

*О. М. ЄВСЕЄНКО, Н. О. КАНУННІКОВА, К. О. МІНАКОВА, Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КІРІЧЕНКО,  
М. С. ХРИПУНОВ, Р. І. САПРИКІН*

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОМБІНОВАНОЮ ТЕРМОФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ

Протягом останніх років розробка та впровадження енергозберігаючих рішень залишається актуальним і невід'ємним завданням для реалізації шляху зменшення викидів вуглецю та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Використання комбінованих фотоелектричних/теплових систем обмежується їх високою ціною, пов'язаною головним чином зі складністю їх систем керування, навіть беручи до уваги наявність державних програм фінансової підтримки використання альтернативної енергії. Новизна пропонованої роботи полягає в розробці математичної моделі та аналітичному дослідженні системи керування комбінованою фотоелектричною/тепловою системою для дослідження роботи керуючих і логічних елементів та їх реакції на перехідні та аварійні режими під час роботи таких систем. Метою роботи є проведення експлуатаційного аналізу, аналітичних та оптимізаційних досліджень системи керування комбінованою фотоелектричною/тепловою системою для забезпечення надійної роботи в перехідних та аварійних режимах та значного спрощення проектування такої системи. В роботі застосовані методи математичного моделювання та використання спеціалізованого програмного забезпечення. За результатами роботи було розроблено математичну модель системи керування комбінованою фотоелектричною/тепловою системою, яка працює зі змінним набором керуючих та логічних елементів. Запропоновано структурне рішення системи керування для подальшого впровадження та натурних випробувань. Розроблено критерії реагування системи керування на перехідні та аварійні режими роботи комбінованої фотоелектричної/теплової системи. Практична цінність. Встановлено допустимі та критичні значення ряду параметрів, що характеризують роботу комбінованої фотоелектричної/теплової системи в нормальному режимі та визначено відхилення від яких свідчать про наявність аварійної ситуації. Запропоновані алгоритми системи керування дозволять підвищити надійність комбінованої фотоелектричної/теплової системи та знизити ризик виникнення аварійних ситуацій під час натурних випробувань та подальшої експлуатації.

**Ключові слова:** датчик, диференціальне керування, система керування, мікропроцесор, алгоритм, PV/T системи, сонячна енергетика.

*О. М. YEVSEIENKO, N. O. KANUNNIKOVA, K. O. MINAKOVA, R. V. ZAITSEV, M. V. KIRICHENKO,  
M. S. KHRYPUNOV, R. I. SAPRYKIN*

## THE CONTROL UNIT OF THE COMBINED PHOTOVOLTAIC/THERMAL SYSTEM

During the last years the design and implementation of energy-saving solutions remains a relevant and integral task for implementation the route of decreasing carbon emissions and reduce the negative impact on the environment. Using combined photovoltaic/thermal systems is limited by their high price connected mainly with the complexity of their control systems, even taking into account availability of government programs for financial support for the use of alternative energy. The novelty of the proposed work consists in the development of a mathematical model and the analytical study of the control system of combined photovoltaic/thermal system for research the operation of control and logic elements and their response to transient and emergency modes during such systems operation. Aim of the work - operational analysis, analytical and optimization studies of the control system of the combined photovoltaic/thermal system to ensure reliable operation in transient and emergency modes and significantly simplify the design of such a system. In this article was implemented mathematical modeling methods and using specialized software. As a result of the work the mathematical model of the control system of combined photovoltaic/thermal system which operates with variable set of control and logic elements was developed. A structural solution of the control system is proposed for further implementation and field testing. The response criteria of the control system to transient and emergency operation modes of the combined photovoltaic/thermal system have been developed. Practical value. It was established the permissible and critical values of a number of parameters characterizing the operation of combined photovoltaic/thermal system in normal mode and deviations from which indicate the presence of an emergency situation are determined. The proposed algorithms of the control system will make it possible to increase the reliability of combined photovoltaic/thermal system and reduce the risk of emergency situations during field tests and further operation.

**Keywords:** sensor, differential control, control system, microprocessor, algorithm, PV/T systems, solar energy.

**Проблематика.** Протягом останніх десятиліть проектування та впровадження енергозберігаючих рішень залишається актуальною та невід'ємною задачею для урядів країн, промислових підприємств та будівельної галузі, громадських екологічних організацій.

Реалізація енергозберігаючих рішень важлива для забезпечення розвитку економіки країн, диверсифікації джерел енергопостачання та зменшення залежності від імпорту енергії. Для цього уряди країн приймають нормативні акти та постанови, надають фінансову підтримку підприємствам з метою зниження витрат на енергію, підвищення ефективності виробництва та покращення конкурентоспроможності. Проектування та використання енергозберігаючих технологій і матеріалів є важливим завданням для будівельної галузі з метою створення енергоефективних будівель і зниження споживання енергії в будинках та спорудах.

Не менш важливою ця проблема є і для громадських організацій та активістів. Результати їхньої роботи можуть відігравати важливу роль у підвищенні свідомості населення, сприянні змінам у суспільстві, реалізації енергоефективних проєктів, боротьбі з наслідками техногенних катастроф.

Однією з основних концепцій енергозбереження є використання нескінченних джерел енергії, таких як сонце, вітер, біомаса та геотермальна енергія. Використання сонячної енергії для мешканців приватного сектора або багатоповерхових будинків є більш доступним, ніж вітру, біомаси та геотермальної енергії, для застосування яких потрібні значні фінансові вливання.

Зниження вартості сонячних панелей, наявність урядових програм щодо фінансової підтримки застосування альтернативної енергетики, можливість економії коштів робить використання сонячної енергії

економічно вигідним. Крім того, це дає значний екологічний ефект: допомагає зменшити виділення вуглецю та зменшити негативний вплив на довкілля.

**Мета статті.** Проведення експлуатаційного аналізу, аналітичних та оптимізаційних досліджень системи керування комбінованою фотоелектричною/тепловою системою для забезпечення надійної роботи в перехідних та аварійних режимах та значного спрощення проектування такої системи.

**Аналіз літературних джерел.** Управління системою опалення і гарячого водопостачання з використанням відновлюваних джерел енергії наведено у [1]. У цій роботі розроблено автоматизовану систему з використанням контролера ПЛК 160, SCADA-системи та HMI (human machine interface). Описано та впроваджено алгоритм управління системою опалення та гарячого водопостачання. Досліджено можливість спільного використання теплового насоса, геліосистеми та централізованого джерела теплової енергії для опалення та гарячого водопостачання. Указується, що на опаленні та гарячому водопостачанні було зекономлено до 180 тис. грн за сезон 2016–2017 рр. завдяки зменшенню споживання тепла від зовнішнього джерела теплової енергії. Це вдалося досягти за рахунок побудови системи автоматизованого керування, диспетчеризації, встановлення лічильників води, електричної та теплової енергії, датчиків температури в приміщенні. Проте, цю систему було впроваджено комплексно і в статті не наводиться, яку кількість ресурсів було заощаджено саме за рахунок використання геліосистеми.

У [2] описані результати експериментальних випробувань прототипу пасивного повітряного сонячного колектору, а саме вплив інтенсивності випромінювання та відхилення сонячного колектору від вертикалі на підвищення температури повітря, що протікає через колектор. Установлено, що вертикальне розташування колектору не забезпечує максимальної ефективності пристрою.

Можливість використання різних конструкцій сонячних накопичувальних колекторів обговорюється в роботі [3]. Цей огляд підтвердив, що ефективність сонячної системи опалення суттєво залежить від змін у конструкції та формі, а також від кліматичних та експлуатаційних факторів. Окремо виділяється використання нанотехнологій, сонячних батарей та дзеркал для підвищення ефективності різноманітних сонячних колекторів.

Ще один варіант системи керування, який реалізує автоматизацію сонячної теплоелектростанції, запропоновано в [4]. Описано алгоритм, де коефіцієнт посилення оптимізується за допомогою алгоритму *grow search*. Виходячи з параметрів, таких як температура, швидкість двигуна і тиск гелієвого балона у двигуні Стірлінга, сонячний концентратор розташовується таким чином, щоб піддатися максимальному впливу сонячної енергії шляхом контролю кута повороту висоти та кута повороту азимута.

Метою роботи [5] є використання техніки керування з прогнозуванням. За допомогою застосування принципу збереження енергії отримано розподілену модель колекторного поля. Крім того, використовуються моделі налаштування параметрів, які були досягнуті шляхом застосування методу найменших квадратів та моделі поліноміальних функцій, що є функціями температури.

Аналіз теоретичних засад побудови сонячних колекторів для реалізації моніторингу та контролю температури резервуара в заданому діапазоні для встановлення кращої продуктивності системи проводиться в роботі [6]. Було використано два мікроконтролера Arduino: один для моніторингу температури, а інший – для керування швидкістю водяного насоса. Керування насосом здійснюється за вимірними значеннями датчиків температури. Температуру води в резервуарі підтримують у заданому діапазоні від +30 °C до +40 °C. Зв'язок між комп'ютером і системою здійснюється шляхом послідовної передачі даних. Як закони керування використовуються диференціальне та пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) керування. Робиться висновок, що використання ПІД-регуляторів є більш цікавим через можливість розміщення його в будь-якій сонячній системі, однак це потребує додаткових витрат на апаратні засоби.

У [7] наведено результати досліджень покращення продуктивності параболічного жолобкового сонячного колектору за рахунок використання форми колектору з кутом нахилу 120° та площею отвору 2.2 м<sup>2</sup>, мідної поглинаючої трубки без скляної оболонки. Запропонована система відстеження сонця містить фоторезистивні датчики, які використовуються для визначення положення сонця, та електричні приводи для корекції положення жолоба. Система моніторингу була розроблена з використанням панелі оператора для візуалізації робочих параметрів, термопар, які вимірюють температуру в трубці абсорбера на вході та виході колектору, і датчика вимірювання потоку рідини.

За допомогою використання програмного забезпечення TRNSYS було досліджено ефективність збору тепла та виконано схемотехнічне проектування системи опалення [8]. Обчислено оптимальний кут нахилу сонячного колектору до сонця в районі Шеньян у Китаї. Велика увага приділяється ефективності роботи колектору в похмурі, дощові та снігові дні. Для обігріву будинків у такі дні пропонується застосовувати комбінований підхід: використовувати альтернативні джерела енергії та обігрів за допомогою електропостачання.

У [9] пропонується концепція гібридної фотоелектрично-теплової колекторної системи, що генерує тепло та електроенергію в одному колекторі. Таким чином збільшується кількість корисної енергії, отриманої від сонячного випромінювання. Середня потужність виробництва електричної енергії від аморфної сонячної панелі з потужністю 40 Вт становить близько 15 Вт, що достатньо для живлення обертового вентилятора для сушки.

Прогнозування енергоефективності сонячного повітряного колектору за методом штучної нейромережі наведено в [10]. У вхідному шарі мережі застосовуються шість вхідних параметрів, таких як дата, час, сонячна інтенсивність, температура навколишнього середовища, середня температура пластини. Енергоефективність використовується як вихідний параметр у вихідному шарі мережі.

**Опис об'єкта управління.** Енергія сонця використовується сонячними панелями для накопичення її в акумуляторі, перетворення за допомогою інвертора в змінний струм, передачу в мережу, або в роботі сонячного колектору для підігріву води.

Сонячні колектори поглинають промені сонця, перетворюючи їх на тепло, яке подається до теплоносія. Далі за допомогою теплоносія воно передається до теплоакумулятора, який зберігає високу температури води протягом тривалого часу.

Кількість сонячної енергії, що потрапляє на одиницю площі поверхні планети, залежить від її географічного розташування (довгота, широта, висота поверхні над рівнем моря), пори року, часу доби, рівня хмарності. Територія України перебуває в помірному кліматичному поясі в області помірно континентального клімату та має потенціал для отримання середньої сонячної енергії близько 1000 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік.

На рівень отримання кількості сонячної енергії сонячним колектором також впливає кут нахилу його поверхні до сонця [11]. Це значення так само залежить від географічного розташування, пори року та метеорологічних умов. Для його визначення використовуються сонячні таблиці, проводяться спеціальні розрахунки в залежності від умов місцевості.

Енергія сонця передається через скло колектору і поглинається компонентом, що називається поглинальною пластинкою. Далі поглинена енергія перетворюється на тепло і передається до рідини, що проходить через кілька трубок, які кріпляться до цієї пластини (рис. 1).

Трубки так само можуть поглинати енергію сонця і мати покриття з теплопоглинаючого матеріалу для уловлювання якомога більше сонячної енергії. Цей

матеріал може мати темний колір або спеціальне покриття. Оскільки трубка поглинає сонячну енергію, вона нагріває рідину, що протікає через неї. Також поглинальна трубка може бути оточена скляною трубкою для створення додаткового шару, щоб мінімізувати теплові втрати в атмосферу і підвищити ефективність використання енергії. Нагріта рідина за допомогою насоса потрапляє до резервуару з водою для зберігання.

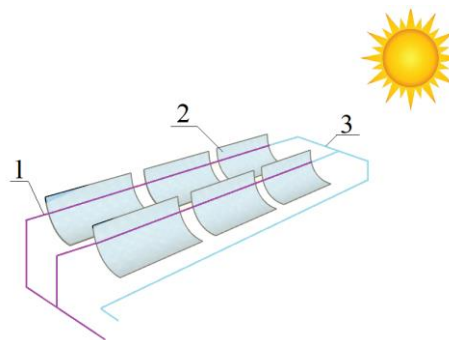


Рисунок 1 – Принцип роботи сонячного колектору: 1 – поглинальна трубка; 2 – рефлектор; 3 – трубопровід нагрітої рідини

Існують дві схеми побудови систем теплопостачання на основі сонячного колектору: пасивна та активна (рис. 2). У пасивній схемі (рис. 2 а) для циркуляції води використовується природна конвекція: тепла вода піднімається вгору через меншу щільність, далі вона протікає по трубці і змішується з холодною водою в баку. Основними недоліками цієї схеми є суттєві тепловтрати в трубах і колекторі та невелика швидкість циркуляції води.

В активній системі (рис. 2 б) для циркуляції води використовується насос. Однак, виникає питання алгоритму роботи цього насоса. Безперервна робота насоса з однаковою швидкістю не є оптимальним варіантом через мінливість погодних умов. Також цей насос можна підключити до сонячної панелі, забезпечивши його роботу при наявності сонця, або використовувати датчик інтенсивності сонячної радіації, за показами якого корегувати потужність роботи насоса.

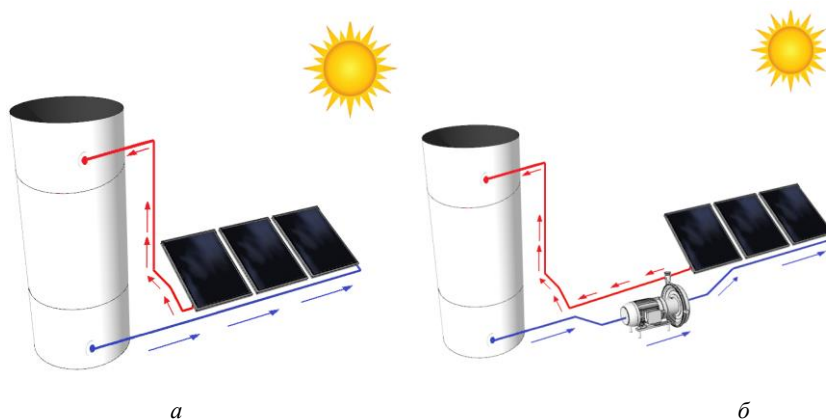


Рисунок 2 – Принцип роботи сонячного колектору: а – пасивна схема; б – активна схема

Сонячна система нагрівання води складається із наступних компонентів:

1. Сонячний колектор. Пристрій, призначений для збору і використання сонячної енергії для отримання тепла або електричної енергії.

2. Насосна станція. У системах сонячного колектору, що використовуються для нагрівання води або іншого теплоносія, ця система складається з циркуляційного насоса і клапана.

3. Розширювальний бак. Розширювальний бак у сонячній тепловій системі відіграє важливу роль у керуванні теплоносієм. Його мета полягає в компенсації змін обсягу теплоносія, викликаних його нагріванням та охолодженням у процесі роботи. Без розширювального бака можливе підвищення тиску в системі при нагріванні теплоносія, що може призвести до пошкоджень або витоків. Розширювальний бак надає додатковий простір для розширення та стиснення теплоносія, забезпечуючи постійний тиск у системі та захист від потенційних проблем.

4. Контролер управління. Контролер керує роботою циркуляційного насоса і клапана, який за програмою забезпечує перекачування теплоносія через колектор для нагрівання. Також у функціях контролера є збір, обробка даних з датчиків температури, інтенсивності сонячного випромінювання, рівня води.

5. Накопичувальний бак (резервуар для збереження тепла). Цей бак може мати обсяг довільної ємності, розпочинаючи від 300 л. У середині баку зазвичай розташовуються два змійовики: один у нижній частині, інший – у верхній. Теплоносій від сонячного колектору приходить у нижній змійовик, верхній змійовик слугує для того, щоб з бака можна було зняти надлишкове тепло. Як відомо, гаряча вода має тенденцію підніматися вгору через її нижчу щільність порівняно з холодною. Тому, якщо декілька днів поспіль похмура погода, верхня частина додатково підігривається за допомогою електронагріву.

6. Резервний нагрівач. За допомогою бойлера можливий додатковий підігрів води, якщо температура води в бойлері недостатня. Підігрів води в бойлері здійснюється за допомогою електричного нагрівача (ТЕН).

7. Сервопривід для повороту або нахилу сонячної панелі. Використовується для позиціонування системи відносно сонця. Дозволяє виставити оптимальний кут нахилу поверхні колектору та максимізувати збір сонячної енергії.

**Обладнання.** За результатами аналізу в систему входить наступне обладнання (рис. 3):

- Сонячний колектор із пластинчастим теплообмінником.
- Зворотній клапан.
- Циркуляційний насос.
- Електронагрівач (ТЕН).
- Мікропроцесорний контролер.

- Фільтр для води.
- Лічильник, який дає інформацію про зібрану кількість сонячної енергії (опціонально).

• Сервопривід.

Параметри:

1. Температура колектору, зовнішнього повітря, води в бойлері, прямої води, зворотної води.
2. Рівень освітленості (сонячна радіація).
3. Рівень води в бойлері.
4. Засміченість фільтра.

Для підключення обладнання та датчиків синтезовані наступні сигнали автоматизації (табл. 1).

Таблиця 1 – Перелік вхідних-вихідних сигналів керування сонячним колектором

№	Назва	Тип сигналу
1	Увімкнути циркуляційний насос	DO
2	Увімкнути теплонагрівач електричний	DO
3	Увімкнути запорно-регулюючий клапан	DO
4	Аварія (лампа)	DO
5	Система працює (лампа)	DO
6	Увімкнути сервопривід	AO
7	Фільтр засмічений	DI
8	Датчик рівня води (нижній)	DI
9	Датчик рівня води (середній)	DI
10	Датчик рівня води (верхній)	DI
11	Кнопка аварійного зупину (грибок)	DI
12	Датчик виміру інтенсивності сонячної радіації (піранометр)	AI
13	Датчик температури води в бойлері	AI
14	Датчик температури прямої води	AI
15	Датчик температури зворотної води	AI
16	Датчик температури зовнішнього повітря	AI
17	Датчик температури колектору	AI
18	Положення колектору	AI

Структурну схему наведено на рис. 4.

На структурній схемі до контролера підключено датчики: засміченості фільтра, рівня води в бойлері, температури прямої та зворотної води, колектору, води в бойлері; до виходів: ТЕН, клапан, насос, сервопривід. До модуля розширення підключаються датчик температури зовнішнього повітря, потенціометр, піранометр. Таким чином, вільними для підключення залишаються 2 дискретних та 1 аналоговий виходи, 3 дискретних входи на головному контролері та 1 аналоговий вхід і 4 аналогових виходи на модулі розширення.

Модуль розширення передає інформацію до головного контролера за допомогою SPI-інтерфейса. Також залишаються вільними два інтерфейси RS-485, один з яких може використовуватися для передачі інформації на верхній рівень до SCADA-системи, або до іншого контролера.

За проведеним оглядом було обрано датчики та обладнання. Результати наведені в табл. 2 і 3.

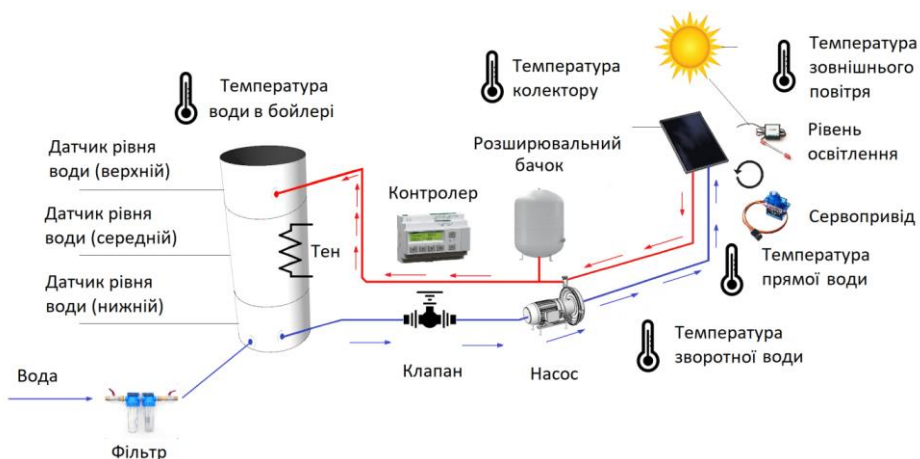


Рисунок 3 – Структурна схема компонентів і параметрів

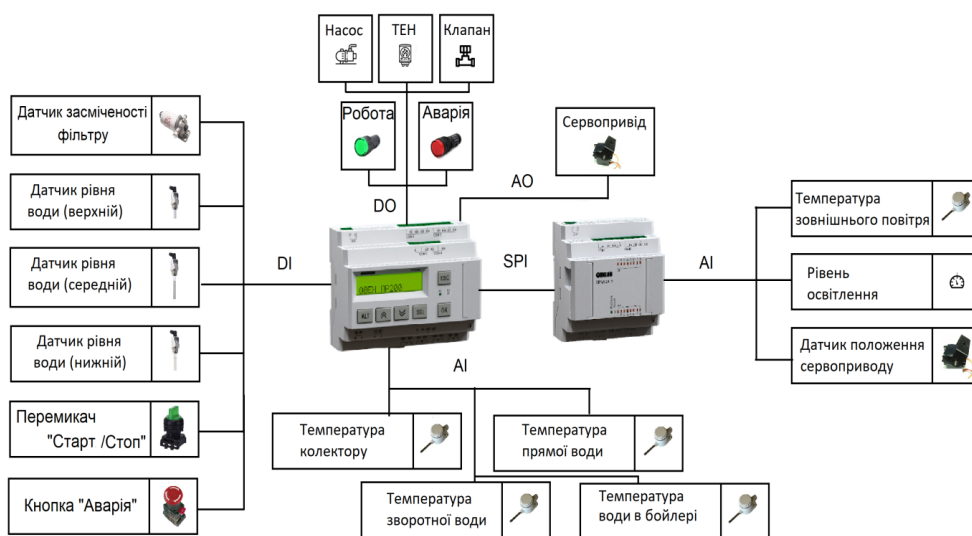


Рисунок 4 – Структурна схема підключення пристроїв

Таблиця 2 – Перелік обладнання за сигналами

№	Назва	Обладнання	Кількість
1	Циркуляційний насос	WILO VARIOS PICO-STG 15/1-7-130	1
2	Теплонагрівач електричний	Bosch Tronic 3000T ES2.5	1
3	Запорно-регулюючий клапан	Belimo H611R	1
4	Сервопривід	TowerPro SG90	1
5	Фільтр	Aquasana	1
6	Датчик рівня води (нижній)	ПДУ-3.1	3
7	Датчик рівня води (середній)		
8	Датчик рівня води (верхній)		
9	Датчик виміру інтенсивності сонячної радіації	SMP11	1
10	Датчик температури води в бойлері	ДТС014-PT1000	1
11	Датчик температури прямої води	ДТС014-PT1000	1
12	Датчик температури зворотної води	ДТС014-PT1000	1
13	Датчик температури зовнішнього повітря	ДТС125ЛІ-Pt1000.A.2.80	1
14	Датчик температури колектору	ДТС014-PT1000	1
15	Потенціометр сервоприводу	TowerPro SG90	1
16	Контролер	PR200-220.4.2.0	1
17	Модуль розширення	PRM-220.3	1
18	Реле електромеханічне	MER2-230AC 2р	2
19	Перемикач старт-стоп	ETI ECS2S-N45-10	1
20	Аварійна кнопка	ETI ECM-T01-R	1
21	Лампа червона	ETI ECLI-240A-R,	1
22	Лампа зелена	ETI ECLI-240A-G	1

Таблиця 3 – Перелік обраних датчиків із сигналами з підключенням до контролера

Вхід	Датчик	Тип сигналу	Діапазон значень
DI1	Датчик рівня води (нижній)	Сухий контакт	0...1
DI2	Датчик рівня води (середній)	Сухий контакт	0...1
DI3	Датчик рівня води (верхній)	Сухий контакт	0...1
DI4	Фільтр засмічений	Сухий контакт	0...1
DI5	Перемикач Старт/Стоп	Сухий контакт	0...1
DI6	Аварійна зупинка	Сухий контакт	0...1
DI7	Циркуляційний насос увімкнено	Сухий контакт	0...1
DI8	ТЕН увімкнено	Сухий контакт	0...1
DO1	Циркуляційний насос	DO	0...1
DO2	Теплонагрівач електричний	DO	0...1
DO3	Запорно-регулюючий клапан	DO	0...1
DO4	Лампа Робота	DO	0...1
DO5	Лампа Аварія	DO	0...1
AI1	Температура зовнішнього повітря	Термоопір Pt1000	-50...+120°C
AI2	Температура води в бойлері	Термоопір Pt 1000	-50...+120°C
AI3	Температура прямої води	Термоопір Pt 1000	-50...+120°C
AI4	Температура зворотної води	Термоопір Pt 1000	-50...+120°C
PRM AI1	Температура колектору	Термоопір Pt 1000	-50...+120°C
PRM AI2	Потенціометр сервоприводу	0...10 В	0...100 %
PRM AI3	Інтенсивність сонячної радіації	4...20 мА	0...1600 Вт/м <sup>2</sup>
AO1	Сервопривід	0...10 В	0...100 %

**Система управління.** Основний алгоритм системи керування сонячним колектором будується навколо регулювання роботи теплового насоса за показниками температури теплоносія та значенням інтенсивності сонячної радіації. Інші датчики температури та рівня води використовуються для контролю за поточним станом системи та сигналізації про аварійні ситуації.

Загальна мета побудови автоматизованої системи керування сонячним колектором полягає в тому, щоб мінімізувати втрати тепла, оптимізувати використання сонячної енергії для забезпечення комфортного опалення чи гарячого водопостачання з найменшим часом роботи насоса.

Одна з найпоширеніших систем керування насосом у сонячному колекторі ґрунтується на принципі диференціального (рис. 5) або двопозиційного керування (рис. 6). Датчики вимірюють температуру сонячного колектору та температуру в системі опалення або гарячого водопостачання. Контролер аналізує дані з датчиків та приймає рішення про включення або вимкнення насоса за лінійним законом керування та значеннями уставок.

У простій реалізації, якщо температура в сонячному колекторі вище, ніж у системі опалення або гарячого водопостачання, контролер включає насос, щоб теплоносієм циркулював через колектор та передавав тепло в систему. Якщо температура в системі стає близькою до температури в сонячному колекторі або перевищує її, контролер вимикає насос.

Більш складні системи керування насосом у сонячному колекторі можуть враховувати додаткові параметри, такі як інтенсивність сонячної радіації, час

та кліматичні умови. За поточним часом доби та з урахуванням положення сонця відбувається поворот установки із сонячним колектором.

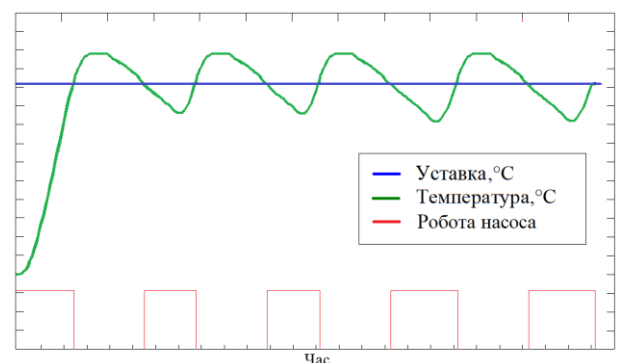


Рисунок 5 – Керування насосом за диференціальним принципом

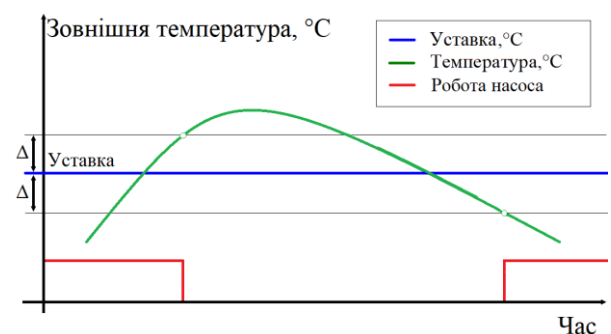


Рисунок 6 – Керування насосом за двопозиційним законом керування

На рис. 7 наведено приклад двопозиційного управління за одним параметром, написаний мовою



FBD. Програма описана в макросі для можливого повторного використання.

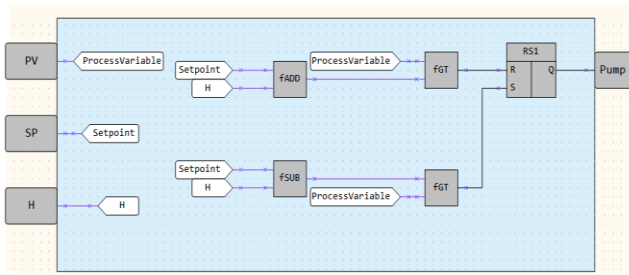


Рисунок 7 – Програма керування за двопозиційним законом:  
PV – вимірне значення, °C;  
SP – уставка, °C; H – гістерезис, °C

Якщо кількість параметрів, за якими приймається рішення про увімкнення насоса, збільшиться, то цей макрос додається в загальну програму та об'єднується з іншими за допомогою логічного AND (рис. 8).

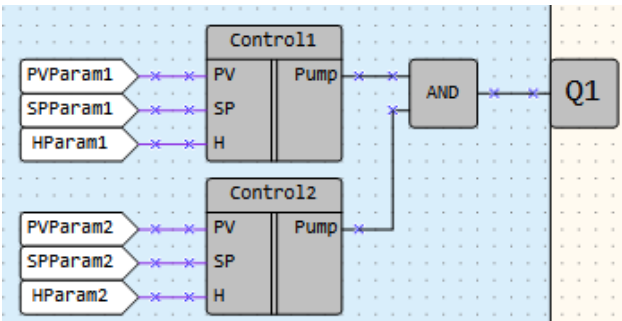


Рисунок 8 – Керування:  
PVParamX – вимірне значення з датчика номер X  
SPParamX – уставка для датчика з номером X  
HParamX – гістерезис для датчика номер X

Датчик термоопору підключається за допомогою макроса (рис. 9 і 10) та обчислюється за формулою (1), коли температура більше 0 °C, і за формулою (2), коли температура менше 0 °C:

$$t = \frac{(A^2 - 4B(1 - \frac{R_t}{R_0}))^{0.5} - A}{2B}; \quad (1)$$

де  $A = 0.0039083$ ,  $B = -5.775E-07$ ;  
 $R_0$  – 1000 Ом для Pt1000;  
 $R_t$  – вимірне значення датчиком термоопору.

$$\sum_{i=1}^4 D_i (\frac{R_t}{R_0} - 1)^i; \quad (2)$$

де  $D_1 = 255.819$ ,  $D_2 = 9.1455$ ,  $D_3 = -2.92363$ ,  
 $D_4 = 1.7909$ .

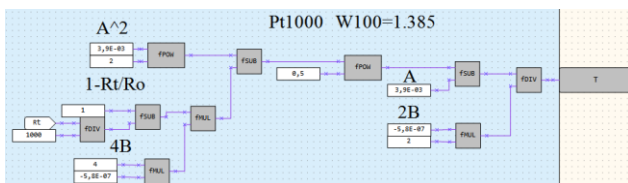


Рисунок 9 – Програма датчика при  $t \geq 0$  °C

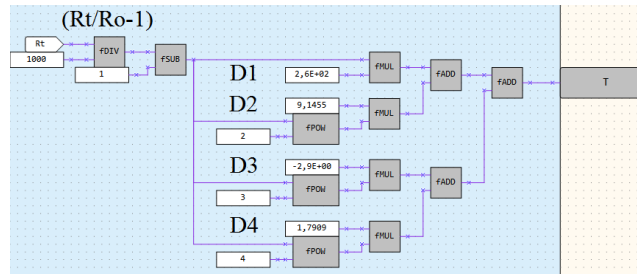


Рисунок 10 – Програма датчика при  $t < 0$  °C

Для обраного датчика виміру інтенсивності сонячної радіації використано схему підключення 4–20 мА. За технічними характеристиками для цієї схеми підключення діапазон виміру має інтервал від 0 до 1600 Вт/м<sup>2</sup>.

Для обчислення використовується формула:

$$E_{solar} = (I - 4) \cdot 100 \quad (3)$$

Макрос лінійного закону наведено на рис. 11.

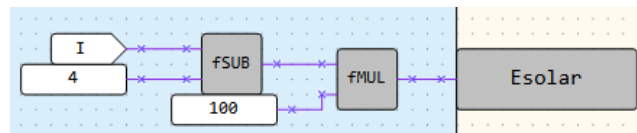


Рисунок 11 – Макрос обробки датчика інтенсивності освітлення

Також макрос має блок контролю показів виміру значень. Цей блок відповідає за отримання аналогового вхідного сигналу, перетворення його в розмірність фізичної величини, формування коду стану датчика. Код стану датчиків наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Код стану виміру значень датчиком

Код	Значення
0	Система в нормі
1	Вихід вхідної величини за межі діапазону, заданого параметрами макросу
2	Обрив датчика
3	Коротке замикання контактів датчика

Блок-схема обробки показу датчиків 4–20 мА наведена на рис. 12.

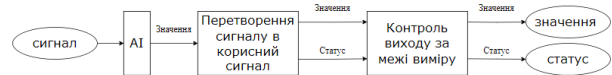


Рисунок 12 – Процес обробки значення аналогового датчика 4–20 мА

Програмне забезпечення виконує наступні функції:

1. Відображення поточних параметрів, режимів роботи та поточного стану виконавчих механізмів.
2. Уведення параметрів об'єкта керування.
3. Уведення параметрів технологічних регуляторів.
4. Індикація наявності аварійних подій.

**Аварійні ситуації.** Контроль наявності аварійних та нештатних ситуацій, їх попередження та передбачення є обов'язковим компонентом лубої

автоматизованої системи. Це досягається за допомогою апаратних і програмних засобів. До апаратних засобів належать кнопки аварійного зупини системи, елементи індикації, реле аварійного вимкнення, контролери з функцією резервування.

За допомогою програмних засобів відбувається передбачення можливого виникнення аварійної ситуації, обчислюється час напрацювання виконавчих пристроїв, визначення несправності датчиків, виконавчих механізмів.

Можливі наступні аварійні ситуації:

1. Несправність датчика виміру інтенсивності сонячної радіації: виник обрив датчика.

2. Несправність датчиків температури: коротке замикання, вихід виміряного значення за допустимий діапазон, обрив датчика.

3. Відсутність зворотного зв'язку від циркуляційного насоса, нагрівача або сервоприводу.

4. Відсутність зв'язку з модулем розширення.

5. Натиснута кнопка аварійного зупини (грибок).

Можливі наступні позаштатні ситуації:

1. Фільтр засмічений.

Особливої уваги потребує опис алгоритмів роботи системи при виникненні аварійної ситуації. Пропонується наступний алгоритм: при виникненні аварії датчиків або несправності виконавчих механізмів система переходить у режим зупини. У даному режимі виконавчі пристрої вимкнені, продовжується зчитування та відображення всіх значень із працюючих датчиків.

Увімкнення системи відбувається після усунення всіх аварійних ситуацій та запуску системи з дисплею, або перемикачем «Старт / Стоп».

Загальна структура екранів меню контролера наведена на рис. 13.

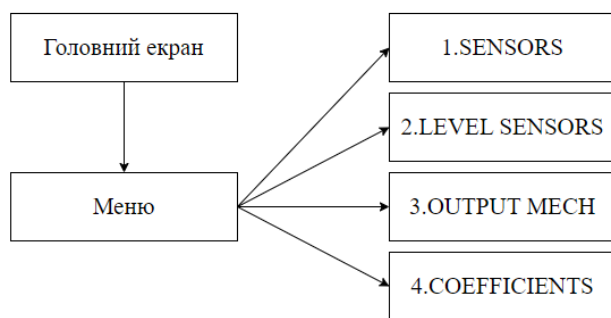


Рисунок 13 – Структура екранів меню контролера

Вимоги до організації вхідних та вихідних даних:

1. Повинна проводитись обробка виміряних значень датчиків. Під обробкою мається на увазі: фільтрація, перетворення виміряного сигналу на фізичну величину згідно із заданими значеннями верхньої і нижньої границь вимірювань або типу підключеного датчика.

2. Допустимий діапазон для вимірювання температури зовнішнього повітря повинен бути від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$ . Точність вимірювання температури не має перевищувати  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

3. Допустимий діапазон для вимірювання температури води в бойлері, прямої води, зворотної води, колектору має бути від  $0^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ . Точність вимірювання температури не має перевищувати  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

4. Допустимий діапазон для вимірювання інтенсивності сонячної радіації має бути від 0 до  $1600\text{ Вт/м}^2$ . Точність вимірювання не має перевищувати 3 %.

5. Інтервал оновлення показань (значень параметрів) на дисплеї не має перевищувати час, що дорівнює 1 с.

#### Висновки.

1. Розроблено математичну модель системи управління комбінованою фотовольтаїчною/тепловою системою, яка базується на використанні спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання роботи елементів управління та логіки та їх реагування на перехідні та аварійні режими роботи комбінованої фотовольтаїчної/теплової системи.

2. Згідно з результатами аналітичних та оптимізаційних досліджень запропоновано структурне рішення системи управління для подальшого впровадження та польових випробувань.

3. Розроблено критерії реагування системи управління на перехідні та аварійні режими роботи комбінованої фотовольтаїчної/теплової системи. Визначено допустимі та критичні значення ряду параметрів, що характеризують роботу комбінованої фотовольтаїчної/теплової системи в нормальному режимі та відхилення від яких вказують на наявність аварійної ситуації.

4. Запропоновані алгоритми системи управління дозволяють збільшити надійність комбінованої фотовольтаїчної/теплової системи та зменшити ризик аварійних ситуацій під час польових випробувань та подальшої експлуатації.

#### Список літератури

- Simon J., Sánta R. Energy efficient smart home heating system using renewable energy source with fuzzy control design. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. 2023. Vol. 6, no. 1. P. 948–974. DOI: <https://doi.org/10.31181/dmame622023825>.
- Dutkowski K., Kruzel M., Fiuk J., Rokosz K., Michalska-Pozoga I., Szczepanek M. Experimental Studies on the Influence of Spatial Orientation of a Passive Air Solar Collector on Its Efficiency. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 10. 4125. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16104125>.
- Ahmeda O. K., Algburib S., Daouda R. W., Shubatc H. N., Aziz E. F. The Various Designs of Storage Solar Collectors: A Review. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 166–185. DOI: <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.45969>.
- Nattappan A., Ganesan S. P., Thiagarajan V., Ranganathan K. Design of automation control thermal system integrated with parabolic trough collector based solar plant. *Thermal Science*. 2022. Vol. 26, no. 2. P. 947–954. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI201113218N>.
- Flor Unda O. Adaptive control systems for solar collectors. *Athenea*. 2021. Vol. 2, no. 4. P. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.47460/athenea.v2i4.18>.
- Ait Wassima A., Aggour M., Bennani F. Automating a Solar Water Heating System. *Journal of Energy Systems*. 2017. Vol. 1, no. 2. P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.30521/jes.330414>.
- Fiamonzini L. A., Rivas G. A. R., Ando O. H. Workbench for a Parabolic Trough Solar Collector with a Tracking System. *The Scientific World Journal*. 2022. Vol. 2022. 4505349. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4505349>.



8. Hu D., Liu H., Zhu Y. et al. Modeling and Simulation of Indirect Collector Solar Hot Water Heating System Based on TRNSYS. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2503. 012066. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2503/1/012066>.
9. Amjith S., Arjun M., Seethu V., Gayathri D. G., Rahul P. R., Amal S. Hybrid Photovoltaic Thermal Solar Collector For Solar Dryer System. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 533–538.
10. Hasan M., Hriczó K. Prediction of Energy Efficiency of a Solar Air Collector Using Artificial Neural Network Technique. 8<sup>th</sup> International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2022). Debrecen, Hungary, 10–11 November 2022. P. 42–43.
11. Ravi Kumar K., Krishna Chaitanya N. V. V., Sendhil Kumar N. Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation – A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 282. 125296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125296>.
4. A. Nattappan, S. P. Ganesan, V. Thiagarajan, and K. Ranganathan, “Design of automation control thermal system integrated with parabolic trough collector based solar plant”, *Thermal Science*, vol. 26, no. 2, pp. 947–954, 2021, doi: <https://doi.org/10.2298/tsci201113218n>
5. O. Flor Unda, “Adaptive control systems for solar collectors”, *Athenea*, vol. 2, no. 4, pp. 19–25, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.47460/athenea.v2i4.18>
6. W. Ait Ahmed, M. Aggour, and F. Bennani, “Automating a solar water heating system”, *Journal of Energy Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 56–64, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.30521/jes.330414>
7. L. A. Fiamonzini, G. A. R. Rivas, and O. H. Ando Junior, “Workbench for a parabolic trough solar collector with a tracking system”, *The Scientific World Journal*, vol. 2022, Jul. 2022, Art. no. 4505349, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4505349>
8. D. Hu et al., “Modeling and simulation of indirect collector solar hot water heating system based on TRNSYS”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2503, May 2023, Art. no. 012066, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2503/1/012066>
9. S. Amjith, M. Arjun, V. Seethu, D. G. Gayathri, P. R. Rahul, and S. Amal, “Hybrid photovoltaic thermal solar collector for solar dryer system”, *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*, vol. 9, no. 2, pp. 533–538, 2021.
10. M. Hasan and K. Hriczó, “Prediction of energy efficiency of a solar air collector using artificial neural network technique”, in 8<sup>th</sup> international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2022), Debrecen, Hungary, Nov. 10–11, 2022. pp. 42–43.
11. K. Ravi Kumar, N. V. V. Krishna Chaitanya, and N. Sendhil Kumar, “Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation – A review”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 282, Feb. 2021 Art. no. 125296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125296>

## References

1. J. Simon and R. Sánta, “Energy efficient smart home heating system using renewable energy source with fuzzy control design”, *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 948–974, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.31181/dmame622023825>
2. K. Dutkowski, M. Kruzal, J. Fiuk, K. Rokosz, I. Michalska-Požoga, and M. Szczepanek, “Experimental studies on the influence of spatial orientation of a passive air solar collector on its efficiency”, *Energies*, vol. 16, no. 10, May 2023, Art. no. 4125, doi: <https://doi.org/10.3390/en16104125>
3. O. K. Ahmed, S. Algburi, R. W. Daouda, H. N. Shubat, and E. F. Aziz, “The various designs of storage solar collectors: A review”, *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 1, pp. 166–185, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.45969>

Надійшла (received) 03.05.2024

## Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

**Євсеєнко Олег Миколайович (Oleg Yevseienko)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та управління в технічних системах; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>; e-mail: [oleh.yevseienko@khp.edu.ua](mailto:oleh.yevseienko@khp.edu.ua).

**Кануннікова Надія Олександрівна (Nadiia Kanunnikova)** – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3611-6729>; e-mail: [Nadiia.Kanunnikova@khp.edu.ua](mailto:Nadiia.Kanunnikova@khp.edu.ua).

**Мінакова Ксенія Олександрівна (Kseniia Minakova)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-1082>; e-mail: [kseniiia.minakova@khp.edu.ua](mailto:kseniiia.minakova@khp.edu.ua).

**Зайцев Роман Валентинович (Roman Zaitsev)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-8452>; e-mail: [roman.zaitsev@khp.edu.ua](mailto:roman.zaitsev@khp.edu.ua).

**Кіриченко Михайло Валерійович (Mykhailo Kirichenko)** – кандидат технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4847-506X>; e-mail: [mykhailo.kirichenko@khp.edu.ua](mailto:mykhailo.kirichenko@khp.edu.ua).

**Хрипунів Михайло Семенович (Mykhailo Khrypunov)** – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-5174>; e-mail: [mykhailo.khrypunov@infiz.khp.edu.ua](mailto:mykhailo.khrypunov@infiz.khp.edu.ua).

**Сапрукін Ростислав Ігорович (Rostislav Saprykin)** – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4539-5188>; e-mail: [rostyslav.saprykin@infiz.khp.edu.ua](mailto:rostyslav.saprykin@infiz.khp.edu.ua).