

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

Лехкара Дмитра Миколайовича

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.311.243:621.577:681.518

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Інформаційно-вимірювальна система для моніторингу та оцінки ефективності теплового насоса в поєднанні з сонячною електростанцією

---

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

---

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

---

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня \_\_\_\_\_ Д.М. Лехкар  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ Чупа Володимир Михайлович, доцент, к.т.н.  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

доцент

Цих В. С.

(посада)

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2026**

# Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень Бакалавр

Спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Завідувач кафедри

інформаційно-вимірювальних  
технологій та енергетичного  
менеджменту

В.С. Цих

“ ” 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Лехкара Дмитра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інформаційно-вимірювальна система для моніторингу та оцінки ефективності теплового насоса в поєднанні з сонячною електростанцією

керівник роботи Чупа Володимир Михайлович, доцент, к. т. н.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “5” травня 2026 року №204/7

2. Строк подання студентом роботи 9 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
Аналіз сучасного стану використання теплових насосів у поєднанні з сонячними електростанціями та інформаційно-вимірювальними системами моніторингу

Обґрунтування структури інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу теплового насоса та СЕС

Розрахунок ефективності та метрологічне оцінювання інформаційно-вимірювальної системи

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                      | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                             |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| <i>Нормоконтролер</i>       | <i>доцент Яворський А.В.</i>              |                |                  |
| <i>Перевірка на плагіат</i> | <i>доцент Миндюк В.Д.</i>                 |                |                  |
|                             |                                           |                |                  |
|                             |                                           |                |                  |
|                             |                                           |                |                  |
|                             |                                           |                |                  |
|                             |                                           |                |                  |

## 7. Дата видачі завдання

---

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів бакалаврської роботи                                                                                                                                                   | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Видача завдань бакалаврської роботи.                                                                                                                                                | 05.05.2026                     |          |
| 2     | Складання плану.                                                                                                                                                                    | 12.05.2026                     |          |
| 3     | Підбір джерел, оброблення зібраних матеріалів.                                                                                                                                      | 14.05.2026-16.05.2026          |          |
| 4     | Написання вступу та розділу 1 “Аналіз сучасного стану використання теплових насосів у поєднанні з сонячними електростанціями та інформаційно-вимірювальними системами моніторингу”. | 16.05.2026-20.05.2026          |          |
| 5     | Написання розділу 2 “Обґрунтування структури інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу теплового насоса та СЕС”.                                                           | 21.05.2026-25.05.2026          |          |
| 6     | Написання розділу 3 “Розрахунок ефективності та метрологічне оцінювання інформаційно-вимірювальної системи”.                                                                        | 26.05.2026-06.06.2026          |          |
| 7     | Оформлення роботи.                                                                                                                                                                  | 07.06.2026-09.06.2026          |          |

Студент

( підпис )

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

( підпис )

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

**Лехкар Д. М. «Інформаційно-вимірювальна система для моніторингу та оцінки ефективності теплового насоса в поєднанні з сонячною електростанцією». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2026.**

Бакалаврська робота присвячена темі розроблення інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу та оцінювання ефективності роботи теплового насоса в поєднанні з сонячною електростанцією. Вона складається із вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи – 71 сторінок, 2 рисунка, 1 таблиця. Кількість використаних джерел – 35 од.

У роботі розглянуто сучасний стан використання теплових насосів у поєднанні з сонячними електростанціями; проаналізовано тепловий насос як об'єкт енергетичного та метрологічного контролю; описано роль сонячної електростанції як джерела електричної енергії для часткового покриття споживання теплового насоса; визначено особливості спільної роботи теплового насоса та СЕС з урахуванням сезонної нерівномірності сонячної генерації; обґрунтовано необхідність застосування інформаційно-вимірювальної системи для контролю теплових, електричних і метеорологічних параметрів; сформовано перелік основних вимірювальних каналів системи; здійснено вибір засобів вимірювання та обладнання ІВС, зокрема теплотічильника, електролічильників, датчиків температури, датчика сонячної радіації та контролера збору даних; розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи; описано методику збору, передавання, первинної обробки даних та алгоритм роботи системи.

У розрахунковій частині виконано оцінювання теплової енергії, електроспоживання та ефективності теплового насоса. Для прийнятого режиму визначено теплову потужність теплового насоса, добову кількість виробленої

теплової енергії, добове електроспоживання, коефіцієнт перетворення COP та сезонний коефіцієнт ефективності SCOP. Розраховано орієнтовний річний виробіток СЕС потужністю 4 кВт, визначено частку покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок сонячної генерації, побудовано енергетичний баланс системи та оцінено похибки вимірювання основних енергетичних показників. Також виконано економічну оцінку застосування інформаційно-вимірювальної системи та сформовано практичні рекомендації щодо її використання.

Вагомими практичними результатами виконання кваліфікаційної роботи освітнього рівня «бакалавр» є обґрунтування структури інформаційно-вимірювальної системи для комбінованої системи “тепловий насос — СЕС”, вибір основних вимірювальних каналів і технічних засобів контролю, розроблення структурної схеми ІВС, а також виконання розрахунково-аналітичного та метрологічного оцінювання ефективності роботи системи.

**Ключові слова:** ТЕПЛОВИЙ НАСОС, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ, COP, SCOP, ТЕПЛОВА ЕНЕРГІЯ, ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ, СОНЯЧНА ГЕНЕРАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ. Об’єктом дослідження є.

## ABSTRACT

**Lekhkar, D. M. “Information and measuring system for monitoring and evaluating the efficiency of a heat pump in combination with a solar power plant”. Diploma work of educational level – bachelor, in the form of a manuscript. Speciality – 152 “Metrology and information and measuring equipment”. – Ivano-Frankivsk, 2026.**

The bachelor's thesis is devoted to the development of an information and measuring system for monitoring and evaluating the efficiency of a heat pump in combination with a solar power plant. It consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and appendices. The total volume of the work is 71 pages, 2 figures, 1 table. The number of sources used is 35.

The paper considers the current state of using heat pumps in combination with solar power plants; the heat pump is analyzed as an object of energy and metrological control; the role of the solar power plant as a source of electrical energy for partial coverage of heat pump consumption is described; the features of the joint operation of the heat pump and the solar power plant are determined, taking into account the seasonal unevenness of solar generation; the necessity of using an information and measuring system for controlling thermal, electrical and meteorological parameters is substantiated; the list of the main measuring channels of the system is formed; the measuring instruments and equipment of the information and measuring system are selected, including a heat meter, electricity meters, temperature sensors, a solar radiation sensor and a data acquisition controller; the structural diagram of the information and measuring system is developed; the method of data collection, transmission, primary processing and the algorithm of system operation are described.

In the calculation part, the thermal energy, electricity consumption and efficiency of the heat pump are evaluated. For the accepted operating mode, the thermal power of the heat pump, the daily amount of generated thermal energy, the daily electricity consumption, the coefficient of performance COP and the seasonal coefficient of performance SCOP are determined. The approximate annual generation of a 4 kW solar

power plant is calculated, the share of heat pump electricity consumption covered by solar generation is determined, the energy balance of the system is formed, and the measurement errors of the main energy indicators are evaluated. An economic assessment of the application of the information and measuring system is also carried out, and practical recommendations for its use are formulated.

The significant practical results of the bachelor's qualification work are the substantiation of the structure of the information and measuring system for the combined "heat pump – solar power plant" system, the selection of the main measuring channels and technical means of control, the development of the structural diagram of the information and measuring system, as well as the calculation, analytical and metrological evaluation of the system efficiency.

**Key words:** HEAT PUMP, SOLAR POWER PLANT, INFORMATION AND MEASURING SYSTEM, MONITORING, COP, SCOP, THERMAL ENERGY, ELECTRICITY CONSUMPTION, SOLAR GENERATION, METROLOGICAL EVALUATION.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік основних позначень і скорочень символів.....                                                                                                              | 10 |
| Вступ.....                                                                                                                                                        | 11 |
| Розділ 1. Аналіз сучасного стану використання теплових насосів у поєднанні з сонячними електростанціями та інформаційно-вимірювальними системами моніторингу..... | 12 |
| 1.1 Актуальність поєднання теплового насоса та сонячної електростанції в системах енергозабезпечення будівель.....                                                | 12 |
| 1.2 Тепловий насос як об'єкт енергетичного та метрологічного контролю ...                                                                                         | 14 |
| 1.3 Сонячна електростанція як джерело електричної енергії для теплового насоса.....                                                                               | 17 |
| 1.4 Особливості спільної роботи теплового насоса та сонячної електростанції.....                                                                                  | 19 |
| 1.5 Проблема точності вимірювань під час оцінювання ефективності комбінованої енергетичної системи.....                                                           | 22 |
| 1.6 Постановка задачі дослідження.....                                                                                                                            | 25 |
| 1.7 Висновок до розділу 1 .....                                                                                                                                   | 27 |
| Розділ 2. Обґрунтування структури інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу теплового насоса та СЕС.....                                                 | 29 |
| 2.1 Характеристика об'єкта дослідження як комбінованої енергетичної системи .....                                                                                 | 29 |
| 2.2 Визначення вимірювальних каналів і контрольованих параметрів системи .....                                                                                    | 33 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3 Вибір засобів вимірювання та обладнання інформаційно-вимірювальної системи .....                                 | 36 |
| 2.4 Розроблення структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи .....                                           | 40 |
| 2.5 Методика збору, передавання, первинної обробки даних та алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи ..... | 45 |
| 2.6 Висновок до розділу 2.....                                                                                       | 48 |
| Розділ 3 Розрахунок ефективності та метрологічне оцінювання інформаційно-вимірювальної системи.....                  | 49 |
| 3.1 Вихідні дані для розрахунку ефективності системи .....                                                           | 49 |
| 3.2 Розрахунок теплової енергії, електроспоживання та COP/SCOP теплового насоса .....                                | 51 |
| 3.3 Розрахунок виробітку СЕС та частки покриття електроспоживання теплового насоса .....                             | 56 |
| 3.4 Енергетичний баланс системи та оцінювання похибок вимірювання...                                                 | 59 |
| 3.5 Економічна оцінка, аналіз результатів і рекомендації.....                                                        | 61 |
| 3.6 Висновок до розділу 3.....                                                                                       | 64 |
| Висновки .....                                                                                                       | 66 |
| Перелік посилань на джерела.....                                                                                     | 68 |

## **ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ**

АКБ – акумуляторна батарея

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

СЕС – сонячна електростанція

ТН – тепловий насос

COP – Coefficient of Performance (коефіцієнт перетворення теплоти)

SCOP – Seasonal Coefficient of Performance (сезонний коефіцієнт перетворення теплоти)

MPPT – Maximum Power Point Tracking (відстеження точки максимальної потужності)

PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System (фотоелектрична географічна інформаційна система)

## ВСТУП

Підвищення енергетичної ефективності будівель є важливим напрямом розвитку відновлюваної енергетики. Одним із перспективних рішень є поєднання теплового насоса із сонячною електростанцією, за якого СЕС може частково покривати електроспоживання теплового насоса. Водночас ефективність такої системи залежить від умов експлуатації, сезонності сонячної генерації, режимів роботи обладнання та точності вимірювання основних параметрів.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу та оцінювання ефективності роботи теплового насоса в поєднанні з сонячною електростанцією. Об'єктом дослідження є комбінована енергетична система будівлі з тепловим насосом і СЕС. Предметом дослідження є інформаційно-вимірювальна система для контролю теплових, електричних і метеорологічних параметрів такої системи.

У роботі використано методи аналізу літературних і нормативних джерел, структурного проєктування інформаційно-вимірювальних систем, енергетичного балансу, розрахунку COP і SCOP та оцінювання похибок вимірювання. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування запропонованої ІВС для збору й обробки даних, оцінювання фактичної ефективності системи та виявлення неефективних режимів роботи.

# **РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У ПОЄДНАННІ З СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ МОНІТОРИНГУ**

## **1.1 Актуальність поєднання теплового насоса та сонячної електростанції в системах енергозабезпечення будівель**

У сучасних умовах питання енергетичної ефективності будівель поступово переходить із площини бажаного удосконалення в площину практичної необхідності. Зростання вартості енергоносіїв, потреба у зменшенні залежності від викопного палива, а також розвиток технологій відновлюваної енергетики формують новий підхід до забезпечення теплових та електричних потреб споживачів. Якщо раніше будівля розглядалася переважно як пасивний споживач енергії, то сьогодні вона все частіше стає активним елементом енергетичної системи: споживає, накопичує, перетворює та частково виробляє енергію.

Одним із перспективних технічних рішень для таких умов є поєднання теплового насоса із сонячною електростанцією. Тепловий насос забезпечує перетворення низькопотенційної теплової енергії навколишнього середовища у корисну теплоту для опалення, гарячого водопостачання або технологічних потреб. Сонячна електростанція, своєю чергою, може частково або повністю покривати електричне споживання теплового насоса, особливо в періоди достатньої сонячної інсоляції.

Водночас поєднання сонячної електростанції та теплового насоса не гарантує автоматичного досягнення високої енергетичної ефективності системи. Ефективність такої комбінованої установки залежить від відповідності між графіком вироблення електричної енергії СЕС та графіком споживання електроенергії тепловим насосом, кліматичних умов, температури джерела теплоти, температурного режиму системи опалення, режиму роботи компресора,

технічного стану теплообмінного обладнання, якості монтажу та алгоритмів керування. У зв'язку з цим для об'єктивного оцінювання роботи системи необхідним є не лише правильний вибір основного обладнання, а й постійний моніторинг її фактичних енергетичних параметрів.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, теплота становила майже половину світового кінцевого енергоспоживання у 2024 році та була пов'язана зі значною часткою енергетичних викидів CO<sub>2</sub>, що підтверджує важливість декарбонізації тепlopостачання. Водночас частка відновлюваної теплоти у глобальному тепловому споживанні залишається обмеженою, тому теплові насоси та електрифікація тепlopостачання розглядаються як один із практичних напрямів підвищення енергоефективності будівель [1].

В Україні питання енергетичної ефективності також має нормативне підґрунтя. Закон України «Про енергетичну ефективність» регулює відносини у сфері забезпечення енергоефективності та спрямований, зокрема, на посилення енергетичної безпеки держави [2]. Це важливо для даної роботи, оскільки тема моніторингу ефективності теплового насоса в поєднанні з СЕС прямо пов'язана не лише з технічним підбором обладнання, а й з оцінюванням реального енергетичного результату.

Отже, поєднання теплового насоса та сонячної електростанції є доцільним не саме по собі, а за умови правильної оцінки режимів роботи, балансу виробленої та спожитої енергії, сезонних змін і фактичної ефективності обладнання. Без вимірювання та обробки фактичних параметрів роботи така система не може бути об'єктивно оцінена з погляду енергетичної ефективності, оскільки паспортні характеристики обладнання не завжди відповідають реальним умовам експлуатації. У зв'язку з цим застосування інформаційно-вимірювальної системи є необхідною умовою для збору, обробки та аналізу фактичних параметрів роботи комбінованої енергетичної системи.

## 1.2 Тепловий насос як об'єкт енергетичного та метрологічного контролю

Тепловий насос — це енергетична установка, яка переносить теплоту від низькотемпературного джерела до споживача з вищою температурою за рахунок підведення зовнішньої енергії, переважно електричної. Основними елементами компресійного теплового насоса є випарник, компресор, конденсатор, дросельний пристрій та контур холодоагенту. У випарнику холодоагент поглинає теплоту від зовнішнього джерела, у компресорі підвищуються його тиск і температура, у конденсаторі теплота передається системі опалення або гарячого водопостачання, після чого через дросельний пристрій холодоагент повертається до початкового стану [5].

Ефективність роботи теплового насоса зазвичай характеризується коефіцієнтом перетворення теплоти COP, який визначається як відношення корисної теплової потужності до спожитої електричної потужності. Випробування та порівняння теплових насосів у європейській практиці пов'язують зі стандартом EN 14511, який регламентує умови визначення теплової потужності, електричної потужності та COP у лабораторних умовах [3].

Однак значення COP, визначене за стандартизованих лабораторних умов, не повністю характеризує ефективність роботи теплового насоса в реальних умовах експлуатації. Фактична продуктивність обладнання залежить від температури зовнішнього середовища або іншого джерела низькопотенційної теплоти, температурного графіка системи опалення, тривалості роботи в часткових режимах навантаження, наявності циклів відтавання, гідравлічної схеми, якості монтажу та налаштувань системи керування. У зв'язку з цим паспортне значення COP доцільно розглядати як показник ефективності для конкретних умов випробування, тоді як для оцінювання роботи теплового насоса протягом опалювального періоду необхідно враховувати сезонні показники ефективності [4].

Для більш повної характеристики роботи теплового насоса впродовж опалювального сезону застосовують сезонний коефіцієнт перетворення SCOP. На відміну від COP, який характеризує ефективність обладнання за певної фіксованої точки роботи, SCOP враховує зміну теплового навантаження, зовнішньої температури та роботу обладнання в умовах часткового навантаження протягом сезону. У стандарті ДСТУ EN 14825:2023, гармонізованому з EN 14825:2022, розглядаються випробування та визначення характеристик теплових насосів в умовах часткового навантаження, а також розрахунок сезонних робочих характеристик [4]. Тому під час аналізу ефективності теплового насоса доцільно враховувати як миттєве або короткочасне значення COP, так і сезонний показник SCOP.

Для оцінювання реальної роботи теплового насоса доцільно контролювати такі параметри:

- електричну потужність і спожиту електричну енергію;
- температуру теплоносія на подачі та звороті;
- витрату теплоносія;
- теплову потужність;
- кількість виробленої теплової енергії;
- температуру зовнішнього середовища;
- режими роботи компресора;
- аварійні або нестандартні режими;
- добові, місячні та сезонні значення ефективності.

Такий підхід відповідає загальній логіці енергетичного моніторингу, за якої ефективність обладнання оцінюють не лише за паспортними характеристиками, а й за фактичними експлуатаційними даними [5, 6].

У межах даної дипломної роботи тепловий насос розглядається не лише як енергетичний пристрій, а як об'єкт інформаційно-вимірювального контролю. Це

означає, що основна увага повинна бути спрямована не тільки на принцип його роботи, а й на те, які фізичні величини потрібно вимірювати, якими засобами, з якою точністю, з якою частотою та яким способом обробляти отримані дані.

Теплова потужність, яку тепловий насос передає в систему опалення, може бути визначена за масовою витратою теплоносія та різницею температур між подавальним і зворотним трубопроводами:

$$Q_{\text{тепл}} = G \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \quad (1.1)$$

де  $Q_{\text{тепл}}$  — теплова потужність, Вт;

$G$  — масова витрата теплоносія, кг/с;

$c$  — питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·°C);

$t_1$  — температура теплоносія у подавальному трубопроводі, °C;

$t_2$  — температура теплоносія у зворотному трубопроводі, °C.

Фактичний коефіцієнт перетворення теплоти COP визначається як відношення теплової потужності, переданої споживачу, до електричної потужності, спожитої тепловим насосом:

$$COP = \frac{Q_{\text{тепл}}}{P_{\text{ел}}} \quad (1.2)$$

де COP — коефіцієнт перетворення теплоти;

$Q_{\text{тепл}}$  — теплова потужність, передана споживачу, Вт;

$P_{\text{ел}}$  — електрична потужність, спожита тепловим насосом, Вт.

Для сезонного оцінювання ефективності роботи теплового насоса може бути використаний сезонний коефіцієнт перетворення:

$$SCOP = \frac{Q_{\text{тепл.сез}}}{W_{\text{ел.сез}}} \quad (1.3)$$

де SCOP — сезонний коефіцієнт перетворення теплоти;

$Q_{\text{тепл.сез}}$  — теплова енергія, передана системі опалення за сезон, кВт·год;

$W_{\text{ел.сез}}$  — електрична енергія, спожита тепловим насосом за сезон, кВт·год.

Практичне використання наведених залежностей потребує врахування похибок вимірювання всіх вхідних величин. Точність визначення теплової потужності залежить від похибок вимірювання температури теплоносія, витрати теплоносія та прийнятого значення питомої теплоємності. Точність визначення COP і SCOP, своєю чергою, залежить також від похибки вимірювання електричної потужності та електричної енергії. Тому оцінювання ефективності теплового насоса повинно супроводжуватися аналізом метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, що застосовуються в інформаційно-вимірювальній системі.

### **1.3 Сонячна електростанція як джерело електричної енергії для теплового насоса**

Сонячна електростанція перетворює енергію сонячного випромінювання в електричну енергію за допомогою фотоелектричних модулів. Основними складовими типової мережевої або гібридної СЕС є фотоелектричні панелі, інвертор, захисна апаратура, система кріплення, кабельні лінії, засоби обліку та, за потреби, акумуляторна система накопичення енергії [7].

У поєднанні з тепловим насосом сонячна електростанція може виконувати кілька функцій. По-перше, вона зменшує споживання електроенергії з мережі. По-друге, вона може частково компенсувати витрати на роботу компресора, циркуляційних насосів і автоматики. По-третє, за наявності системи керування вона дозволяє зміщувати частину навантаження теплового насоса на періоди більшого сонячного виробітку. Водночас необхідно враховувати, що найбільший виробіток СЕС часто припадає на періоди, коли потреба в опаленні є меншою. Тому ефективність такого поєднання залежить не лише від встановленої потужності панелей, а й від профілю споживання, теплової інерції будівлі, наявності буферної ємності та алгоритмів керування [7].

Для оцінювання роботи СЕС у системах моніторингу використовують такі параметри:

- сонячну інсоляцію або густину сонячного випромінювання;
- температуру фотоелектричних модулів;
- напругу та струм на стороні постійного струму;
- активну потужність на виході інвертора;
- вироблену електричну енергію;
- коефіцієнт продуктивності фотоелектричної системи;
- втрати в інверторі, кабелях та інших елементах системи[7, 8].

Для фотоелектричних систем важливим нормативним документом є ІЕС 61724-1, що встановлює підходи до моніторингу, аналізу та оцінювання ефективності фотоелектричних систем. Український стандарт ДСТУ EN ІЕС 61724-1:2022 має назву «Ефективність фотоелектричної системи. Частина 1. Моніторинг» і є прийнятим на основі EN ІЕС 61724-1:2021 та ІЕС 61724-1:2021 [8].

У стандарті ІЕС 61724-1 розглядаються терміни, обладнання та методи моніторингу й аналізу роботи фотоелектричних систем. Зокрема, у практиці оцінювання СЕС застосовують показник *performance ratio*, який дозволяє

порівнювати фактичну роботу фотоелектричної системи з очікуваною роботою за наявних умов сонячного випромінювання [8, 9].

Для даної роботи важливим є не просто факт наявності СЕС, а її роль у живленні теплового насоса. Тому моніторинг повинен відповідати на кілька практичних питань:

- Яку частину електроспоживання теплового насоса може покрити СЕС?
- У які періоди доби та року спостерігається найбільший збіг між виробітком СЕС і споживанням теплового насоса?
- Чи доцільно використовувати буферну ємність або акумулятор для підвищення частки власного споживання?
- Як змінюється фактична ефективність системи залежно від погодних умов?
- Які вимірювальні канали необхідні для об'єктивної оцінки роботи системи?

Таким чином, СЕС у цій роботі розглядається не ізольовано, а як частина комбінованої енергетичної системи. Її ефективність має оцінюватися не лише за кількістю вироблених кіловат-годин, а й за тим, наскільки ця електроенергія корисно використовується для забезпечення роботи теплового насоса. Такий підхід потребує застосування інформаційно-вимірювальної системи, здатної одночасно контролювати параметри вироблення електричної енергії СЕС, споживання електроенергії тепловим насосом та умови роботи обладнання [8, 9].

#### **1.4 Особливості спільної роботи теплового насоса та сонячної електростанції**

Спільна робота теплового насоса та сонячної електростанції ґрунтується на використанні електричної енергії, виробленої фотоелектричними модулями, для живлення теплового насоса. У такій системі СЕС може частково покривати

електроспоживання компресора, циркуляційних насосів, автоматики та допоміжного обладнання. Це дозволяє зменшити споживання електроенергії з мережі та підвищити частку використання відновлюваної енергії в системі тепlopостачання будівлі.

Основною особливістю такої системи є нерівномірність вироблення та споживання енергії. Виріток СЕС залежить від сонячної радіації, погодних умов, орієнтації панелей, кута їх нахилу та температури фотоелектричних модулів. Натомість електроспоживання теплового насоса визначається тепловим навантаженням будівлі, температурою зовнішнього повітря, режимом роботи системи опалення та потребою в гарячому водопостачанні. Через це найбільший виробіток СЕС не завжди збігається з періодами найбільшої потреби теплового насоса в електроенергії.

Для підвищення ефективності комбінованої системи необхідно узгоджувати графіки вироблення та споживання електроенергії. Одним із практичних способів є зміщення частини роботи теплового насоса на періоди більшого сонячного виробітку. Це може реалізовуватися через нагрівання буферної ємності, бака гарячого водопостачання або використання теплової інерції будівлі. У дослідженнях систем із фотоелектричними модулями, тепловими насосами та накопичувачами енергії зазначається, що такі рішення можуть підвищувати рівень власного споживання електроенергії СЕС [10, 11].

Важливе значення має сезонна невідповідність між виробленням СЕС і тепловим навантаженням. У зимовий період потреба в тепловій енергії зростає, тоді як виробіток СЕС зменшується через коротшу тривалість світлового дня та гірші погодні умови. У літній період ситуація протилежна: сонячна генерація висока, але потреба в опаленні відсутня або мінімальна. Тому оцінювання такої системи повинно виконуватися не лише за встановленою потужністю обладнання, а й за фактичними добовими, місячними та сезонними енергетичними балансами.

До основних показників спільної роботи теплового насоса та СЕС належать:

- електрична енергія, вироблена СЕС;
- електрична енергія, спожита тепловим насосом;
- частка електроспоживання теплового насоса, покрита за рахунок генерації СЕС;
- теплова енергія, передана тепловим насосом у систему опалення;
- коефіцієнт перетворення COP та сезонний коефіцієнт ефективності SCOP;
- обсяг електричної енергії, відібраної з мережі;
- обсяг надлишкової електричної енергії, переданої в мережу або накопичувач.

Частку покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС можна визначити за формулою:

$$K_{\text{покp}} = \frac{W_{\text{СЕС} \rightarrow \text{ТН}}}{W_{\text{ТН}}} \cdot 100 \quad (1.4)$$

де  $K_{\text{покp}}$  — частка покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС, %;

$W_{\text{СЕС} \rightarrow \text{ТНW}}$  — електрична енергія, вироблена СЕС і використана тепловим насосом, кВт·год;

$W_{\text{ТН}}$  — загальна електрична енергія, спожита тепловим насосом, кВт·год.

Для оцінювання використання власної сонячної генерації може бути застосований коефіцієнт власного споживання електроенергії СЕС:

$$K_{\text{вл.сп}} = \frac{W_{\text{СЕС.вл}}}{W_{\text{СЕС}}} \cdot 100 \quad (1.5)$$

де  $K_{\text{вл.сп}}$  — коефіцієнт власного споживання електроенергії СЕС, %;

$W_{\text{СЕС.вл}}$  — електрична енергія СЕС, спожита безпосередньо в будівлі, кВт·год;

$W_{\text{СЕС}}$  — загальна електрична енергія, вироблена сонячною електростанцією, кВт·год.

Наведені показники дозволяють оцінити не лише роботу окремих елементів, а й ефективність їх взаємодії. Високий COP теплового насоса не завжди означає високу ефективність усієї системи, якщо його електроспоживання не збігається з періодами вироблення СЕС. Так само велика встановлена потужність СЕС не гарантує ефективної роботи системи, якщо значна частина виробленої електроенергії не використовується для власних потреб [12].

Отже, спільна робота теплового насоса та сонячної електростанції потребує не лише технічного з'єднання обладнання, а й контролю режимів його роботи. Для об'єктивної оцінки ефективності необхідно вимірювати виробіток СЕС, електроспоживання теплового насоса, вироблену теплову енергію, температурні режими та енергетичні баланси. Саме ці дані є основою для подальшого розроблення інформаційно-вимірювальної системи.

### **1.5 Проблема точності вимірювань під час оцінювання ефективності комбінованої енергетичної системи**

Оцінювання ефективності комбінованої енергетичної системи, до складу якої входять тепловий насос і сонячна електростанція, базується на результатах вимірювання електричних, теплових і температурних параметрів. До основних вимірюваних величин належать електрична енергія, вироблена СЕС, електрична енергія, спожита тепловим насосом, теплова енергія, передана системі опалення, температура теплоносія на подачі та звороті, витрата теплоносія, температура зовнішнього повітря та, за потреби, параметри роботи накопичувачів енергії.

Точність визначення ефективності системи залежить від точності вимірювання кожної з цих величин. Наприклад, під час визначення COP теплового насоса похибка результату залежить від похибки вимірювання

теплової потужності та електричної потужності. Теплова потужність, своєю чергою, визначається за витратою теплоносія та різницею температур між подавальним і зворотним трубопроводами. Навіть незначні похибки датчиків температури або витратоміра можуть впливати на кінцеве значення COP.

У загальному вигляді результат вимірювання не можна розглядати як абсолютно точне значення фізичної величини. Згідно з підходом, наведеним у міжнародному документі JCGM 100:2008, результат вимірювання повинен супроводжуватися оцінкою невизначеності, яка характеризує розсіювання значень, що можуть бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині [13]. Це положення є важливим для енергетичного моніторингу, оскільки розрахункові показники ефективності залежать від кількох вимірних параметрів одночасно.

Для комбінованої системи “тепловий насос — СЕС” основними джерелами похибок є: клас точності електролічильників; похибка вимірювання напруги, струму та активної потужності; похибка датчиків температури; похибка витратоміра або теплотічильника; дискретність реєстрації даних; похибка синхронізації вимірювань у часі; втрати в кабельних лініях та допоміжному обладнанні; помилки під час обробки та усереднення даних.

Під час вимірювання електричної енергії важливим є клас точності засобів обліку. Стандарт ІЕС 62053-21:2020 поширюється на статичні лічильники активної електричної енергії класів точності 0,5, 1 і 2 для мереж змінного струму [14]. Для задач оцінювання ефективності теплового насоса та СЕС доцільно використовувати лічильники або вимірювальні модулі з класом точності, достатнім для енергетичного аналізу, оскільки похибка вимірювання електроенергії безпосередньо впливає на розрахунок COP, SCOP, частки покриття споживання від СЕС та коефіцієнта власного споживання.

Для визначення теплової енергії зазвичай використовують теплотічильники або окремі вимірювальні канали витрати та температури. Теплотічильник визначає кількість теплової енергії за даними витратоміра, пари температурних датчиків і обчислювача. У стандарті EN 1434-1:2022 тепловий лічильник розглядається як засіб вимірювання, до складу якого входять датчик витрати,

пара температурних датчиків та обчислювач теплової енергії [15]. Це означає, що точність визначення теплової енергії залежить не від одного датчика, а від сукупної похибки всіх елементів вимірювального каналу.

Особливу увагу потрібно приділяти вимірюванню різниці температур теплоносія. Якщо різниця між температурою подачі та звороту невелика, то навіть мала абсолютна похибка температурних датчиків може суттєво вплинути на розраховане значення теплової потужності. Тому для теплового насоса бажано використовувати узгоджену пару температурних датчиків, встановлених у правильних точках гідравлічного контуру.

Похибка визначення COP може бути оцінена через відносні похибки вимірювання теплової та електричної потужності. Для спрощеної оцінки можна використати залежність:

$$\delta_{\text{COP}} = \sqrt{\delta_Q^2 + \delta_P^2} \quad (1.6)$$

де  $\delta_{\text{COP}}$  — відносна похибка визначення COP, %;

$\delta_Q$  — відносна похибка визначення теплової потужності, %;

$\delta_P$  — відносна похибка вимірювання електричної потужності, %.

Якщо теплова потужність визначається за витратою теплоносія та різницею температур, її відносну похибку можна подати у вигляді:

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_G^2 + \delta_{\Delta t}^2} \quad (1.7)$$

де  $\delta_Q$  — відносна похибка визначення теплової потужності, %;

$\delta_G$  — відносна похибка вимірювання витрати теплоносія, %;

$\delta_{\Delta t}$  — відносна похибка визначення різниці температур, %.

Для різниці температур:

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (1.8)$$

де  $\Delta t$  — різниця температур теплоносія, °C;

$t_1$  — температура теплоносія у подавальному трубопроводі, °C;

$t_2$  — температура теплоносія у зворотному трубопроводі, °C.

На точність оцінювання роботи СЕС впливають похибки вимірювання виробленої електроенергії, сонячної радіації, температури модулів, напруги, струму та активної потужності. Якщо система моніторингу не забезпечує однакову часову прив'язку між даними генерації СЕС і споживання теплового насоса, то оцінювання частки покриття навантаження може бути спотвореним. Тому для комбінованої системи важливо не лише вибрати достатньо точні датчики, а й забезпечити синхронний збір і коректну обробку даних.

Отже, точність вимірювань є одним із ключових чинників достовірного оцінювання ефективності системи “тепловий насос — СЕС”. Без урахування похибок вимірювання значення COP, SCOP, виробленої теплової енергії, частки покриття електроспоживання від СЕС та коефіцієнта власного споживання можуть мати обмежену практичну цінність. Тому в подальших розділах необхідно обґрунтувати вибір вимірювальних каналів, засобів вимірювання та методику обробки даних.

## 1.6 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз показав, що поєднання теплового насоса та сонячної електростанції є перспективним рішенням для підвищення енергоефективності будівель. Тепловий насос забезпечує вироблення теплової енергії з

використанням електричної енергії, а СЕС може частково покривати це електроспоживання за рахунок відновлюваного джерела. Однак ефективність такої системи залежить не лише від паспортних характеристик обладнання, а й від фактичних режимів роботи, сезонних умов, графіків вироблення та споживання енергії, а також точності вимірювання основних параметрів [3, 4, 9].

Основною проблемою є те, що без систематичного збору й обробки вимірювальних даних неможливо об'єктивно оцінити реальну ефективність комбінованої системи. Значення COP, SCOP, кількість виробленої теплової енергії, частка покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС та коефіцієнт власного споживання залежать від точності вимірювання температури, витрати теплоносія, електричної потужності та електричної енергії [13–15].

У зв'язку з цим у подальших розділах роботи необхідно розв'язати такі задачі:

1. Обґрунтувати структуру інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу роботи теплового насоса в поєднанні з сонячною електростанцією.
2. Визначити основні вимірювальні канали системи, зокрема канали вимірювання температури теплоносія, витрати теплоносія, електричної потужності, електричної енергії та виробленої теплової енергії.
3. Обґрунтувати вибір технічних засобів вимірювання та збору даних, необхідних для оцінювання роботи теплового насоса, СЕС і комбінованої системи загалом.
4. Розробити методику розрахунку основних показників ефективності, зокрема COP, SCOP, частки покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС та коефіцієнта власного споживання електроенергії.
5. Оцінити вплив похибок вимірювання на достовірність визначення енергетичних показників системи.

6. Сформувати практичні рекомендації щодо застосування інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу та оцінювання ефективності роботи теплового насоса в поєднанні з СЕС.

Таким чином, подальше дослідження спрямоване на розроблення інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечить збір, обробку та аналіз параметрів роботи теплового насоса і сонячної електростанції. Отримані дані повинні дати змогу оцінити не лише роботу окремих елементів, а й ефективність їхньої спільної роботи в умовах реальної експлуатації.

## **1.7 Висновок до розділу 1**

У першому розділі проаналізовано сучасний стан використання теплових насосів у поєднанні з сонячними електростанціями та інформаційно-вимірювальними системами моніторингу. Розглянуто роль теплового насоса як енергоефективного обладнання для забезпечення теплових потреб будівлі, а також сонячної електростанції як джерела електричної енергії для часткового покриття його споживання.

Встановлено, що ефективність комбінованої системи “тепловий насос — СЕС” залежить не лише від технічних характеристик окремих елементів, а й від узгодженості режимів їхньої роботи, сезонних умов, графіків вироблення та споживання енергії. Для оцінювання такої системи доцільно використовувати показники COP, SCOP, частку покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС та коефіцієнт власного споживання електроенергії.

Показано, що достовірність оцінювання ефективності комбінованої енергетичної системи значною мірою залежить від точності вимірювання електричних, теплових і температурних параметрів. Основними джерелами похибок є засоби вимірювання електроенергії, температури, витрати теплоносія, теплової енергії, а також похибки обробки та синхронізації даних.

Отже, для об'єктивного оцінювання роботи теплового насоса в поєднанні з сонячною електростанцією необхідно розробити інформаційно-вимірювальну систему, яка забезпечить збір, обробку та аналіз основних енергетичних параметрів. Це є основою для подальшого вибору технічних засобів вимірювання, побудови структури системи моніторингу та оцінювання ефективності її роботи в реальних умовах експлуатації.

## РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА СЕС

### 2.1 Характеристика об'єкта дослідження як комбінованої енергетичної системи

Об'єктом дослідження в даній роботі є комбінована енергетична система приватного житлового будинку, яка включає будівлю як споживача теплової та електричної енергії, тепловий насос, дахову сонячну електростанцію, електричну мережу, наявні резервні джерела теплоти та інформаційно-вимірювальну систему для моніторингу параметрів їх роботи.

Базовим об'єктом навантаження є приватний одноповерховий житловий будинок, розташований у селі Черемхів Коломийського району Івано-Франківської області. Будинок збудований у 1938 році та належить до малоповерхової сільської забудови Західної України. Загальна площа будинку становить 100,6 м<sup>2</sup>, житлова площа — 57,9 м<sup>2</sup>. У будинку постійно проживає шість осіб.

Зовнішні стіни будинку виконані із саману орієнтовною товщиною 40 см. Дах будинку двосхилий, покритий шифером. Стеля дерев'яна, з глиняним шаром, підлога дерев'яна, без додаткового теплоізоляційного шару. Частина вікон є дерев'яними, частина замінена на пластикові. Такі конструктивні особливості зумовлюють підвищену потребу будинку в тепловій енергії в опалювальний період.

Існуюча система теплопостачання будинку є комбінованою. Для опалення використовуються дві стаціонарні грубки на дровах, три газові конвектори та один електричний конвектор. Така система дає можливість використовувати різні джерела теплоти, однак не має єдиного автоматизованого керування та не забезпечує безперервного контролю фактичної ефективності теплопостачання.

У межах даної роботи тепловий насос розглядається як проєктований елемент модернізованої системи теплопостачання будинку. Для подальшого аналізу приймається тепловий насос типу “повітря–вода”. Такий тип теплового насоса не потребує облаштування ґрунтового контуру або використання водяного джерела низькопотенційної теплоти та може бути застосований у приватному домогосподарстві з передаванням теплоти до водяного контуру.

Тепловий насос не розглядається як єдине джерело теплоти для покриття всього теплового навантаження будинку. Для даного об’єкта доцільною є бівалентна схема теплопостачання, у якій тепловий насос забезпечує базову частину теплового навантаження, а наявні ґрубки та газові конвектори залишаються резервними або допоміжними джерелами теплоти. Такий підхід враховує зниження ефективності повітряного теплового насоса за низьких температур зовнішнього повітря та наявні особливості будівлі.

Орієнтовна теплова потужність теплового насоса для подальшого розрахункового аналізу приймається на рівні 6 кВт. Це значення відповідає логіці часткового покриття теплового навантаження будинку та узгоджується з обмеженням електричної потужності підключення. Для передавання теплоти від теплового насоса передбачається використання водяного контуру з буферною ємністю. Наявність такого контуру дозволяє організувати вимірювання температури теплоносія на подачі та звороті, витрати теплоносія і, відповідно, визначати теплову потужність та кількість виробленої теплової енергії.

Електропостачання будинку здійснюється від однофазної мережі напругою 220 В. Дозволена потужність підключення становить 5 кВт. Наявний вузол обліку електроенергії показано на рисунку 2.1. Це обмеження враховується під час вибору потужності теплового насоса, сонячної електростанції та інверторного обладнання.



Рисунок 2.1 – Вузол обліку електроенергії житлового будинку

Сонячна електростанція в даній роботі розглядається як дахова фотоелектрична установка, призначена для часткового покриття електроспоживання теплового насоса та інших електричних навантажень будинку. Для подальшого аналізу приймається встановлена потужність СЕС 4 кВт. Фотоелектричні модулі передбачається розмістити на південному скаті даху будинку. Площа даху є достатньою для встановлення фотоелектричних модулів прийнятої потужності. Для розрахунків приймається кут нахилу модулів  $35^\circ$ .

Сонячний ресурс Івано-Франківської області дозволяє використовувати малі дахові фотоелектричні системи, однак має виражену сезонність. У літній період виробіток СЕС є найбільшим, тоді як у зимовий період він зменшується через коротшу тривалість світлового дня, нижчу висоту Сонця над горизонтом, більшу хмарність і можливе снігове покриття модулів. Тому в даній роботі СЕС розглядається не як автономне джерело живлення теплового насоса, а як джерело часткового покриття його електроспоживання.

Для оцінювання сонячного ресурсу та подальшого розрахунку очікуваного виробітку СЕС доцільно використовувати дані PVGIS та Global Solar Atlas. PVGIS надає інформацію про сонячну радіацію та продуктивність фотоелектричних систем для заданої географічної точки, а Global Solar Atlas містить карти сонячного ресурсу та фотоелектричного потенціалу для території України [16, 17].

У базовій структурі системи передбачається використання однофазного мережевого інвертора без акумуляторної батареї. Такий варіант відповідає прийнятій мережевій схемі роботи СЕС, у якій електрична мережа виконує балансувальну функцію. За недостатнього виробітку СЕС електроспоживання теплового насоса покривається з мережі, а за наявності надлишкової генерації електроенергія може бути використана іншими споживачами будинку або передана в мережу залежно від прийнятої схеми підключення.

Акумуляторна батарея не входить до базової структури системи, однак може розглядатися як перспективне розширення для підвищення автономності та резервування окремих електричних навантажень. У такому разі силова частина системи повинна передбачати використання гібридного інвертора або окремого батарейного інвертора, а інформаційно-вимірювальна система має бути доповнена каналами контролю стану заряду, потужності заряду/розряду та енергії, накопиченої в акумуляторі.

Таким чином, у подальшому розглядається комбінована бівалентна система енергозабезпечення приватного житлового будинку, до складу якої входять тепловий насос “повітря–вода” орієнтовною тепловою потужністю 6 кВт, дахова СЕС потужністю 4 кВт, однофазна електрична мережа 220 В, водяний контур із буферною ємністю та існуючі резервні джерела теплоти. Інформаційно-вимірювальна система в такій структурі необхідна для збору й обробки даних про теплові, електричні та метеорологічні параметри роботи системи.

## **2.2 Визначення вимірювальних каналів і контрольованих параметрів системи**

Для оцінювання ефективності роботи теплового насоса в поєднанні з даховою сонячною електростанцією необхідно визначити перелік параметрів, які повинні контролюватися інформаційно-вимірювальною системою. Вибір контрольованих параметрів виконується з урахуванням прийнятої в підрозділі 2.1 структури системи: тепловий насос типу “повітря–вода”, водяний контур із буферною ємністю, СЕС потужністю 4 кВт, однофазна електрична мережа 220 В та наявні резервні джерела теплоти.

Інформаційно-вимірювальна система повинна забезпечувати контроль не всіх можливих параметрів обладнання, а саме тих величин, які необхідні для подальшого визначення теплової енергії, електроспоживання, COP, SCOP, виробітку СЕС, частки покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок сонячної генерації та енергетичного балансу системи. Тому вимірювальні канали доцільно поділити на теплові, електричні, метеорологічні та інформаційні.

Основними параметрами водяного контуру є температура теплоносія на подачі, температура теплоносія на звороті та витрата теплоносія. Ці величини необхідні для визначення теплової потужності, яку тепловий насос передає до системи опалення або буферної ємності. Вимірювання тільки температури подачі або тільки температури звороту не дає можливості оцінити фактичну кількість переданої теплоти, тому температурний канал повинен включати щонайменше дві точки контролю.

Канал вимірювання витрати теплоносія є необхідним для розрахунку теплової потужності та кількості виробленої теплової енергії. У поєднанні з різницею температур між подавальним і зворотним трубопроводами витрата теплоносія дозволяє визначати реальну теплову продуктивність теплового насоса в різних режимах роботи. Для подальшого вибору засобів вимірювання цей канал може бути реалізований окремим витратоміром або теплолічильником.

Електричні параметри теплового насоса необхідні для оцінювання його енергоспоживання. До них належать напруга, струм, активна електрична потужність і спожита електрична енергія. Активна потужність використовується для визначення поточного значення COP, а накопичене значення електроенергії — для розрахунку сезонного показника SCOP. Оскільки будинок має однофазне електропостачання з дозволеною потужністю 5 кВт, контроль електричного навантаження також потрібний для оцінювання режимів роботи системи без перевищення допустимої потужності підключення.

Для сонячної електростанції основними контрольованими параметрами є поточна активна потужність генерації та кількість виробленої електричної енергії. Ці дані необхідні для визначення частки електроспоживання теплового насоса, яка може бути покрита за рахунок СЕС. У базовій мережевій схемі також доцільно контролювати обсяг електроенергії, спожитої з мережі, та, за потреби, обсяг надлишкової електроенергії, переданої в мережу або використаної іншими споживачами будинку.

Окрему групу становлять метеорологічні параметри. Для аналізу роботи теплового насоса типу “повітря–вода” важливо контролювати температуру зовнішнього повітря, оскільки вона безпосередньо впливає на теплову потужність і COP. Для аналізу роботи СЕС важливим параметром є сонячна радіація на площині фотоелектричних модулів або на горизонтальній поверхні з подальшим перерахунком. Контроль сонячної радіації дозволяє відрізнити зниження виробітку через погодні умови від можливого зниження ефективності самої фотоелектричної системи.

Інформаційно-вимірювальна система також повинна забезпечувати часову синхронізацію даних. Для комбінованої системи “тепловий насос — СЕС” важливо не лише знати сумарні добові або місячні значення виробітку та споживання, а й порівнювати їх у однакові проміжки часу. Якщо дані про генерацію СЕС і споживання теплового насоса мають різну часову прив’язку, оцінювання частки покриття навантаження може бути неточним.

Узагальнений перелік основних вимірювальних каналів і контрольованих параметрів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні вимірювальні канали та контрольовані параметри системи

| Вимірювальний канал                      | Контрольований параметр                             | Одиниця вимірювання | Призначення                                                       |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Температурний канал подачі               | Температура теплоносія на виході з теплового насоса | °C                  | Визначення температурного режиму водяного контуру                 |
| Температурний канал звороту              | Температура теплоносія на вході в тепловий насос    | °C                  | Визначення різниці температур теплоносія                          |
| Канал витрати теплоносія                 | Об'ємна або масова витрата теплоносія               | м³/год або кг/с     | Розрахунок теплової потужності та теплової енергії                |
| Канал електроспоживання теплового насоса | Напруга, струм, активна потужність, електроенергія  | В, А, кВт, кВт·год  | Визначення електроспоживання, COP і SCOP                          |
| Канал генерації СЕС                      | Потужність та вироблена електроенергія СЕС          | кВт, кВт·год        | Оцінювання виробітку сонячної електростанції                      |
| Канал обміну з мережею                   | Енергія, спожита з мережі або передана в мережу     | кВт·год             | Побудова енергетичного балансу системи                            |
| Канал зовнішньої температури             | Температура зовнішнього повітря                     | °C                  | Оцінювання впливу погодних умов на роботу теплового насоса        |
| Канал сонячної радіації                  | Густина сонячного випромінювання                    | Вт/м²               | Аналіз умов роботи фотоелектричних модулів                        |
| Канал часової синхронізації              | Часова мітка вимірювання                            | дата, час           | Узгодження даних генерації, споживання та теплової продуктивності |

Для подальшої обробки даних доцільно передбачити періодичний збір вимірювальної інформації з подальшим усередненням за задані інтервали часу. Поточні значення температури, витрати, електричної потужності та сонячної генерації можуть реєструватися з малим часовим кроком, а для розрахунку добових, місячних і сезонних показників ефективності дані повинні накопичуватися в архіві. Це дозволить оцінювати не лише миттєві режими роботи, а й загальну ефективність системи за триваліший період.

Таким чином, для моніторингу прийнятої комбінованої системи необхідно контролювати теплові параметри водяного контуру, електричні параметри теплового насоса, виробіток СЕС, обмін електроенергією з мережею, температуру зовнішнього повітря, сонячну радіацію та часову прив'язку вимірювань. Визначені параметри є основою для подальшого вибору засобів вимірювання та обладнання інформаційно-вимірювальної системи.

### **2.3 Вибір засобів вимірювання та обладнання інформаційно-вимірювальної системи**

Вибір засобів вимірювання та обладнання інформаційно-вимірювальної системи виконується відповідно до прийнятої структури комбінованої системи, що включає тепловий насос типу “повітря–вода”, дахову СЕС потужністю близько 4 кВт, однофазну електричну мережу 220 В, водяний контур із буферною ємністю та резервні джерела теплоти. Основним призначенням ІВС є отримання достовірних даних для подальшого визначення теплової потужності, виробленої теплової енергії, електроспоживання теплового насоса, виробітку СЕС, COP, SCOP та частки покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок сонячної генерації.

У даній роботі вибір обладнання виконується на рівні розрахункової комплектації. Це означає, що для основних елементів системи приймаються конкретні моделі обладнання з відомими технічними характеристиками. Такий підхід дозволяє надалі виконати не лише енергетичні розрахунки, а й оцінити похибки вимірювання та орієнтовну економічну доцільність застосування системи.

Як тепловий насос для подальшого аналізу приймається модель Vaillant aroTHERM plus VWL 55/6 A 230V S2. Це тепловий насос типу “повітря–вода” з однофазним живленням 230 В, що відповідає прийнятій структурі електропостачання будинку. Для цієї моделі виробник наводить теплову

потужність у різних температурних режимах, зокрема для режимів A7/W35, A7/W55 та A-7/W35, що дає можливість враховувати зміну ефективності залежно від температури зовнішнього повітря та температури теплоносія [19]. Для умов даної роботи цей тепловий насос розглядається як елемент бівалентної системи, тобто як джерело теплоти для покриття базової частини теплового навантаження.

Для дахової сонячної електростанції приймаються фотоелектричні модулі JA Solar JAM54D41-445/LB. Номінальна потужність одного модуля становить 445 Вт, тому для формування СЕС потужністю близько 4 кВт приймається дев'ять модулів:

$$P_{\text{СЕС}} = 9 \cdot 445 = 4005 \text{ Вт} \approx 4,0 \text{ кВт}$$

За паспортними характеристиками одного модуля напруга в точці максимальної потужності становить близько 32,65 В, струм у точці максимальної потужності — близько 13,63 А, напруга холостого ходу — близько 39,1 В, а струм короткого замикання — близько 14,4 А [20]. Для послідовного з'єднання дев'яти модулів напруга в точці максимальної потужності становитиме приблизно:

$$U_{\text{mpp},\Sigma} = 9 \cdot 32,65 = 293,85 \text{ В}$$

Напруга холостого ходу такого стрінга становитиме:

$$U_{\text{oc},\Sigma} = 9 \cdot 39,1 = 351,9 \text{ В}$$

Отримані значення відповідають діапазону роботи сучасних однофазних мережевих інверторів, що дозволяє використовувати один стрінг фотоелектричних модулів на південному скаті даху.

Як мережевий інвертор для СЕС приймається GoodWe GW4000-DNS-30 серії DNS G3. Інвертори цієї серії призначені для однофазних побутових фотоелектричних систем потужністю 3–6 кВт, мають два MPPT-входи та допускають струм до 16 А на один стрінг, що є важливим для сумісності з сучасними високострумовими фотоелектричними модулями [21]. Оскільки

струм у точці максимальної потужності прийнятого модуля JA Solar становить близько 13,63 А, а струм короткого замикання — близько 14,4 А, вибраний інвертор є сумісним із прийнятим стрінгом із дев'яти модулів.

Для вимірювання теплової енергії доцільно застосувати теплолічильник, який поєднує витратомір, пару температурних датчиків та обчислювач теплової енергії. У роботі як розрахунковий варіант приймається теплолічильник Kamstrup MULTICAL 403 з ультразвуковим витратоміром. Цей тип теплолічильника відповідає структурі засобу вимірювання теплової енергії, що складається з витратоміра, температурних датчиків та обчислювача відповідно до загальних вимог EN 1434-1 [15]. Для моделі MULTICAL 403 виробник наводить діапазон номінальних витрат від  $q_p = 0,6$  до  $15 \text{ м}^3/\text{год}$ , що дозволяє підібрати виконання під малу систему теплопостачання [22].

Для теплового насоса орієнтовною тепловою потужністю 6 кВт очікувана витрата теплоносія залежить від прийнятої різниці температур між подачею та зворотом. За різниці температур  $5\text{--}10 \text{ }^\circ\text{C}$  орієнтовна витрата становитиме приблизно  $0,5\text{--}1,0 \text{ м}^3/\text{год}$ . Тому для даної системи доцільно прийняти теплолічильник із номінальною витратою  $q_p=1,5 \text{ м}^3/\text{год}$ , що забезпечує достатній запас за діапазоном вимірювання.

Для контролю електроспоживання теплового насоса приймається однофазний лічильник електричної енергії Eastron SDM230-Modbus. Цей лічильник призначений для встановлення на DIN-рейку, підтримує вимірювання напруги, струму, активної потужності, коефіцієнта потужності, частоти та електричної енергії, а також має інтерфейс RS-485 Modbus для передавання даних до системи моніторингу [23]. Вимоги до статичних лічильників активної електричної енергії класів точності 0,5, 1 і 2 визначаються стандартом IEC 62053-21:2020 [14]. Для даної роботи приймається використання лічильника класу точності не нижче 1, що є достатнім для задач енергетичного моніторингу побутової комбінованої системи.

Для контролю виробітку СЕС можуть використовуватися як дані інвертора GoodWe, так і окремий електролічильник на виході інвертора. З метою

підвищення достовірності енергетичного балансу в ІВС доцільно передбачити окремий канал обліку електроенергії, виробленої СЕС. Для цього також може бути використаний лічильник типу Eastron SDM230-Modbus або аналогічний однофазний лічильник із цифровим інтерфейсом. Такий підхід дозволяє окремо фіксувати електроенергію, вироблену СЕС, електроенергію, спожиту тепловим насосом, та електроенергію, отриману з мережі.

Для додаткового вимірювання температури теплоносія в окремих точках водяного контуру можуть застосовуватися термоперетворювачі опору Pt100. У роботі як приклад приймається датчик температури WIKA TR10-C, призначений для вимірювання температури рідких і газоподібних середовищ у трубопроводах та технологічних установках [24]. Характеристики платинових термоперетворювачів опору визначаються стандартом ІЕС 60751 [18]. Для зменшення похибки визначення різниці температур між подачею та зворотом бажано використовувати узгоджену пару температурних датчиків або покази датчиків, що входять до складу теплолічильника.

Для вимірювання температури зовнішнього повітря приймається датчик WIKA TF41 з вимірювальним елементом Pt100 або Pt1000. Ця модель призначена для вимірювання температури зовнішнього повітря та може застосовуватися в умовах експлуатації на відкритому повітрі [25]. Температура зовнішнього повітря є важливою величиною для аналізу роботи теплового насоса типу “повітря–вода”, оскільки вона впливає на його теплову потужність та COP.

Для контролю сонячної радіації приймається пірометр/піранометр Arogee SP-110. Даний датчик призначений для вимірювання короткохвильової сонячної радіації, має калібрувальний коефіцієнт  $5,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  на 1 мВ та чутливість 0,2 мВ на  $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  [26]. Його доцільно встановлювати в площині фотоелектричних модулів або в місці, що характеризує умови опромінення південного скату даху. Дані про сонячну радіацію потрібні для порівняння фактичного виробітку СЕС з очікуваним та для оцінювання впливу погодних умов на роботу фотоелектричної системи. Загальні підходи до моніторингу фотоелектричних систем узгоджуються з ДСТУ EN ІЕС 61724-1:2022 [8].

Центральним елементом збору та передавання даних приймається контролер WAGO PFC200 750-8212. Він має Ethernet-інтерфейси та порт RS-232/RS-485, що дає можливість організувати обмін даними з лічильниками, інвертором, модулями введення-виведення та іншими елементами ІВС [27]. Контролер виконує функції збору даних, часової прив'язки вимірювань, передавання інформації на персональний комп'ютер або сервер, а також може використовуватися для попередньої обробки вимірювальної інформації.

Вибрана комплектація дозволяє отримати всі необхідні параметри для подальшого розрахунку ефективності комбінованої системи. Теплолічильник забезпечує визначення теплової енергії, електролічильники — контроль електроспоживання теплового насоса і виробітку СЕС, датчики зовнішньої температури та сонячної радіації — врахування погодних умов, а контролер — збір і синхронізацію даних. Такий склад обладнання забезпечує логічний зв'язок між вимірювальною частиною системи, розрахунком енергетичних показників і подальшим метрологічним оцінюванням.

Прийняті моделі обладнання не обмежують можливості використання аналогічних пристроїв інших виробників, однак у межах цієї роботи саме наведена комплектація використовується як розрахункова основа для подальших розділів. Це дозволяє виконати оцінювання похибок вимірювання, побудувати енергетичний баланс та визначити орієнтовну економічну доцільність застосування інформаційно-вимірювальної системи.

## **2.4 Розроблення структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи**

На основі визначених у підрозділі 2.2 контрольованих параметрів та вибраного в підрозділі 2.3 обладнання розробляється структурна схема інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу роботи теплового насоса та сонячної електростанції. Структурна схема повинна відображати основні

елементи комбінованої системи, вимірювальні канали, напрямки передавання даних та зв'язок між енергетичною і інформаційною частинами системи.

Прийнята система складається з двох взаємопов'язаних частин: енергетичної та інформаційно-вимірювальної. До енергетичної частини належать дахова сонячна електростанція, мережевий інвертор, електрична мережа, тепловий насос типу “повітря–вода”, водяний контур із буферною ємністю та резервні джерела теплоти. Інформаційно-вимірювальна частина включає теплолічильник, електролічильники, датчики температури, датчик сонячної радіації, контролер збору даних та програмне забезпечення для архівування й обробки вимірювальної інформації.

Структурну схему інформаційно-вимірювальної системи наведено на рисунку 2.2.

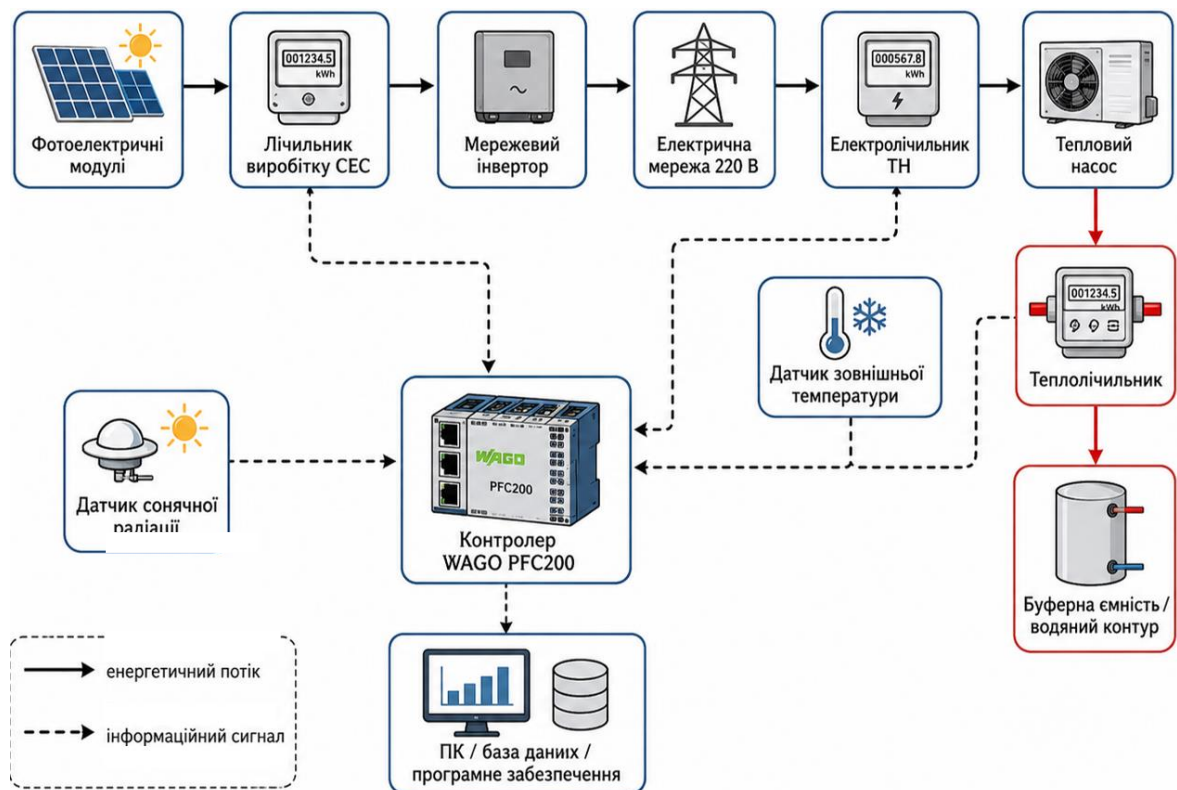


Рисунок 2.2 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи моніторингу теплового насоса та СЕС

Електрична частина системи побудована за мережевою схемою. Фотоелектричні модулі JA Solar JAM54D41-445/LB з'єднуються в один стрінг і підключаються до входу мережевого інвертора GoodWe GW4000-DNS-30. Інвертор перетворює постійний струм, вироблений фотоелектричними модулями, у змінний струм однофазної мережі 220 В. Серія DNS G3 призначена для однофазних побутових фотоелектричних систем і має два MPPT-входи, що дозволяє застосовувати її в малих дахових СЕС житлових будинків [21].

Вихід інвертора підключається до електричної мережі будинку через захисну апаратуру та вузол обліку. Електрична енергія, вироблена СЕС, може використовуватися для живлення теплового насоса та інших електроприймачів будинку. У разі недостатнього виробітку СЕС необхідна електроенергія надходить із зовнішньої мережі. Така схема відповідає прийнятому в роботі варіанту без акумуляторної батареї, де електрична мережа виконує балансувальну функцію.

Для контролю електроспоживання теплового насоса в схемі передбачається окремий однофазний електролічильник Easton SDM230-Modbus. Він встановлюється в колі живлення теплового насоса та забезпечує вимірювання напруги, струму, активної потужності, коефіцієнта потужності та спожитої електричної енергії. Наявність інтерфейсу RS-485 Modbus дозволяє передавати ці дані безпосередньо до контролера інформаційно-вимірювальної системи [23].

Для контролю виробітку СЕС у структурній схемі передбачається використання даних інвертора та/або окремого електролічильника на виході інвертора. Окремий канал обліку виробленої електроенергії дає змогу незалежно фіксувати поточну потужність та сумарний виробіток СЕС. Це необхідно для подальшого визначення частки електроспоживання теплового насоса, яка покривається за рахунок сонячної генерації.

Теплова частина системи включає тепловий насос Vaillant aroTHERM plus VWL 55/6 A 230V S2, водяний контур і буферну ємність. Тепловий насос передає теплоту теплоносію, який циркулює через буферну ємність і систему

тепловіддачі. У цій схемі буферна ємність виконує функцію проміжної ланки між тепловим насосом і системою опалення, а також створює зручні умови для організації вимірювання теплової енергії.

Для визначення теплової потужності та кількості виробленої теплової енергії в схемі використовується теплолічильник Kamstrup MULTICAL 403. Він поєднує ультразвуковий витратомір, пару температурних датчиків і обчислювач теплової енергії. Виробник зазначає для MULTICAL 403 ультразвуковий принцип вимірювання та діапазон номінальних витрат від  $q_p=0,6$  до  $15 \text{ м}^3/\text{год}$ , що дозволяє підібрати виконання для малої системи тепlopостачання [22].

Температурні датчики теплолічильника встановлюються на подавальному та зворотному трубопроводах водяного контуру. Витратомір встановлюється на ділянці трубопроводу, де забезпечується стабільний режим руху теплоносія. За вимірними значеннями витрати теплоносія та різниці температур теплолічильник визначає кількість теплоти, переданої від теплового насоса до водяного контуру. Ці дані є основою для розрахунку фактичної теплової потужності та коефіцієнта перетворення COP.

Для врахування впливу зовнішніх умов у структурній схемі передбачено два метеорологічні канали: канал вимірювання температури зовнішнього повітря та канал вимірювання сонячної радіації. Температура зовнішнього повітря використовується для аналізу роботи теплового насоса типу “повітря–вода”, оскільки вона впливає на його теплову потужність та ефективність. Сонячна радіація використовується для оцінювання умов роботи фотоелектричних модулів та порівняння фактичного виробітку СЕС з очікуваним. Для вимірювання сонячної радіації прийнято датчик Apogee SP-110, у документації якого наведено калібрувальний коефіцієнт  $5,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}/\text{мВ}$  [26].

Центральним елементом інформаційно-вимірювальної системи є контролер WAGO PFC200 750-8212. До нього надходять дані від електролічильників, теплолічильника, датчиків температури, датчика сонячної радіації та інвертора СЕС. Контролер виконує функції збору даних, часової синхронізації, первинної обробки та передавання інформації на персональний комп'ютер або локальний

сервер. Модель WAGO PFC200 750-8212 має два Ethernet-інтерфейси та порт RS-232/RS-485, що дає можливість організувати обмін даними з пристроями вимірювання та системою візуалізації [27].

Передавання вимірювальної інформації в системі здійснюється кількома способами залежно від типу засобу вимірювання. Електролічильники можуть передавати дані через RS-485/Modbus. Теплолічильник може передавати дані через імпульсний вихід, M-Bus або інший доступний інтерфейс залежно від виконання. Датчик сонячної радіації формує аналоговий сигнал, який подається на відповідний модуль аналогового введення контролера. Дані інвертора можуть передаватися через вбудовані засоби моніторингу або через доступний цифровий інтерфейс.

У програмній частині системи передбачається архівування вимірювань із часовою міткою, формування добових, місячних і сезонних масивів даних, а також підготовка інформації для подальших розрахунків. До основних розрахункових показників, які формуються на основі даних ІВС, належать теплова енергія, електроспоживання теплового насоса, виробіток СЕС, СОР, SCOP, частка покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС та електричний баланс системи.

Узагальнено структура інформаційно-вимірювальної системи може бути подана такими функціональними зв'язками:

- фотоелектричні модулі → мережевий інвертор → електрична мережа будинку;
- електрична мережа будинку → електролічильник теплового насоса → тепловий насос;
- тепловий насос → водяний контур → буферна ємність → система тепловіддачі;
- теплолічильник → контролер збору даних;
- електролічильники та інвертор СЕС → контролер збору даних;

- датчик зовнішньої температури та датчик сонячної радіації → контролер збору даних;
- контролер збору даних → ПК / сервер / програмне забезпечення обробки.

Отже, розроблена структурна схема забезпечує взаємозв'язок між енергетичними елементами системи та засобами вимірювання. Її застосування дозволяє отримувати необхідні дані для оцінювання роботи теплового насоса, СЕС і комбінованої системи загалом. Запропонована структура також створює основу для подальшого опису методики збору, передавання та первинної обробки вимірювальної інформації.

## **2.5 Методика збору, передавання, первинної обробки даних та алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи**

Методика збору та обробки вимірювальної інформації визначає порядок отримання даних від засобів вимірювання, їх передавання до контролера, первинної обробки, збереження та подальшого використання для розрахунку показників ефективності комбінованої системи. У даній роботі інформаційно-вимірювальна система призначена для моніторингу роботи теплового насоса, дахової сонячної електростанції, водяного контуру та електричної мережі будинку.

Збір даних здійснюється з основних вимірювальних каналів, визначених у попередніх підрозділах. До них належать: канал вимірювання теплової енергії, канал електроспоживання теплового насоса, канал виробітку СЕС, канал обміну електроенергією з мережею, канал зовнішньої температури та канал сонячної радіації. Отримані дані передаються до контролера WAGO PFC200, який виконує функції збору, часової синхронізації та передавання інформації на ПК або локальний сервер.

Теплова енергія, передана тепловим насосом у водяний контур, визначається за даними теплотічника Kamstrup MULTICAL 403.

Теплолічильник вимірює витрату теплоносія, температуру подачі, температуру звороту та обчислює кількість теплоти, переданої в систему. Такий принцип відповідає загальній структурі теплолічильника, який складається з витратоміра, пари температурних датчиків та обчислювача теплової енергії [15, 22].

Електроспоживання теплового насоса визначається окремим однофазним електролічильником Eastron SDM230-Modbus. Він вимірює напругу, струм, активну потужність, коефіцієнт потужності та спожиту електричну енергію. Передавання даних до контролера здійснюється через інтерфейс RS-485 Modbus [23]. Дані про виробіток CEC отримуються з мережевого інвертора GoodWe GW4000-DNS-30 та/або окремого лічильника електроенергії на виході інвертора [21].

Для врахування зовнішніх умов у системі використовуються дані про температуру зовнішнього повітря та сонячну радіацію. Температура зовнішнього повітря необхідна для аналізу роботи теплового насоса типу “повітря–вода”, оскільки вона впливає на його теплову потужність і COP. Дані про сонячну радіацію, отримані від датчика Apogee SP-110, використовуються для оцінювання умов роботи фотоелектричних модулів та зіставлення рівня сонячного випромінювання з фактичним виробітком CEC [26].

Передавання вимірювальної інформації здійснюється через цифрові та аналогові канали. Електролічильники передають дані за протоколом Modbus через інтерфейс RS-485. Дані теплолічильника можуть передаватися через доступний інтерфейс або імпульсний вихід залежно від виконання приладу. Аналогові сигнали від датчиків зовнішніх параметрів подаються на відповідні модулі введення контролера. Контролер WAGO PFC200 забезпечує приймання, обробку та передавання даних через Ethernet або інші доступні інтерфейси [27].

Первинна обробка вимірювальної інформації включає присвоєння часової мітки, перевірку коректності значень, усереднення даних за заданий інтервал часу та збереження результатів в архіві. Перевірка коректності потрібна для відкидання очевидно помилкових значень, які можуть виникати через короточасні збої зв'язку, некоректне зчитування або відсутність сигналу з

окремого каналу. Усереднення дає змогу зменшити вплив випадкових коливань вимірюваних параметрів і сформувати масиви даних для подальших розрахунків.

Алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи можна подати у такій послідовності:

1. запуск системи та ініціалізація вимірювальних каналів;
2. зчитування даних із теплолічильника, електролічильників, інвертора СЕС та метеорологічних датчиків;
3. присвоєння часової мітки кожному набору вимірювань;
4. перевірка коректності отриманих значень;
5. передавання даних до контролера;
6. первинне усереднення та формування архіву вимірювань;
7. передавання даних на ПК або локальний сервер;
8. підготовка даних для розрахунку теплової енергії, електроспоживання, виробітку СЕС, COP, SCOP та енергетичного балансу.

На основі збережених даних у наступному розділі виконуються розрахунки основних енергетичних і метрологічних показників. До них належать теплова потужність теплового насоса, вироблена теплова енергія, електроенергія, спожита тепловим насосом, виробіток СЕС, коефіцієнт COP, сезонний показник SCOP, частка покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС та похибки визначення основних параметрів.

Таким чином, запропонована методика забезпечує послідовний перехід від вимірювання фізичних величин до формування розрахункових показників ефективності комбінованої системи. Вона також створює основу для подальшого метрологічного оцінювання достовірності отриманих результатів.

## 2.6 Висновок до розділу 2

У другому розділі було обґрунтовано структуру інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу роботи теплового насоса в поєднанні з даховою сонячною електростанцією. Як об'єкт дослідження прийнято бівалентну систему енергозабезпечення приватного житлового будинку, що включає тепловий насос типу “повітря–вода”, СЕС потужністю близько 4 кВт, однофазну електричну мережу 220 В, водяний контур із буферною ємністю та наявні резервні джерела теплоти.

Визначено основні вимірювальні канали системи: контроль температури подачі та звороту теплоносія, витрати теплоносія, електроспоживання теплового насоса, виробітку СЕС, обміну електроенергією з мережею, температури зовнішнього повітря та сонячної радіації. Для реалізації цих каналів обґрунтовано вибір обладнання інформаційно-вимірювальної системи, зокрема теплового насоса, фотоелектричних модулів, інвертора, теплолічильника, електролічильників, метеорологічних датчиків і контролера збору даних.

Розроблена структурна схема та методика збору, передавання й первинної обробки даних забезпечують отримання вимірювальної інформації, необхідної для подальшого розрахунку теплової енергії, електроспоживання, виробітку СЕС, COP, SCOP, частки покриття споживання теплового насоса за рахунок СЕС та оцінювання похибок вимірювання. Отже, другий розділ формує технічну основу для виконання розрахунків і метрологічного оцінювання.

## РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

### 3.1 Вихідні дані для розрахунку ефективності системи

Для виконання розрахунково-аналітичного оцінювання роботи системи “тепловий насос — СЕС” необхідно сформулювати вихідні дані, які характеризують об’єкт дослідження, основне енергетичне обладнання, засоби вимірювання та параметри, що використовуються для подальших розрахунків. У даній роботі розрахунки виконуються для комбінованої енергетичної системи приватного житлового будинку, до складу якої входять тепловий насос типу “повітря–вода”, дахова сонячна електростанція, однофазна електрична мережа, водяний контур із буферною ємністю та інформаційно-вимірювальна система моніторингу.

Базовим об’єктом навантаження є приватний житловий будинок, розташований у селі Черемхів Коломийського району Івано-Франківської області. Загальна площа будинку становить 100,6 м<sup>2</sup>, житлова площа — 57,9 м<sup>2</sup>. Будинок має комбіновану систему теплопостачання, у якій наявні грубки на дровах, газові конвектори та електричний конвектор. У межах даної роботи тепловий насос розглядається як елемент модернізованої бівалентної системи теплопостачання, тобто як джерело теплоти для покриття базової частини теплового навантаження будівлі.

Для подальшого аналізу приймається тепловий насос Vaillant aroTHERM plus VWL 55/6 A 230V S2. Це тепловий насос типу “повітря–вода” з однофазним живленням 230 В, що відповідає прийнятій структурі електропостачання будинку. Орієнтовна теплова потужність теплового насоса для розрахунків приймається на рівні 6 кВт. Це значення відповідає умовам часткового покриття теплового навантаження будинку та враховує обмеження дозволеної електричної потужності підключення.

Дахова сонячна електростанція приймається потужністю близько 4 кВт. Для її формування використовуються дев'ять фотоелектричних модулів JA Solar JAM54D41-445/LB номінальною потужністю 445 Вт кожний [20]. Загальна встановлена потужність СЕС визначається за формулою:

$$P_{\text{СЕС}} = n \cdot P_{\text{мод}} \quad (3.1)$$

де  $P_{\text{СЕС}}$  — встановлена потужність сонячної електростанції, Вт;

$n$  — кількість фотоелектричних модулів;

$P_{\text{мод}}$  — номінальна потужність одного фотоелектричного модуля, Вт.

Підставивши прийняті значення, отримаємо:

$$P_{\text{СЕС}} = 9 \cdot 445 = 4005 \text{ Вт} \approx 4 \text{ кВт} \quad (3.2)$$

Отже, у подальших розрахунках встановлена потужність СЕС приймається рівною 4,0 кВт. Для перетворення електричної енергії, виробленої фотоелектричними модулями, використовується однофазний мережевий інвертор GoodWe GW4000-DNS-30 [21]. Система розглядається без акумуляторної батареї, тому електрична мережа виконує балансувальну функцію: у разі недостатнього виробітку СЕС електроенергія надходить із мережі, а за наявності надлишкової генерації вона може бути використана іншими споживачами будинку або передана в мережу.

Для визначення теплової енергії, виробленої тепловим насосом, у системі передбачається використання теплотічильника Kamstrup MULTICAL 403 з ультразвуковим витратоміром [22]. Для контролю електроспоживання теплового насоса та виробітку СЕС приймаються однофазні електротічильники Eastron SDM230-Modbus з інтерфейсом RS-485 Modbus [23]. Для врахування зовнішніх умов роботи системи використовуються датчик температури зовнішнього

повітря WIKA TF41 та датчик сонячної радіації Arpree SP-110 [25, 26]. Збір, синхронізація та передавання даних здійснюються контролером WAGO PFC200 750-8212 [27].

Наведені вихідні дані використовуються як розрахункова основа для визначення теплової енергії, електроспоживання теплового насоса, коефіцієнтів COP і SCOP, очікуваного виробітку СЕС, частки покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок сонячної генерації та енергетичного балансу системи. Оскільки робота має розрахунково-аналітичний характер, прийняті значення не розглядаються як результати тривалих натурних випробувань, а використовуються для демонстрації методики оцінювання ефективності системи на основі даних інформаційно-вимірювальної системи.

### **3.2 Розрахунок теплової енергії, електроспоживання та COP/SCOP теплового насоса**

Оцінювання ефективності роботи теплового насоса виконується на основі співвідношення між кількістю теплової енергії, переданої у водяний контур, та електричною енергією, спожитою тепловим насосом. У межах даної роботи тепла енергія визначається за даними теплолічильника або за виміряними значеннями витрати теплоносія і різниці температур між подавальним та зворотним трубопроводами. Такий підхід відповідає структурі вимірювання теплової енергії, за якої використовуються витратомір, пара температурних датчиків та обчислювач теплоти [15, 22].

Теплова потужність, яку тепловий насос передає у водяний контур, визначається за формулою:

$$Q_{\text{тепл}} = G \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \quad (3.3)$$

Де  $Q_{\text{тепл}}$  — теплова потужність, Вт;

$G$  — масова витрата теплоносія, кг/с;

$c$  — питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·°С);

$t_1$  — температура теплоносія у подавальному трубопроводі, °С;

$t_2$  — температура теплоносія у зворотному трубопроводі, °С.

Для водяного контуру приймається, що теплоносієм є вода, густина якої становить приблизно 1000 кг/м<sup>3</sup>, а питома теплоємність — 4187 Дж/(кг·°С). Для розрахункового режиму приймається теплова потужність теплового насоса  $Q_{\text{тепл}} = 6$  кВт та різниця температур між подачею і зворотом  $\Delta t = 7$  °С. Тоді необхідну масову витрату теплоносія можна визначити з формули (3.3):

$$G = \frac{Q_{\text{тепл}}}{c \cdot \Delta t} \quad (3.4)$$

Підставивши прийняті значення, отримаємо:

$$G = \frac{6000}{4187 \cdot 7} = 0,205 \text{ кг/с} \quad (3.5)$$

Оскільки для води 1 кг приблизно відповідає 1 л, об'ємна витрата теплоносія становитиме:

$$V = 0,205 \cdot 3,6 = 0,768 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.6)$$

Отримане значення витрати перебуває в межах, характерних для малої системи тепlopостачання з тепловим насосом потужністю близько 6 кВт. Це

підтверджує доцільність використання теплолічильника з номінальною витратою близько  $q_p = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$ , прийнятого в попередньому розділі.

Для визначення кількості теплової енергії за певний проміжок часу використовується залежність:

$$Q_{\text{тепл.ен}} = Q_{\text{тепл}} \cdot \tau \quad (3.7)$$

де  $Q_{\text{тепл.ен}}$  — кількість теплової енергії, кВт·год;

$Q_{\text{тепл}}$  — середня теплова потужність теплового насоса, кВт;

$\tau$  — тривалість роботи теплового насоса, год.

Якщо прийняти, що тепловий насос працює 8 годин на добу із середньою тепловою потужністю 6 кВт, то добова кількість виробленої теплової енергії становитиме:

$$Q_{\text{тепл.доб}} = 6 \cdot 8 = 48 \text{ кВт} \quad (3.8)$$

Електрична енергія, спожита тепловим насосом, визначається за показами електролічильника або за середньою електричною потужністю та тривалістю роботи:

$$W_{\text{ел}} = P_{\text{ел}} \cdot \tau \quad (3.9)$$

де  $W_{\text{ел}}$  — електрична енергія, спожита тепловим насосом, кВт·год;

$P_{\text{ел}}$  — електрична потужність теплового насоса, кВт;

$\tau$  — тривалість роботи, год.

Для розрахункового прикладу приймається середня електрична потужність теплового насоса  $P_{\text{ел}} = 1,8$  кВт. Тоді за 8 годин роботи електроспоживання становитиме:

$$W_{\text{ел}} = 1,8 \cdot 8 = 14,4 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.10)$$

Основним показником ефективності теплового насоса є коефіцієнт перетворення теплоти COP. Він визначається як відношення теплової потужності до спожитої електричної потужності:

$$COP = \frac{Q_{\text{тепл}}}{P_{\text{ел}}} \quad (3.11)$$

де COP — коефіцієнт перетворення теплоти;

$Q_{\text{тепл}}$  — теплова потужність, кВт;

$P_{\text{ел}}$  — електрична потужність, кВт.

Для прийнятого розрахункового режиму:

$$COP = \frac{6}{1,8} = 3,33 \quad (3.12)$$

Отже, за розрахункових умов тепловий насос виробляє приблизно 3,33 кВт·год теплової енергії на кожну 1 кВт·год спожитої електричної енергії. Це значення не слід розглядати як постійну характеристику обладнання, оскільки фактичний COP змінюється залежно від температури зовнішнього повітря, температури теплоносія, режиму роботи компресора та інших експлуатаційних чинників. Стандартизовані методи визначення характеристик теплових насосів

розглядаються у ДСТУ EN 14511-3:2023, однак для реальних умов експлуатації доцільно використовувати фактичні виміряні дані [3].

Для сезонного оцінювання ефективності використовується сезонний коефіцієнт перетворення SCOP:

$$SCOP = \frac{Q_{\text{тепл.сез}}}{W_{\text{ел.сез}}} \quad (3.13)$$

де SCOP — сезонний коефіцієнт перетворення теплоти;

$Q_{\text{тепл.сез}}$  — теплова енергія, вироблена тепловим насосом за сезон, кВт·год;

$W_{\text{ел.сез}}$  — електрична енергія, спожита тепловим насосом за сезон, кВт·год.

Для розрахункового прикладу приймається, що за опалювальний період тепловий насос передає у водяний контур 7200 кВт·год теплової енергії, а його електроспоживання становить 2400 кВт·год. Тоді:

$$SCOP = \frac{Q_{\text{тепл.сез}}}{W_{\text{ел.сез}}} \quad (3.14)$$

Отримане значення SCOP показує середню сезонну ефективність роботи теплового насоса з урахуванням зміни режимів протягом опалювального періоду. На відміну від COP, який характеризує окремий режим роботи, SCOP є більш придатним для оцінювання загального енергетичного результату системи. Підходи до визначення сезонних характеристик теплових насосів наведені у ДСТУ EN 14825:2023 [4].

Таким чином, для прийнятого розрахункового режиму теплова потужність теплового насоса становить 6 кВт, орієнтовна витрата теплоносія — 0,738 м³/год, добова кількість виробленої теплової енергії за 8 годин роботи — 48 кВт·год, добове електроспоживання — 14,4 кВт·год, а коефіцієнт перетворення COP — 3,33. Сезонний коефіцієнт SCOP для прийнятого прикладу становить 3,0. Надалі

ці значення використовуються для оцінювання можливості покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок сонячної електростанції.

### **3.3 Розрахунок виробітку СЕС та частки покриття електроспоживання теплового насоса**

Для оцінювання можливості покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок сонячної електростанції необхідно визначити очікуваний виробіток СЕС. У даній роботі прийнято дахову фотоелектричну систему потужністю  $P_{\text{СЕС}} = 4,0$  кВт, що складається з дев'яти модулів JA Solar потужністю 445 Вт кожний.

Річний виробіток СЕС можна визначити за питомим виробітком фотоелектричної системи:

$$W_{\text{СЕС,річ}} = P_{\text{СЕС}} \cdot \omega_{\text{пит}} \quad (3.15)$$

де  $W_{\text{СЕС,річ}}$  — річний виробіток сонячної електростанції, кВт·год;

$P_{\text{СЕС}}$  — встановлена потужність СЕС, кВт;

$\omega_{\text{пит}}$  — питомий річний виробіток СЕС, кВт·год/кВт.

Для Івано-Франківської області питомий річний виробіток дахових СЕС орієнтовно можна прийняти на рівні 1000 кВт·год/кВт. Таке значення відповідає типовому порядку фотоелектричного потенціалу для західних областей України за даними PVGIS та Global Solar Atlas [16, 17]. Тоді:

$$W_{\text{СЕС,річ}} = 4 \cdot 1000 = 4000 \text{ кВт/год} \quad (3.16)$$

Отже, очікуваний річний виробіток СЕС потужністю 4 кВт становить приблизно 4000 кВт·год. Це значення є розрахунковим і може змінюватися залежно від орієнтації модулів, кута нахилу, затінення, температури панелей, втрат в інверторі та погодних умов.

Для оцінювання спільної роботи СЕС і теплового насоса важливо враховувати не лише сумарний річний виробіток, а й сезонну нерівномірність генерації. Найбільше електроенергії СЕС виробляє у весняно-літній період, тоді як основне споживання теплового насоса припадає на опалювальний сезон. Тому вся вироблена СЕС електроенергія не може бути безпосередньо використана тепловим насосом.

У попередньому підрозділі для розрахункового прикладу прийнято сезонне електроспоживання теплового насоса:

$$W_{\text{TH,сез}} = 2400 \text{ кВт/год}$$

Частка покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС визначається за формулою:

$$K_{\text{покp}} = \frac{W_{\text{СЕС} \rightarrow \text{ТН}}}{W_{\text{ТН}}} \quad (3.17)$$

де  $K_{\text{покp}}$  — частка покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС, %;

$W_{\text{СЕС} \rightarrow \text{ТН}}$  — електроенергія СЕС, використана тепловим насосом, кВт·год;

$W_{\text{ТН}}$  — загальне електроспоживання теплового насоса, кВт·год.

Оскільки система розглядається без акумуляторної батареї, частка безпосереднього використання сонячної електроенергії тепловим насосом обмежується збігом графіків генерації та споживання. Для розрахункового оцінювання приймається, що протягом опалювального періоду тепловий насос

може безпосередньо використати близько 900 кВт·год електроенергії, виробленої СЕС. Тоді:

$$K_{\text{покp}} = \frac{900}{2400} \cdot 100\% = 37,5\% \quad (3.18)$$

Отже, у прийнятому розрахунковому режимі СЕС може покрити приблизно 37,5 % сезонного електроспоживання теплового насоса. Решта електроенергії повинна надходити з електричної мережі.

Для оцінювання використання власної генерації також визначається коефіцієнт власного споживання електроенергії СЕС:

$$K_{\text{вл.сп}} = \frac{W_{\text{СЕС.вл}}}{W_{\text{СЕС.річ}}} \cdot 100\% \quad (3.19)$$

де  $K_{\text{вл.сп}}$  — коефіцієнт власного споживання електроенергії СЕС, %;

$W_{\text{СЕС.вл}}$  — електроенергія СЕС, спожита безпосередньо в будинку, кВт·год;

$W_{\text{СЕС.річ}}$  — загальний річний виробіток СЕС, кВт·год.\

Якщо прийняти, що з річного виробітку 4000 кВт·год безпосередньо в будинку використовується 2200 кВт·год, то:

$$K_{\text{вл.сп}} = \frac{2200}{4000} \cdot 100\% = 55\% \quad (3.20)$$

Отримані результати показують, що СЕС потужністю 4 кВт може суттєво зменшити споживання електроенергії з мережі, однак не забезпечує повного живлення теплового насоса в опалювальний період. Основною причиною є сезонна невідповідність між виробітком СЕС і тепловим навантаженням

будинку. Підвищити частку використання сонячної електроенергії можна за рахунок зміщення роботи теплового насоса на денні години, використання буферної ємності або додавання акумуляторної батареї.

### 3.4 Енергетичний баланс системи та оцінювання похибок вимірювання

Енергетичний баланс системи “тепловий насос — СЕС” формується на основі даних про виробіток сонячної електростанції, електроспоживання теплового насоса та обмін електроенергією з мережею. Для прийнятої мережевої схеми без акумуляторної батареї баланс можна подати у вигляді:

$$W_{\text{СЕС}} + W_{\text{мер}} + W_{\text{ТН}} + W_{\text{інш}} + W_{\text{надл}} \quad (3.21)$$

де  $W_{\text{СЕС}}$  — електроенергія, вироблена сонячною електростанцією, кВт·год;

$W_{\text{мер}}$  — електроенергія, отримана з мережі, кВт·год;

$W_{\text{ТН}}$  — електроенергія, спожита тепловим насосом, кВт·год;

$W_{\text{інш}}$  — електроенергія, спожита іншими навантаженнями будинку, кВт·год;

$W_{\text{надл}}$  — надлишкова електроенергія, передана в мережу або не використана безпосередньо, кВт·год.

Для прийнятих у попередніх підрозділах значень річний виробіток СЕС становить 4000 кВт·год, сезонне електроспоживання теплового насоса — 2400 кВт·год, а частина електроенергії СЕС, використана тепловим насосом, — 900 кВт·год. Тоді електроенергія, яку тепловий насос повинен отримати з мережі, становить:

$$W_{\text{мер.ТН}} = W_{\text{ТН}} - W_{\text{СЕС} \rightarrow \text{ТН}} \quad (3.22)$$

$$W_{\text{мер.ТН}} = 2400 - 900 = 1500 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.23)$$

Отже, за прийнятого режиму СЕС зменшує сезонне споживання електроенергії тепловим насосом з мережі на 900 кВт·год.

Достовірність розрахованих показників залежить від похибок вимірювання теплової енергії, електроенергії, температури та витрати теплоносія. Загальний підхід до оцінювання результатів вимірювання передбачає врахування невизначеності вимірюваних величин [13]. Для спрощеної оцінки відносну похибку визначення COP можна подати так:

$$\delta_{\text{COP}} = \sqrt{\delta_G^2 + \delta_P^2} \quad (3.24)$$

де  $\delta_{\text{COP}}$  — відносна похибка визначення COP, %;

$\delta_Q$  — відносна похибка визначення теплової потужності, %;

$\delta_P$  — відносна похибка вимірювання електричної потужності, %.

Для оцінки похибки приймається, що відносна похибка вимірювання електричної потужності становить  $\delta_P = 1\%$ , що відповідає прийнятому класу точності електролічильника не нижче 1. Відносна похибка визначення теплової потужності приймається  $\delta_Q = 3\%$ , оскільки теплова потужність визначається за сукупністю вимірювань витрати теплоносія, температури подачі, температури звороту та обчислення теплової енергії теплотічильником. Прийняте значення  $\delta_Q$  використовується як орієнтовна сумарна похибка теплового вимірювального каналу для розрахункової оцінки.

Тоді відносна похибка визначення COP становить:

$$\delta_{COP} = \sqrt{3^2 + 1^2} = 3,16\% \quad (3.25)$$

Таким чином, при розрахованому значенні  $COP = 3,33$  орієнтовна абсолютна похибка становить:

$$\Delta COP = 3,33 \cdot \frac{3,16}{100} = 0,105 \quad (3.26)$$

Отже, результат можна подати як  $COP = 3,33 \pm 0,11$ . Це показує, що для оцінювання ефективності теплового насоса необхідно враховувати не лише саме розраховане значення COP, а й точність вимірювальних каналів ІВС.

### 3.5 Економічна оцінка, аналіз результатів і рекомендації

Економічна оцінка в даній роботі виконується для інформаційно-вимірювальної системи, призначеної для моніторингу роботи теплового насоса та СЕС. До вартості ІВС не включаються тепловий насос, фотоелектричні модулі, інвертор СЕС та силове обладнання енергетичної частини системи. До складу ІВС входять засоби вимірювання, контролер збору даних, модулі введення, шафа керування, кабельна продукція, монтажні матеріали та роботи з налаштування.

Для розрахункової оцінки приймається така комплектація ІВС: контролер WAGO PFC200 750-8212, аналоговий модуль WAGO 750-455, кінцевий модуль WAGO 750-600, теплотічильник Kamstrup MULTICAL 403, два електролічильники Eastron SDM230-Modbus, датчик сонячної радіації Apogee

SP-110, датчик зовнішньої температури WIKA TF41, блок живлення, щитове обладнання та кабельна продукція. Орієнтовні ціни основних елементів прийнято за відкритими даними постачальників обладнання [28–34].

З урахуванням цін на основні елементи системи, курсу валют, вартості допоміжних матеріалів, монтажу та первинного налаштування орієнтовна вартість інформаційно-вимірювальної системи приймається:

$$C_{IBC} = 150000 \text{ грн} \quad (3.27)$$

Річний економічний ефект від використання сонячної електроенергії для живлення теплового насоса визначається за формулою:

$$E_{\text{річ}} = W_{\text{СЕС} \rightarrow \text{ТН}} \cdot C_{\text{ел}} \quad (3.28)$$

де  $E_{\text{річ}}$  — річний економічний ефект, грн;

$W_{\text{СЕС} \rightarrow \text{ТН}}$  — електроенергія СЕС, використана тепловим насосом, кВт·год;

$C_{\text{ел}}$  — тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

У попередньому підрозділі прийнято, що за опалювальний період тепловий насос безпосередньо використовує 900 кВт·год електроенергії, виробленої СЕС. Тариф на електроенергію для побутових споживачів приймається  $C_{\text{ел}} = 4,32$  грн/кВт·год [35]. Тоді:

$$E_{\text{річ}} = 900 \cdot 4,32 = 3888 \text{ грн} \quad (3.29)$$

Строк окупності інформаційно-вимірювальної системи визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{ІВС}}}{E_{\text{річ}}} = 38,6 \text{ років} \quad (3.30)$$

де  $T_{\text{ок}}$  — простий строк окупності, років;

$C_{\text{ІВС}}$  — орієнтовна вартість інформаційно-вимірювальної системи, грн;

$E_{\text{річ}}$  — річний економічний ефект, грн/рік.

Підставивши прийняті значення, отримаємо:

$$T_{\text{ок}} = \frac{150000}{3888} = 38,6 \text{ років} \quad (3.31)$$

Отриманий строк окупності є значним. Це пояснюється тим, що інформаційно-вимірювальна система не є джерелом генерації енергії, а виконує функції вимірювання, збору, архівування та аналізу даних. Тому її доцільність не можна оцінювати лише через пряму економію електроенергії. Основна цінність ІВС полягає у забезпеченні достовірного контролю роботи теплового насоса, визначенні COP і SCOP, оцінюванні частки використання сонячної генерації та виявленні неефективних режимів експлуатації.

За результатами розрахунків встановлено, що теплова потужність теплового насоса в прийнятому режимі становить 6 кВт, добова кількість виробленої теплової енергії за 8 год роботи — 48 кВт·год, добове електроспоживання — 14,4 кВт·год, а коефіцієнт перетворення COP — 3,33. Для сезонного режиму прийнято  $SCOP=3,0$ ,  $SCOP = 3,0$ ,  $SCOP=3,0$ . Річний виробіток СЕС потужністю 4 кВт становить близько 4000 кВт·год, однак через сезонну нерівномірність генерації не вся ця енергія може бути використана тепловим насосом. У

прийнятому прикладі частка покриття електроспоживання теплового насоса за рахунок СЕС становить 37,5 %.

Основним обмеженням системи є невідповідність між періодами найбільшого виробітку СЕС і найбільшого теплового навантаження будинку. У зимовий період потреба в роботі теплового насоса зростає, тоді як генерація СЕС зменшується. Тому для підвищення ефективності використання сонячної електроенергії доцільно зміщувати роботу теплового насоса на денні години, використовувати буферну ємність для накопичення теплоти та розглядати можливість подальшого встановлення акумуляторної батареї.

Для практичного використання системи рекомендується забезпечити окремий облік електроспоживання теплового насоса, окремий контроль виробітку СЕС, вимірювання фактичної теплової енергії теплолічильником, синхронне архівування даних та аналіз показників COP і SCOP за добовими, місячними і сезонними інтервалами.

Таким чином, застосування промислової інформаційно-вимірювальної системи для приватного житлового будинку має тривалий строк прямої окупності. Водночас така система є технічно доцільною як засіб достовірного моніторингу, метрологічного оцінювання та оптимізації роботи комбінованої системи “тепловий насос — СЕС”.

### **3.6 Висновок до розділу 3**

У третьому розділі виконано розрахунково-аналітичне та метрологічне оцінювання роботи системи теплового насоса та СЕС на основі прийнятих вихідних даних. Для розрахункового режиму тепла потужність теплового насоса становить 6 кВт, добова кількість виробленої теплової енергії за 8 годин роботи — 48 кВт·год, добове електроспоживання — 14,4 кВт·год, коефіцієнт перетворення COP — 3,33, а сезонний коефіцієнт SCOP — 3,0. Також визначено орієнтовний річний виробіток СЕС потужністю 4 кВт, який становить близько

4000 кВт·год, та встановлено, що в прийнятому режимі СЕС може покрити приблизно 37,5 % сезонного електроспоживання теплового насоса .

Побудований енергетичний баланс показав, що за сезонного електроспоживання теплового насоса 2400 кВт·год частина електроенергії, яка має надходити з мережі, становить 1500 кВт·год. Оцінювання похибок вимірювання показало, що при прийнятих значеннях похибки теплового каналу 3 % та електричного каналу 1 % відносна похибка визначення COP становить 3,16 %, а результат можна подати як  $COP = 3,33 \pm 0,11$ . Це підтверджує необхідність урахування метрологічних характеристик засобів вимірювання під час оцінювання ефективності роботи теплового насоса.

Економічна оцінка показала, що застосування промислової інформаційно-вимірювальної системи для приватного житлового будинку має тривалий строк прямої окупності, оскільки сама ІВС не виробляє енергію, а виконує функції вимірювання, збору, архівування та аналізу даних. Водночас її використання є технічно доцільним, оскільки система забезпечує достовірне визначення COP і SCOP, контроль частки використання сонячної генерації, виявлення неефективних режимів роботи та формування даних для подальшої оптимізації комбінованої системи теплового насоса та СЕС.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено структуру інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу та оцінювання ефективності роботи теплового насоса в поєднанні з даховою сонячною електростанцією. Об'єктом дослідження є комбінована енергетична система приватного житлового будинку, що включає тепловий насос типу “повітря–вода”, СЕС, електричну мережу, водяний контур із буферною ємністю та засоби вимірювання основних параметрів.

У роботі проаналізовано особливості спільної роботи теплового насоса та СЕС. Встановлено, що ефективність такої системи залежить від фактичних умов експлуатації, температурного режиму, сезонності сонячної генерації, графіків вироблення і споживання електроенергії та точності вимірювання. Обґрунтовано необхідність застосування ІВС для визначення теплової енергії, електроспоживання, COP, SCOP, виробітку СЕС і частки покриття споживання теплового насоса сонячною генерацією.

Для досліджуваного об'єкта прийнято тепловий насос орієнтовною тепловою потужністю 6 кВт, дахову СЕС потужністю близько 4 кВт, однофазну мережу 220 В та водяний контур із буферною ємністю. Визначено основні вимірювальні канали: температуру подачі та звороту теплоносія, витрату теплоносія, електроспоживання теплового насоса, виробіток СЕС, обмін електроенергією з мережею, температуру зовнішнього повітря та сонячну радіацію. Для реалізації ІВС прийнято теплотічильник Kamstrup MULTICAL 403, електролічильники Easton SDM230-Modbus, датчики температури WIKA, датчик сонячної радіації Apogee SP-110 та контролер WAGO PFC200.

У розрахунковій частині визначено, що за прийнятого режиму тепла потужність теплового насоса становить 6 кВт, добова кількість виробленої теплової енергії за 8 год роботи — 48 кВт·год, добове електроспоживання — 14,4 кВт·год, COP — 3,33, а сезонний показник SCOP — 3,0. Орієнтовний річний виробіток СЕС потужністю 4 кВт становить близько 4000 кВт·год. За прийнятих

умов СЕС може безпосередньо покрити близько 37,5 % сезонного електроспоживання теплового насоса, що зменшує відбір електроенергії з мережі на 900 кВт·год.

Енергетичний баланс показав, що за сезонного електроспоживання теплового насоса 2400 кВт·год з мережі необхідно отримати близько 1500 кВт·год. Основним обмеженням системи є сезонна невідповідність між найбільшим виробітком СЕС і найбільшою потребою будинку в тепловій енергії. Тому повне живлення теплового насоса від СЕС без акумуляторної батареї або узгодження графіків генерації та споживання є малоймовірним.

Оцінювання похибок показало, що при відносній похибці теплового каналу 3 % та електричного каналу 1 % відносна похибка визначення COP становить 3,16 %. Для розрахованого значення  $COP = 3,33$  результат можна подати як  $COP = 3,33 \pm 0,11$ . Це підтверджує необхідність урахування метрологічних характеристик засобів вимірювання під час оцінювання ефективності системи.

Економічна оцінка показала, що орієнтовна вартість промислової ІВС становить близько 150000 грн, а річний економічний ефект від використання 900 кВт·год електроенергії СЕС для живлення теплового насоса — 3888 грн. Простий строк окупності становить близько 38,6 року, тому для одного приватного будинку така ІВС має тривалий строк прямої окупності. Водночас її застосування є технічно доцільним для достовірного моніторингу, метрологічного оцінювання, контролю COP/SCOP та оптимізації роботи комбінованої системи теплового насоса та СЕС.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEA. Renewable heat. Renewables 2025. International Energy Agency, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2025/renewable-heat> (дата звернення: 14.05.2026).
2. Про енергетичну ефективність: Закон України № 1818-IX від 21.10.2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 14.05.2026).
3. ДСТУ EN 14511-3:2023. Кондиціонери повітряні, агрегатовані охолоджувачі рідини та теплові насоси з компресором з електроприводом. Частина 3. Методи випробувань (EN 14511-3:2022, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=106360](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106360) (дата звернення: 16.05.2026).
4. ДСТУ EN 14825:2023. Кондиціонери, рідинні холодильні агрегати та теплові насоси з компресорами з електричним приводом для опалення та охолодження приміщень. Випробування та визначення характеристик в умовах часткового навантаження та розрахунок сезонних робочих характеристик (EN 14825:2022, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=106362](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106362) (дата звернення: 16.05.2026).
5. Heat Pumping Technologies. Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies. International Energy Agency Heat Pumping Technologies TCP. URL: <https://heatpumpingtechnologies.org/> (дата звернення: 16.05.2026).
6. Heat pumps: lost in standards... and found. REHVA Journal. URL: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/heat-pumps-lost-in-standards-and-found> (дата звернення: 17.05.2026).
7. Understanding Solar Photovoltaic System Performance. U.S. Department of Energy. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/understanding-solar-photo-voltaic-system-performance.pdf> (дата звернення: 17.05.2026).

8. ДСТУ EN IEC 61724-1:2022. Ефективність фотоелектричної системи. Частина 1. Моніторинг (EN IEC 61724-1:2021, IDT; IEC 61724-1:2021, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=105194](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105194) (дата звернення: 18.05.2026).
9. Walker A., Desai J., Heimiller D. Performance of Photovoltaic Systems Recorded by Open Solar Performance and Reliability Clearinghouse. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2020. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75162.pdf> (дата звернення: 18.05.2026).
10. Bee E., Prada A., Baggio P., Psimopoulos E. Air-source heat pump and photovoltaic systems for residential heating and cooling: potential of self-consumption in different European climates. *Building Simulation*. 2019. Vol. 12. P. 453–463. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12273-018-0501-5> (дата звернення: 18.05.2026).
11. Battaglia M., Haberl R., Bamberger E., Haller M. Increased self-consumption and grid flexibility of PV and heat pump systems with thermal and electrical storage. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 135. P. 358–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.527>.
12. Rana S., Jamil U., Asgari N., Hayibo K. S., Groza J., Pearce J. M. Residential Sizing of Solar Photovoltaic Systems and Heat Pumps for Net Zero Sustainable Thermal Building Energy. *Computation*. 2024. Vol. 12, No. 6. Article 126. URL: <https://www.mdpi.com/2079-3197/12/6/126> (дата звернення: 19.05.2026).
13. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. URL: [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf) (дата звернення: 19.05.2026).
14. IEC 62053-21:2020. Electricity metering equipment — Particular requirements — Part 21: Static meters for AC active energy (classes 0,5, 1 and 2). International Electrotechnical Commission, 2020. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/28660> (дата звернення: 20.05.2026).

15. EN 1434-1:2022. Thermal energy meters — Part 1: General requirements. European Committee for Standardization, 2022. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/4a401223-1f56-4448-861b-67d46d1c3d0f/en-1434-1-2022> (дата звернення: 20.05.2026).
16. European Commission. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en) (дата звернення: 22.05.2026).
17. Global Solar Atlas. Ukraine. Solar resource and photovoltaic power potential maps. URL: <https://globalsolaratlas.info/download/ukraine> (дата звернення: 22.05.2026).
18. IEC 60751:2022. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. International Electrotechnical Commission, 2022. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/61818> (дата звернення: 25.05.2026).
19. Vaillant. *aroTHERM plus 230V Single Installation and Maintenance Instructions*. URL: <https://professional.vaillant.co.uk/downloads/product-brochures/arothers-plus-230v-single-2626670.pdf> (дата звернення: 25.05.2026).
20. JA Solar. *JAM54D41 430–455/LB/1500V. Datasheet*. URL: <https://www.jasolar.com/uploadfile/fujian/2024/0328/a85bf0dfe569316.pdf> (дата звернення: 25.05.2026).
21. GoodWe. *DNS G3 Series Single Phase Inverter*. URL: <https://en.goodwe.com/dns-g3> (дата звернення: 25.06.2026).
22. Kamstrup. *MULTICAL 403*. URL: <https://www.kamstrup.com/en-en/product-centre/multical-403> (дата звернення: 25.05.2026).
23. Easton. *SDM230-Modbus User Manual*. URL: <https://xn--stromzhler-v5a.eu/media/05/ae/19/1696582672/sdm230-modbus.pdf> (дата звернення: 25.05.2026).
24. WIKA. *Threaded resistance thermometer TR10-C. Data sheet*. URL: [https://www.wika.com/media/Data-sheets/Temperature/Resistance-thermometers/ds\\_te6003\\_en\\_co.pdf](https://www.wika.com/media/Data-sheets/Temperature/Resistance-thermometers/ds_te6003_en_co.pdf) (дата звернення: 25.06.2026).
25. WIKA. *Outdoor thermometer TF41*. URL: <https://www.wika.com/en-en/tf41.WIKA> (дата звернення: 25.05.2026).

26. Apogee Instruments. *SP-110 Pyranometer Manual*. URL: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-110-manual.pdf>  
(дата звернення: 25.05.2026).
27. WAGO. *Controller PFC200; 2nd Generation; 2 x ETHERNET, RS-232/-485; 750-8212*. URL: <https://www.wago.com/global/plcs-%E2%80%93-controllers/controller-pfc200/p/750-8212> (дата звернення: 25.05.2026).
28. Demir International. WAGO 750-8212. URL: <https://www.demir-int.com/en/manufacture/wago/plc-peripheral-module/496309/wago-750-8212>  
(дата звернення: 06.06.2026).
29. DigiKey. WAGO 750-455 PLC Module. URL: <https://www.digikey.nl/en/products/detail/wago-corporation/750-455/15579200>  
(дата звернення: 06.06.2026).
30. DigiKey. WAGO 750-600 PLC Module. URL: <https://www.digikey.nl/en/products/detail/wago-corporation/750-600/15557971>  
(дата звернення: 06.06.2026).
31. Wattoo.dk. Kamstrup MULTICAL 403 heat meter. URL: <https://www.wattoo.dk/energimal-frem-1-5m3-multical-403-488350356> (дата звернення: 06.06.2026).
32. Ecowatts. Easton SDM230. URL: <https://ecowatts.be/products/solplanet-easton-sdm230> (дата звернення: 06.06.2026).
33. Apogee Instruments. SP-110 Self-Powered Pyranometer. URL: <https://www.apogeeinstruments.com/sp-110-self-powered-pyranometer/>  
(дата звернення: 06.07.2026).
34. WIKA. Outdoor thermometer TF41. URL: <https://shop.wika.com/en-en/tf41.WIKA> (дата звернення: 06.06.2026).
35. Тарифи на електроенергію для населення. ТОВ «ЕНЕРА СХІД». URL: <https://lg.enera.ua/el/tariff> (дата звернення: 06.06.2026).

