енергоспоживання на опалення до 0,75–1,25 кВт·год/добу за тепловтрат 396 Вт. Використання сонячного колектора для нагріву гарячої води додатково зменшує залежність від електроенергії, скорочуючи викиди CO₂, пов'язані з водонагрівом, на 20–30% порівняно з електричними бойлерами.

Водопостачання, що базується на зборі дощової води та свердловині, має екологічні переваги через мінімальне втручання в природні ресурси. Збір дощової води з даху площею 30 м² дозволяє зібрати до 15–18 м³ води на рік, зменшуючи потребу в бурінні глибоких свердловин чи транспортуванні привозної води, що супроводжується викидами від техніки. Система фільтрації, включаючи механічні, вугільні фільтри та зворотний осмос, не використовує хімічних реагентів, що запобігає забрудненню ґрунту чи водою. Свердловина як резервне джерело експлуатується лише в посушливі періоди, що знижує вплив на підземні водоносні шари.

Каналізаційна система, що складається з компостувального туалету та біологічної очисної станції для "сірих" стоків, є екологічно орієнтованою. Компостувальний туалет усуває "чорні" стоки, перетворюючи їх на компост без використання води, що скорочує обсяг стічних вод до 60–80 літрів на добу та економить до 30% води порівняно з традиційними туалетами. Біологічна станція очищає "сірі" стоки до рівня, безпечного для скидання в ґрунт, використовуючи аеробні бактерії без хімічних добавок. Це запобігає забрудненню ґрунтових вод і мінімізує вплив на екосистему ділянки.

Конструкція модульного будинку з сендвіч-панелей сприяє енергоефективності та зменшенню вуглецевого сліду. Висока теплоізоляція

панелей знижує тепловтрати до 396 Вт за різниці температур 30°C, що зменшує потребу в опаленні. Виробництво сендвіч-панелей частково здійснюється на заводі, що скорочує відходи на будівельному майданчику та транспортні викиди порівняно з традиційним будівництвом. Використання перероблених матеріалів для трубопроводів (поліпропілен) і компактна конструкція будинку додатково знижують екологічне навантаження.

Для подальшого зменшення вуглецевого сліду застосовуються заходи з оптимізації експлуатації. Розумний контролер і система моніторингу дозволяють відстежувати енергоспоживання, рівень води та стан обладнання, уникаючи надмірного використання ресурсів. Наприклад, зниження температури теплої підлоги вночі чи активація насосів лише за потреби економить 10–15% електроенергії. Мешканці отримують рекомендації щодо раціонального використання води та енергії, що сприяє екологічній свідомості. Утилізація відходів, таких як використані фільтри чи компост, здійснюється з дотриманням екологічних норм.

Висновок за розділом 7

Розділ 7 узагальнює вимоги охорони праці та екологічної безпеки для модульного будинку з двох контейнерів, підкреслюючи важливість безпечного будівництва та експлуатації автономних систем. Заходи охорони праці, такі як використання засобів захисту, інструктажі, організація майданчика та протипожежні заходи, забезпечують безпеку працівників під час монтажу сендвіч-панелей, комунікацій і обладнання. Аналіз ризиків експлуатації виявив загрози, зокрема електричні аварії, недостатнє опалення, нестачу води та проблеми з каналізацією, які мінімізуються через захисні пристрої, утеплення, регулярне обслуговування. Екологічні аспекти, включаючи використання сонячних панелей (8,08 кВт), теплового насоса (3500 Вт), дощової води (15–18 м³/рік) і компостувального туалету, зменшують викиди CO₂ на 2–3 тонни на рік і економлять 30% води, сприяючи сталому розвитку в умовах України.

ВИСНОВКИ

Розроблена концепція енергоефективного модульного будинку з двох контейнерів — житлового (14 м²) та технічного — забезпечує автономне та комфортне проживання 1–2 осіб в умовах України, відповідаючи принципам сталого розвитку. Використання сендвіч-панелей із PIR-утеплювачем (тепловтрати 264–396 Вт за $\Delta T=20\text{--}30^{\circ}\text{C}$), енергоефективних вікон ($U \leq 0,8$ Вт/м²·К) та архітектурно-планувальних рішень, таких як південна орієнтація вікон і компактне зонування, мінімізує енергопотреблення та оптимізує простір. Інтеграція автономних систем електропостачання (16 сонячних панелей AE Solar 505MD-132, 8,08 кВт, 8 акумуляторів Weco 5K3, 40 кВт·год), теплопостачання (повітряний тепловий насос 3500 Вт, COP 3–4, тепла підлога), водопостачання (дощова вода 15–18 м³/рік, свердловина) та каналізації (компостувальний туалет, біологічна очисна станція) дозволяє будинку функціонувати без централізованих мереж, знижуючи вуглецевий слід на 2–3 тонни CO₂ на рік.

Технічні рішення, включаючи гібридний інвертор із 3 MPPT Victron 250/100 24V, розумний контролер із системою моніторингу та рекуператор (ефективність 80–85%), забезпечують оптимальне енергокористування та надійність систем навіть за низької зимової інсоляції (5–10 кВт·год/добу). Кліматично-інсоляційний аналіз регіону Миколаїв (1200–1400 кВт·год/м²/рік) підтверджує доцільність розташування сонячних панелей під кутом 45° для максимальної генерації. Водночас системи захисту (BMS, автоматичні вимикачі, SPD) та автоматики гарантують безпеку обладнання та мешканців, а мобільний додаток спрощує контроль і обслуговування, що підвищує практичність будинку.

Охорона праці та екологічна безпека є невід’ємними аспектами проекту. На етапі будівництва забезпечується використання засобів захисту, інструктажі та організація майданчика, що мінімізує ризики травматизму. Під час

експлуатації аналіз ризиків (електричні аварії, нестача води, засмічення каналізації) вирішується завдяки регулярному обслуговуванню, утепленню систем та розумному управлінню. Екологічні переваги будинку включають економію води (30% за рахунок компостувального туалету), використання відновлюваних джерел енергії та безпечну утилізацію стоків, що відповідає сучасним вимогам екологічності.

У цілому, модульний будинок поєднує енергоефективність, автономність і екологічність, пропонуючи економічно вигідне рішення для сучасного житла в Україні. Його модульна конструкція спрощує транспортування та монтаж, а гнучкість систем дозволяє адаптувати проєкт до різних кліматичних умов і потреб користувачів, що робить його перспективним для масового впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Victron Energy. MultiPlus-II_230V/32424-MultiPlus-II, 2025. 49 с. URL: https://www.victronenergy.com/upload/documents/MultiPlus-II_230V/32424-MultiPlus-II_Quattro-II-pdf-en.pdf
2. Victron Energy. Manual SmartSolar MPPT 150-70 up to 250-100, 2025. 76 с. URL: https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual_SmartSolar_MPPT_150-70_up_to_250-100_VE.Can/29694-MPPT_solar_charger_manual-pdf-en.pdf
3. ДБН А.3.2-2:2009 Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд, 2009.
4. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Норми проектування. Київ: Мінрегіонбуд, 2013.
5. ДСанПіН 2.2.4-171-10:2010 Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Наказ МОЗ України № 400 від 16.07.2010. 49 с. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/sanpin/dsanpin_2_2_4_171_10/25-1-0-1180
6. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 28 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf
7. ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель. Київ: Мінрегіонбуд України, 2015. 29 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu-n_b_a.2.2-13_2015.pdf
8. Ісай Б.Є. Система автономного енергозабезпечення з використанням комплексу тепловий насос – фотоелектрична станція. Київ: НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2022. 91 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/db82e554-131d-408c-8cd7-8bd920b2f32d>
9. Плоский В.О., Гетун Г.В., Тимофєєв М.В., Заприво́да В.О. Енергоефективний панельний житловий будинок: архітектура будівель та споруд. Київ: Ліра-К, 2017. 190 с. URL: <https://lira->

k.com.ua/preview/12342.pdf?srsltid=AfmBOoq-7b_ABmzOu2k_3D4X3vD1u1m8t7ox8_-sFbF4PjvutrtlEV5j#:~:text=,3

10. Погорєлов В.А. (ред.) та ін. Практичний посібник «Енергоефективний будинок крок за кроком». Кн. 3: «Крок третій: капітальний ремонт і термомодернізація будинку». Київ: Інститут місцевого розвитку, 2012. 144 с. URL: <https://obolon-2023.kyivcity.gov.ua/files/2015/1/17/Krok3.pdf>

11. Юзьков Д.О. Техніко-економічний огляд використання теплових насосів для забезпечення автономної енергії приватних будинків. – В: Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф. «Build-Master-Class 2024», Київ, 2024. С. 243–244. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c6c17cf7-1b30-4060-8a87-742c8d11d5c3/content>