

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

освітнього ступеня "магістр"
на тему:

Автоматизована система керування сонячним колектором автомийки /
Automated solar collector control system autowash

Виконав студент групи АКІТм-21
Горохівський Михайло-Сергій Олегович

Керівник роботи: к.т.н., доцент Албанський І.Б.

Тернопіль2025

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"

Спеціальність – 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри СКС

А.І.Сегін

04 грудня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Горохівського Михайла-Сергія Олеговича

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Автоматизована система керування сонячним колектором автомийки /
Automated solar collector control system autowash.

Керівник роботи: к.т.н., доцент Албанський І.Б.

Затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

1 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз та дослідження сонячних колекторів.

2. Структура автоматизованої системи керування сонячним колектором.

3. Процеси збору й обробки інформації в автоматизованих системах.

4. Оптимізація методів ідентифікації динамічних об'єктів автоматизованих систем керування.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Дослідження автоматизованих систем керування сонячним колектором.

2. Обґрунтування вибору елементної бази та реалізація автоматизованої системи керування сонячним колектором.

3. Розробка аналітичного методу ідентифікації низькочастотних об'єктів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Структурна та функціональна схеми автоматизованої системи керування сонячним колектором мийки самообслуговування.

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Албанський І.Б., к.т.н., доцент кафедри СКС		
2	Албанський І.Б., к.т.н., доцент кафедри СКС		
3	Албанський І.Б., к.т.н., доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 2 грудня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд автоматизованих систем керування сонячними колекторами	12.2024р. – 02.2025р.	виконано
2	Розробка системи автоматичного керування сонячним колектором	03.2025р. – 06.2025р.	виконано
3	Оптимізація методів ідентифікації динамічних об'єктів автоматизованих систем керування	07.2025р. – 11.2025р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату та виправлення недоліків	11.2025р. – 12.2025р.	виконано

Студент _____
(підпис)

Горохівський М-С.О.

Керівник роботи _____
(підпис)

к.т.н., доцент Албанський І.Б.

АНОТАЦІЯ

Горохівський М-С.О. Автоматизована система керування сонячним колектором автомийки. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» - Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2025.

У роботі: проаналізовані основні види автоматизованих систем керування сонячним колектором; визначені основні вимоги та задачі для проектування системи керування сонячним колектором мийки самообслуговування; розроблено структуру та функціональну схему автоматизованої системи керування; обґрунтовано вибір засобів автоматизації; розроблено аналітичний метод ідентифікації низькочастотних об'єктів; проведено моделювання методів ідентифікації об'єктів нагріву і їх порівняння.

ANNOTATION

Horokhivskiyi M-S.O. Automated control system for a car wash solar collector. – Manuscript.

Research for obtaining a master's degree in the specialty - 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics", educational and professional program - "Automation and computer-integrated technologies" - Western Ukrainian National University. Ternopil, 2025.

The work: analyzed the main types of automated solar collector control systems; determined the main requirements and tasks for designing a solar collector control system for a self-service car wash; developed the structure and functional diagram of the automated control system; justified the choice of automation tools; developed an analytical method for identifying low-frequency objects; conducted modeling of methods for identifying heating objects and their comparison.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1. ОГЛЯД АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ КОЛЕКТОРАМ	9
1.1 Загальна структура, та функціональні можливості автоматизованих систем керування сонячними колекторами	9
1.2 Різновиди компонування та структурна складність систем керування	16
1.3 Застосування сонячних колекторів для забезпечення енергоефективності пунктів самообслуговування автомийок	22
2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМ КОЛЕКТОРОМ	30
2.1 Обґрунтування умов та постановка задачі розробки автоматизованої системи керування сонячним колектором	30
2.2 Розробка структурної схеми та функціональних вузлів автоматизованої системи керування сонячним колектором	37
2.2.1 Вибір та обґрунтування центрального модуля керування та периферійних пристрої АСК	42
2.2.2 Алгоритм роботи АСК та взаємодія сонячного колектора з мийкою самообслуговування	46
3. ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	49
3.1 Розробка аналітичного методу ідентифікації низькочастотних об'єктів	49
3.2 Моделювання методів ідентифікації об'єктів нагріву і їх порівняння	53
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
ДОДАТОК А	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АСК – автоматизована система керування;
ПЛК – програмовано-логічний контролер;
ПЗ – програмне забезпечення;
АСУ – автоматизована система управління;
ЦМУ - центральний модуль управління;
ШИМ – широтно-імпульсна модуляція;
АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ОК – об’єкт керування;
ПІ – пропорційно-інтегральний;
ПІД - пропорційно-інтегрально-диференціальний;
ОМС – оператор-моніторингова система;
ТАУ - теорія автоматичного управління;
ККД – коефіцієнт корисної дії.

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання вартості енергоресурсів, підвищення вимог до енергоефективності та прагнення підприємств до зниження експлуатаційних витрат роблять використання відновлюваних джерел енергії украй актуальним. Автомийки самообслуговування, як об'єкти з високим і нерівномірним споживанням гарячої води, є одним з найбільших споживачів теплової енергії у сфері малого та середнього бізнесу. Забезпечення стабільної подачі гарячої води при мінімальних витратах — ключовий фактор економічної стійкості таких підприємств. Саме тому впровадження сонячних колекторів у комплексі з автоматизованою системою керування набуває особливої актуальності.

Сонячні колектори здатні забезпечити до 60–80% річної потреби автомийки в теплі, однак ефективність їх роботи значною мірою залежить від правильності керування теплотехнічними процесами. Відсутність автоматизованого регулювання призводить до перегріву колектора, втрат енергії, надлишкового навантаження на насосне обладнання, нерівномірного прогрівання баків-акумуляторів та зменшення строку служби системи. Тому автоматизація процесів збору, передачі та накопичення тепла є критично важливою для надійності та економічної ефективності всієї установки.

Використання АСК дає можливість реалізувати оптимальні алгоритми керування, що базуються на аналізі температури колектора, бака-акумулятора, тиску в контурі, інсоляції, рівня теплоносія та інших параметрів. Такий комплексний підхід забезпечує максимальний відбір теплової енергії за мінімальних затрат електроенергії, продовжує ресурс насосного обладнання та мінімізує аварійні режими. Крім того, автоматизована система дозволяє оперативно адаптувати роботу колектора до зміни погодних умов, сезонних режимів та графіка завантаженості автомийки.

З огляду на інтенсивне розширення мереж автомийок самообслуговування в Україні та світі, а також необхідність зменшення залежності від традиційних енергоносіїв, тема розробки та впровадження автоматизованої системи керування сонячним колектором є надзвичайно актуальною. Вона поєднує питання енергозбереження, екологічності, підвищення продуктивності та надійності технологічного процесу, що відповідає сучасним технічним, економічним та екологічним вимогам.

Таким чином, розробка АСК сонячного колектора для автомийки самообслуговування є важливою практичною та науковою задачею, яка має значний потенціал для впровадження у реальних об'єктах та сприяє розвитку ефективних енергетичних рішень у комерційному секторі.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження, проектування автоматизованої системи керування сонячним колектором автомийки та розробка аналітичного методу ідентифікації низькочастотних об'єктів.

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно:

- дослідити існуючі автоматизовані системи керування сонячним колектором для різних сфер застосування;
- проаналізувати елементну базу та структури автоматизованих систем керування, апаратне та програмне забезпечення;
- розробити структурну та функціональні схеми автоматизованої системи керування сонячним колектором мийки самообслуговування;
- обґрунтувати вибір елементної бази запропонованої автоматизованої системи;
- проаналізувати відомі методи ідентифікації динамічних об'єктів автоматизованих системах управління (АСУ);
- розробити аналітичний метод ідентифікації низькочастотних об'єктів АСУ.

Об'єкт дослідження: процеси автоматизації та контролю за температурними параметрами теплоносія АСУ сонячного колектора.

Предметом дослідження є автоматизована система керування сонячним колектором мийки самообслуговування.

Наукова новизна одержаних результатів: реалізовано аналітичний метод ідентифікації низькочастотних об'єктів системи регулювання температури автоматизованої системи керування та досліджено роботу системи контролю температурних параметрів теплоносія первинного контура запропонованої АСУ шляхом моделювання методів ідентифікації об'єктів нагріву і їх порівняння, що забезпечує ефективну роботу системи керування сонячним колектором, це в свою чергу дозволяє ефективніше і раціональніше використовувати енергоресурси на об'єктах малого та середнього бізнесу.

Практичне значення отриманих результатів: гнучкість, простота та технічна можливість масштабування сонячного колектора запропонованої автоматизованої системи керування на мийці самообслуговування, що дозволяє оптимізувати використання та заощадження енергоресурсів об'єкта підприємницької діяльності.

Апробація. На основі досліджень підготовлено та опубліковано 2 тези доповідей на наукових студентських конференціях (додаток А).

1. ОГЛЯД АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ КОЛЕКТОРАМ

1.1 Загальна структура, та функціональні можливості автоматизованих систем керування сонячними колекторами

Автоматизована система керування (АСК) сонячним колектором — це комплекс обладнання, сенсорів, виконавчих механізмів та програмного забезпечення, призначений для забезпечення оптимального збору сонячної енергії, контролю температурних і гідравлічних параметрів та автоматичного регулювання роботи всієї теплової установки. Загальна структура і компоновка АСК сонячним колектором представлена на рисунку 1.1.

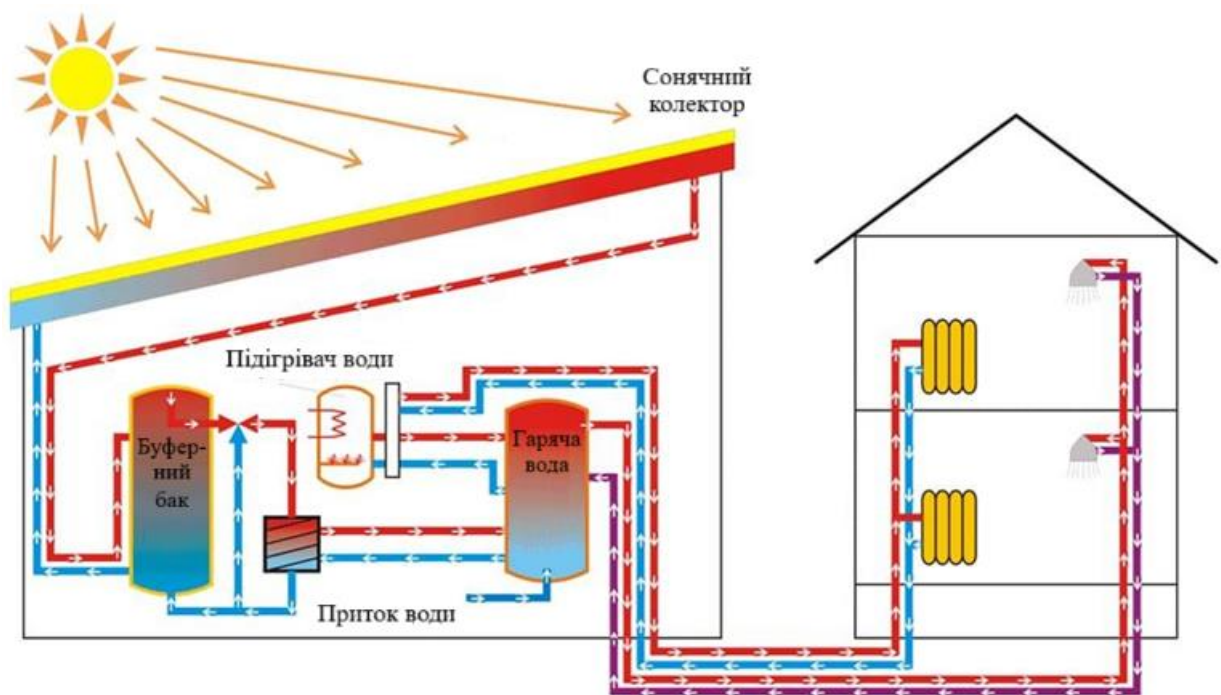


Рисунок 1.1 – Загальна структура і компоновка автоматизованої системи керування сонячним колектором

До основної складової АСК можна віднести вимірювальні сенсори. Система зазвичай містить різноманітні сенсори, а саме:

- сенсори температури (температура колектора, температура теплоносія на подачі й звороті, температура акумулюючої ємності (верх, низ), температура навколишнього середовища);

- сенсор тиску (у гідравлічному контурі);
- сенсор потоку теплоносія;
- сенсор інсоляції / освітленості (опційно);
- сенсор рівня рідини (у розширювальному баку).

Функціонал автоматизованої системи керування включає ряд можливостей та додаткових функцій, що оптимізують роботи АСК. Основними функціями АСК є [1]:

- контроль температури та регулювання теплоносія (система вмикає/вимикає насос циркуляції залежно від різниці температур між колектором та баком-акумулятором);

- захист від перегріву (коли колектор нагрівається до критичного рівня, система знижує циркуляцію або переводить тепло в буфер);

- захист від замерзання;
- підтримання заданої температури у баку-акумуляторі;
- контроль тиску та стану гідравлічного контуру;
- дистанційний моніторинг і управління;
- аварійна сигналізація (перегрів, відсутність потоку, падіння тиску, збій насоса чи клапана, несправність сенсорів).

Додатковими функціями можуть бути:

- логування показників у реальному часі;
- енергетична статистика (збір даних про вироблену теплову енергію);
- прогнозування ефективності (у системах з інтернет-зв'язком);
- інтерфейс користувача з можливістю налаштування режимів.

Програмно-апаратне забезпечення системи включає комплекс програмного забезпечення, що підтримує і контролює роботу апаратних засобів. Апаратна частина це сукупність електронних та електронно-механічних компонентів, що забезпечують ефективне функціонування АСК.

До складу апаратного комплексу АСК входить [1, 2]:

- контролер - головний модуль керування (основному використовуються - PLC-контролери (Siemens LOGO, Schneider Zelio, ОВЕН ПЛК, мікроконтролери (ESP32, Arduino, STM32), спеціалізовані контролери для сонячних систем (Resol, Sunspec, Viessmann, Vaillant));
- циркуляційні насоси (з PWM регулюванням швидкості, з вбудованими частотними регуляторами);
- керовані електроклапани (триходові, з сервоприводами);
- блок живлення, в деяких випадках автономний (сонячна панель + акумулятор);
- модулі зв'язку (Wi-Fi, Ethernet, GSM, RS485 (MODBUS RTU)).

Програмне забезпечення це комплекс програмних засобів (основна програми роботи ПЛК, прошивки мікроконтролерів, драйвера обладнання, патчі), що контролюють і забезпечують функціонування всієї АСК за заданим алгоритмом роботи. Для ефективним керуванням АСК застосовують:

- а) вбудоване ПЗ контролера, воно включає алгоритми регулювання температури (ΔT -контроль, PID-регулювання, логічне керування);
- б) SCADA-систему особливо у великих промислових комплексах (Ignition, WinCC, MasterSCADA, Trace Mode);
- в) Web-інтерфейси на базі різнотипних дисплеїв та екранів (моніторинг температур, тиску, потужності, налаштування параметрів, журнали подій);
- г) мобільні додатки (для хмарних контролерів типу Resol або Victron).

Засоби автоматизації включають сукупність сенсорів та виконавчих механізмів, що використовуються для підтримки функціональності АСК. Основна сукупність сенсорів: DS18B20, Pt1000, NTC 10к для температури; сенсори тиску 0–6 бар, 4–20 mA; сенсори потоку Hall-effect або ультразвукові; фото-, піраніметри для вимірювання інсоляції.

Виконавчі механізми це базові і додаткові технічні засоби, а саме: Насоси Wilo, Grundfos з ШІМ або MODBUS-керуванням; електромагнітні та сервопривідні клапани; керовані реле, твердотільні реле.

До апаратних засобів керування належать контролери автоматизації. Типовими варіантами для АСК сонячного колектора є (рисунок 1.2): PLC Siemens LOGO 8.3 — найпопулярніший у промислових колекторах, Arduino/ESP32 — у побутових саморобних системах, Raspberry Pi — для мережесх IoT-проектів, ОВЕН ПЛК-100/150 — доступний бюджетний варіант для домашніх (дачних) систем [3].



Рисунок 1.2 – Промисловий ПЛК орієнтований під задачі керування сонячного колектора

Мережеве обладнання застосовується для внутрішнього зв'язку між модулями системи, а також для зовнішнього підключення через мережу Internet (дистанційний контроль, діагностика, сервісне оновлення ПЗ). Комплекс обладнання включає: телекомунікаційні модулі GSM/4G, промислові маршрутизатори Teltonika, RS485-адаптери.

Узагальнена структура автоматизованої системи керування сонячним колектором включає набір основних модулів:

- сенсорний модуль – температурні та гідравлічні сенсори;
- контролер – приймає рішення на основі показників;
- модуль комутації – реле, SSR, модулі ШІМ;

- виконавчі механізми – насоси, клапани, перемикачі контурів;
- система моніторингу – дисплей, веб-інтерфейс, SCADA;
- блок живлення – 220 В або автономний.

Автоматизована система керування сонячним колектором — це комплекс технічних засобів, що забезпечують оптимальний режим роботи сонячної теплової установки, її безпечну експлуатацію та максимальне використання енергії сонця. Її робота ґрунтується на безперервному зборі даних, аналізі параметрів теплоносія та виконанні керуючих дій для досягнення бажаних температурних режимів.

Основні принципи роботи АСК сонячного колектора базуються на контролі температури та використанні регулювання (П, ПД, ΔT) для досягнення оптимальної роботи АСК. Контроль температури та використання ΔT -регулювання один з оптимальних способів підтримки правильного функціонування системи. Ключовий принцип функціонування - порівняння температури: на поверхні сонячного колектора (T_1); у баку-акумуляторі (T_2).

Коли різниця температур $T_1 - T_2$ перевищує заданий поріг, контролер увімкне циркуляційний насос. Це означатиме, що в колекторі виробляється достатньо тепла, доцільно перекачувати теплоносій у бак для нагрівання води. Якщо ж різниця температур стає меншою за мінімальний поріг, насос вимикається, щоб уникнути охолодження бака.

Сенсори та вимірювальна підсистема АСК використовує найбільш важливі сенсори [4]:

- сенсори температури (колектор, подача, зворотка, бак-акумулятор, зовнішнє середовище);
- сенсор потоку — визначає, чи рухається теплоносій у контурі;
- сенсор тиску — контролює гідравлічний стан;
- сенсор інсоляції (не обов'язковий) — підсилює точність прогнозування.

Система регулярно зчитує ці параметри з інтервалом 0,5–2 секунди. Робота виконавчих механізмів базується командах головного контролера або ПЛК. На основі вимірних даних контролер керує наявними виконавчими механізмами. До базових компонентів виконавчих механізмів належить циркуляційним насосом, насос запускається у випадках:

- колектор нагрітий і є запас тепла для передачі;
- бак має температуру нижчу за встановлену;
- є достатній тиск та прохідність в системі.

Модельний ряд сучасних насосів, що представлені на світовому ринку найчастіше мають функціональні переваги, а саме:

- ШІМ-регулювання (зміна швидкості);
- інтегровані частотні регулятори.

Керування відбувається через релейні або аналогові виходи модуля вводу/виводу ПЛК сервопривідними клапанами АСК може автоматично, відкриваючи або закриваючи коли:

- контур нагріву бака;
- контур скидання надлишкового тепла;
- контур антизамерзання.

Захисні режими — ключовий елемент роботи системи в автоматичному режимі. АСК має розвинені алгоритми безпеки, а саме: захист від перегріву, захист від замерзання, захист від аварійного тиску. Захист від перегріву працює якщо температура колектора надто висока (наприклад +140 °С), насос переходить у аварійний режим, відкривається клапан скидання тепла, тепло переноситься в додатковий контур (резервний бак або радіатор). Захист від замерзання спрацьовує у разі зниження температури нижче 5 °С, а саме коли система коротко вмикає циркуляцію, щоб прогріти колектор або подає тепло з бака або активує електрохімічний підігрів (у деяких моделях). Захист від аварій тиску спрацьовує при сильному падінні або підвищенні тиску, насос блокується.

Алгоритм роботи АСК у звичайному режимі можна описати типовим циклом. На початку циклу система зчитує дані з усіх сенсорів, порівнює температуру колектора і бака якщо $\Delta T >$ допустимого порога, вмикає насос. Насос у свою чергу перекачує теплоносії в бак де нагрівається. Контролер постійно контролює протікання, тиск, швидкість підвищення температури і якщо ΔT падає — насос вимикається. При перегріві або замерзанні вмикається захисний алгоритм. Усі події реєструються в журналі контролера, дані передаються на дисплей, мобільний застосунок або SCADA [5].

Інтелектуальні функції сучасних АСК сонячних колекторів включені в нові моделі контролерів, які використовують:

- прогноз погоди для оптимізації роботи;
- статистичні моделі ефективності;
- адаптивне регулювання швидкості насоса;
- хмарний моніторинг через Wi-Fi або GSM;
- автоматичне оновлення ПЗ;
- самодіагностику дефектів (сенсорів, насоса, клапанів).

Це дозволяє продовжити ресурс обладнання, підвищити ККД системи, забезпечити безперервну роботу без втручання людини. Взаємодія користувача з системою відбувається за допомогою діалогового дисплей-монітора або мобільного за стосунку. Оператор може переглядати: температуру на кожному етапі роботи, історію нагріву, час роботи насоса, статистику зібраної енергії, аварії та попередження. А також у свою чергу може налаштувати: поріг ΔT , максимальну температуру бака, режими роботи (нічний, зимовий, економний), графіки нагріву.

Автоматизована система керування сонячним колектором працює на основі сенсорів → контролера → виконавчих механізмів → алгоритмів регулювання → режимів безпеки. Вона забезпечує максимальне використання теплової енергії сонця за повної безпеки функціонування системи, автоматичну роботу без втручання людини, що забезпечує зниження витрат енергії і прогнозованість та стабільність роботи.

1.2 Різновиди компонування та структурна складність систем керування

Автоматизація складних технічних систем є одним із ключових чинників розвитку сучасної науки і промисловості. Зростання масштабів виробництва, ускладнення технологічних процесів, необхідність забезпечення високої точності, надійності та енергоефективності вимагають застосування систем керування, заснованих на глибоких теоретичних принципах. Теорія автоматичного управління (ТАУ) як наукова дисципліна формує математичні, алгоритмічні та структурні основи побудови таких систем, забезпечуючи можливість передбачати поведінку об'єкта, аналізувати його стійкість та синтезувати оптимальні алгоритми управління.

Сучасні автоматизовані комплекси — технологічні лінії, енергетичні установки, транспортні системи, робототехніка, Smart Grid-мережі, кіберфізичні системи, автономні платформи — характеризуються нелінійністю, багатовимірністю, динамічною змінністю параметрів, наявністю випадкових збурень, а часто й елементами штучного інтелекту. Це означає, що класичні методи керування доповнюються сучасними концепціями адаптивного, оптимального, предиктивного, інтелектуального керування. Саме ТАУ забезпечує наукову основу для інтеграції цих підходів і створення керувальних систем високої складності.

У даному теоретичному обґрунтуванні розглянуто фундаментальні принципи, математичні моделі, структурні схеми та актуальні методи синтезу систем керування, що забезпечують функціонування складних автоматизованих об'єктів.

У теорії автоматичного керування поняття об'єкта керування є одним із фундаментальних, оскільки саме цей елемент визначає, якими методами, законами та структурою керування необхідно користуватися для забезпечення бажаних динамічних властивостей системи. Об'єкт керування розглядається не як ізольований механізм, а як частина динамічної системи,

що змінює свій стан у часі під впливом зовнішніх та внутрішніх сигналів, перешкод, а також команд регулятора.

Об'єкт керування — це технічна, фізична, біологічна або інша система, на стан чи поведінку якої впливають управляючі дії з метою досягнення наперед визначеного результату. До об'єктів керування можуть належати [6]:

- електротехнічні установки (двигуни, генератори);
- теплотехнічні системи (котли, теплообмінники, колектори);
- мехатронні та роботизовані системи;
- хімічні процеси;
- економічні та логістичні процеси.

Кожен об'єкт є носієм внутрішніх фізичних закономірностей, які виражаються у вигляді динамічних рівнянь, що описують зміну його стану залежно від вхідних сигналів.

Динамічна система — це система, у якій поточний стан залежить від попереднього та змінюється в часі. У випадку об'єкта керування це означає, що він має: входи (керувальні та збурювальні впливи), виходи (фізичні параметри, що підлягають регулюванню), стан (внутрішні величини, що визначають його поведінку). З математичної точки зору об'єкт описується рівняннями виду:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), w(t))$$

$$y(t) = g(x(t), u(t))$$

де $x(t)$ — вектор станів, $u(t)$ — керуючі дії, $w(t)$ — зовнішні збурення, $y(t)$ — вихідні величини. Таке представлення називається стан-просторовою моделлю та є основою сучасних методів синтезу керування.

Структурні властивості об'єкта як елемента системи керування розуміють під собою об'єкт керування, що має низку властивостей, які визначають поведінку автоматизованої системи.

Інерційність, коли будь-який фізичний об'єкт не може змінювати свій стан миттєво. Інерційність проявляється у вигляді запізненої реакції і часу перехідних процесів. Наприклад, нагрівання рідини в сонячному колекторі

має теплову ємність – температура, яка реагує на зміну потоку енергії із запізненням.

Нелінійність - коли більшість реальних об'єктів не є строго лінійними. Нелінійності проявляються у вигляді насичення (насоси, двигуни), нелінійних характеристик клапанів, залежності параметрів від температури, тиску, швидкості потоку. Це ускладнює побудову моделей та синтез регуляторів.

Стохастичність - коли на об'єкт впливають випадкові фактори, такі як шум сенсорів, зміна температури навколишнього середовища, дискретні перешкоди. Це вимагає використання фільтрації та робастних алгоритмів.

Запізнення - коли у деяких системах управління затримка між дією і реакцією може бути значною. У теплотехнічних або гідравлічних системах такі запізнення можуть бути суттєвими і призводити до нестабільності в контурі керування.

Прикладом об'єкта керування є сонячний тепловий колектор (рисунок 1.1). У цьому випадку об'єктом керування є теплогідравлічний контур, у якому керуючим сигналом є швидкість насосу або положення клапана, а також керованою величиною є температура теплоносія, збуреннями — зміна інсоляції, погоди, тепловтрат. Така система може бути: нелінійна (температурні коефіцієнти змінюються), інерційна (велика теплоємність), стохастична (зміна сонячної радіації), з затримками (інерція передавання тепла). Цей приклад демонструє, чому розуміння об'єкта є ключовим при розробці АСК.

Значення об'єкта керування для синтезу систем автоматизації заключається у правильному визначенню властивостей об'єкта керування, що дозволяє:

- вибрати структуру системи керування: П-, ПІ-, ПІД-регулятори, нечіткі, адаптивні;
- забезпечити стабільність контурів;
- уникнути автоколивань та перевантажень обладнання;

- підвищити ефективність роботи технологічного процесу;
- забезпечити економічність і безпечність системи.

Об'єкт керування є центральним елементом будь-якої динамічної системи та визначає характер і складність процесу керування. Його властивості — інерційність, нелінійність, наявність збурень і запізнь — формують вимоги до структури, алгоритмів і технічного забезпечення системи автоматизації. Правильне розуміння об'єкта керування, його математичне моделювання та аналіз — ключ до створення ефективних, надійних і стабільних автоматизованих систем.

До основних принципів ТАУ у складних автоматизованих системах відносять: принцип зворотного зв'язку, принцип стійкості, робастність та компенсація невизначеностей.

Принцип зворотного зв'язку включає в себе зворотний зв'язок — центральне поняття ТАУ. Його призначення — компенсувати вплив зовнішніх збурень і невизначеностей. У складних системах використовують:

- жорсткий зворотний зв'язок (пряме вимірювання вихідної величини);
- внутрішні зворотні зв'язки (регулювання проміжних параметрів);
- структуровані зворотні зв'язки (багаторівневі схеми);
- адаптивні зворотні зв'язки (змінювані моделі).

Структура складної АСК часто нагадує ієрархію, що включає: нижній рівень — локальні регулятори, середній рівень — координація між контурами, верхній рівень — оптимізація на основі математичної моделі.

Принцип стійкості включає стійкість — фундаментальний критерій якості будь-якої системи керування. Система має повертатися до заданого стану після будь-якого збурення. Методами аналізу є наступні:

- критерії Гурвіца–Ляпунова;
- метод Найквіста;
- логарифмічні частотні характеристики;
- метод коренелужних діаграм.

Для складних об'єктів критично важливими є робастна стійкість - збереження працездатності при змінах параметрів, стійкість до шумів, стійкість при насиченні виконавчих механізмів.

Робастність та компенсація невизначеностей це як правило у складних системах у яких завжди містяться невизначеності [6, 7]:

- зміна параметрів середовища;
- неповне знання математичної моделі;
- випадкові збурення;
- інерційність вимірювальних систем;
- нелінійна поведінка виконавчих механізмів.

Методи забезпечення робастності це є: робастне керування H_∞ , ковзний режим (Sliding Mode Control), нечіткі регулятори, нелінійне зворотне проектування (feedback linearization), адаптивне керування.

Алгоритмічні методи керування складними системами включають в себе: оптимальне, адаптивне і предиктивне керування. Оптимальне керування – набір інструментів та засобів при яких оптимальні системи синтезуються на основі:

- функціоналів якості;
- принципу Беллмана;
- методу Ляпунова;
- LQR/LQG-регуляторів.

Мета — мінімізувати енергоспоживання, відхилення параметрів, час переходу, коливання виходу.

Адаптивне керування базується на тому, що суть адаптивності — автоматична зміна параметрів регулятора залежно від поточного стану об'єкта. Застосовується у випадках зміни навантаження, високої варіативності динаміки, невідомої моделі об'єкта. Використовують для роботи самоналаштовувані регулятори, а також моделі параметричної ідентифікації, MRAS-схеми (Model Reference Adaptive Systems).

Предиктивне керування (MPC) - Model Predictive Control — один із найефективніших методів для багатоканальних об'єктів, а також систем з обмеженнями (зони безпеки, обмеження швидкості) і нелінійних процесів. MPC передбачає динаміку об'єкта та формує оптимальний керувальний сигнал на горизонті прогнозування.

Ієрархічні та мережеві структури керування це як правило складні автоматизовані системи зазвичай організовані за ієрархічним принципом. Вони включають у свою структуру нижній, середній і вищий рівні.

Нижній рівень (польовий) - локальні регулятори, сенсори, актуатори. Використовує ПЛК, контролери реального часу, сенсори та виконавчі механізми. Середній рівень (координаційний) - координація взаємодії між підсистемами, тобто контролери груп агрегатів, частотні перетворювачі, контролери технологічних вузлів. Вищий рівень (диспетчерський, SCADA) - аналітика, оптимізація, управління режимами роботи, планування.

Прикладами складних систем, де застосовується ТАУ є [7]:

- автоматизовані технологічні комплекси;
- роботизовані маніпулятори;
- електроенергетичні мережі;
- авіаційні та космічні системи;
- транспортні автономні платформи;
- системи безпеки промислового обладнання;
- кіберфізичні системи.

Теорія автоматичного управління є фундаментом побудови складних автоматизованих систем. Її математичні та інженерні методи забезпечують: формування адекватних моделей об'єктів, надають гарантію стійкості та робастності, сприяють побудові оптимальних алгоритмів керування, адаптацію до змін умов роботи, можливість інтеграції інтелектуальних елементів, безпечну взаємодію підсистем і виконавчих механізмів.

Сучасні складні автоматизовані системи поєднують класичні принципи ТАУ з методами штучного інтелекту, мережевими технологіями, адаптивним

і предиктивним контролем. Це дозволяє забезпечити високий рівень ефективності, надійності та автономності у широкому спектрі промислових та наукових застосувань.

1.3 Застосування сонячних колекторів для забезпечення енергоефективності пунктів самообслуговування автомийок

Мийки самообслуговування є одним із найбільш енергоємних видів малого бізнесу, оскільки для забезпечення повноцінного технологічного циклу очищення автомобілів необхідні стабільні потоки гарячої води, що використовуються в різних режимах роботи: попереднє очищення, застосування хімічних засобів, підігрів води для високого тиску, обігрів приміщень, підтримання температури активної піни тощо. Використання традиційних джерел енергії — електроенергії, газових або дизельних котлів — призводить до значних експлуатаційних витрат, які можуть складати до 60–70% вартості утримання мийки. На фоні зростання тарифів на енергоносії, зростання вимог до екологічності підприємств та загального переходу українського і світового ринку до відновлюваних джерел енергії, сонячні колектори стають одним із найперспективніших рішень для забезпечення теплової енергії на мийках самообслуговування.

Сонячні геліосистеми здатні забезпечувати до 60–80% річної потреби у теплі для підігріву води й підтримання технологічної температури, що суттєво зменшує навантаження на традиційні системи нагріву (рисунок 1.3). Завдяки цьому вони мають значний економічний та екологічний потенціал і можуть слугувати ключовим елементом модернізації інфраструктури малого бізнесу в автомобільному секторі.

Енергетичні потреби мийок самообслуговування та сучасні виклики створюють передумови для впровадження нових технологій для вирішення задач енергоефективності бізнес проектів. Витрати енергії на традиційній мийці на сьогоднішній день можуть досягати до 60-70% собівартості

утримання комплексу. Для функціонування мийки самообслуговування необхідно забезпечити [8]:

- підігрів холодної води до 40–60 °С для струменевого високотискового обладнання;
- нагрівання води для змішування з активною піною;
- підтримання температури в технічних приміщеннях і вузлах водопідготовки;
- компенсацію тепловтрат у трубопроводах та ємностях.



Рисунок 1.3 – Застосування сонячних колекторів на мийках самообслуговування

Залежно від інтенсивності роботи мийки, споживання теплової енергії може коливатись у межах 25–80 кВт·год на годину роботи, що еквівалентно витратам 3–10 м³ газу або 20–40 кВт електроенергії. В умовах нинішніх тарифів така енергоємність робить бізнес залежним від коливань ринку енергоносіїв.

Основні проблеми традиційних систем - висока вартість енергоносіїв, що суттєво збільшує собівартість послуг, низька енергоефективність газових котлів у міжсезоння та влітку, коли потреба в теплі менша, залежність від стабільності електромережі та можливих відключень, високі тепловтрати у трубопроводах та бойлерах, екологічний вплив, включно з викидами CO₂. Усі ці фактори створюють потребу у впровадженні альтернативних джерел

енергії, що зменшують довгострокові витрати та підвищують автономність роботи.

Роль сонячних колекторів у теплотехнічному забезпеченні мийок з кожним наступним роком стає актуальнішою. Сонячні колектори — це пристрої, призначені для поглинання сонячного випромінювання та перетворення його на теплову енергію, яка використовується для нагрівання води або теплоносія (рисунок 1.4). На відміну від сонячних електропанелей, що генерують електроенергію, геліоколектор забезпечує значно вищий ККД — до 70–85% корисної дії проти 18–23% у фотомодулів.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд секції сонячного колектора (геліоколектор)

Типи сонячних колекторів та їхня придатність для мийок визначається ефективними способами та об'ємами нагрівання теплоносія. Для мийок самообслуговування найбільш ефективними є плоскі сонячні колектори, вакуумні трубчаті колектори, і їх комбінація (рисунок 1.5).

Плоскі сонячні колектори - традиційні, вони є плоскою коробкою, яка закрита склом (рисунок 1.5 а)). Під склом є абсорбуючий шар із трубками, в яких проходить теплоносій. Перевагами плоских сонячних колекторів є:

- оптимальні для великого об'єму теплоносія;

- довгий термін експлуатації (15–25 років);
- стабільна робота навіть у хмарну погоду;
- низькі вимоги до технічного обслуговування.



Рисунок 1.5 - Типи сонячних колекторів: а) плоскі сонячні колектори, б) вакуумні трубчаті колектори.

Відповідно недоліками є нижча ефективність у зимовий період порівняно з вакуумними.

Вакуумні трубчаті колектори – складаються з великих порожнистих скляних трубок (рисунок 1.5 б)). Усередині цих трубок знаходиться поглинач тепла, який нагріває теплоносій. Перевагами вакуумних трубчастих колекторів є: гарна робота при низьких температурах і взимку; мінімальні тепловтрати.

Відповідно недоліками таких сонячних колекторів є: вища вартість, складніший монтаж. Для мийок самообслуговування часто встановлюють комбіновані системи, де плоскі колектори працюють у теплий сезон, а вакуумні компенсують потребу в міжсезоння.

Існує два види сонячних систем нагрівання води [9, 10]:

- активні (сезонні сонячні колектори);
- пасивні (всесезонні сонячні колектори).

Активна сонячна система нагріву води складніша, дорога, ефективна та придатна для використання в зимовий час. Особливостями цієї системи є те, що бак з водою тут знаходиться усередині приміщення, а колектори на даху.

У пасивних системах нагрівання води колектор і бак з водою зазвичай є єдиною системою. Бак розташований вище за колектор і з'єднується з ним. Теплоносії нагріває воду за природної конвекції. Холодна вода потрапляє у бак під натиском знизу. Така система досить проста та дешева, але має низьку ефективність.

Пасивні системи нагрівання води більш підходять для нагріву влітку, в той час як активні ефективні цілий рік. Для забезпечення виробничих підприємств гарячою водою підходять всесезонні вакуумні колектори, які задовольняють потреби підприємства чи закладу малого та середнього бізнесу (мийки самообслуговування) у гарячій воді цілий рік, а також дозволяють забрати рядок «гарячого водопостачання» зі списку витрат.

Якщо порівнювати сонячний та електричний обігрівач, то перший має багато переваг: витрати на утримання менші та не залежать від цін на електроенергію, термін служби – довше, не забруднює навколишнє середовище.

Загалом сонячні водонагрівачі вигідні для господарств, де велика витрата гарячої води, в регіонах з високими цінами на електроенергію або в місцях, де електроенергія взагалі недоступна.

Як правило, витрати при використанні твердого палива нижчі, але це тягне за собою великі витрати. Тому найкращий варіант – комбінація сонячних колекторів та електронагріву.

Існують деякі особливості встановлення сонячних колекторів. Якщо потрібно використовувати їх для опалення, то буде необхідне додаткове джерело енергії, оскільки колектори не працюють у погану погоду і вночі. Системи сонячного опалення завжди поєднуються з іншими системами. Сонячні колектори забезпечать опалення переважно з вересня по грудень і з березня по травень, взимку потрібне інше джерело тепла.

Техніко-економічні переваги застосування сонячних колекторів обумовлюються тарифами на енергоносії станом на той чи інший період року. Зниження витрат на енергоносії дає можливість модернізувати і

масштабувати системи сонячного нагріву води. Сонячні колектори забезпечують:

- до 80% економії на підігріві гарячої води в період з квітня по жовтень;
- до 40–50% економії у міжсезоння;
- до 25% економії взимку (залежно від площі установки).

Навіть при консервативних розрахунках окупність системи складає 2–4 роки, а термін служби — 15–20 років, що робить інвестицію надзвичайно вигідною з точки зору підвищення автономності мийки самообслуговування.

У випадку перебоїв з газопостачанням чи електрикою, нагрівання води від сонячної системи продовжується незалежно від зовнішніх чинників. Це дає змогу уникнути простоїв, особливо в пікові дні роботи бізнес об'єкта.

Підвищення конкурентоспроможності та стабільності роботи мийок самообслуговування обладнаних сонячними колекторами за рахунок того, що: мають нижчу собівартість послуг, менше залежать від сезонних тарифів на енергоносії, демонструють екологічність бізнесу — важливий фактор для сучасних клієнтів, можуть збільшувати тривалість роботи обладнання, оскільки колектор знімає пікове навантаження з котлів і бойлерів.

Зменшення зношення обладнання ніж у традиційних системах нагріву, які змушені працювати на підвищених потужностях у години високого навантаження. Наявність попередньо підігрітої води від сонячних колекторів суттєво зменшує кількість запусків котла, амплітуду температурних коливань у трубопроводах, навантаження на насоси і знос теплообмінників.

Технологічними аспектами застосування сонячних колекторів є інтеграція колекторів у систему попереднього підігріву води на мийках самообслуговування. Типова схема включає наступні елементи:

- сонячний колекторний масив;
- накопичувальний бак геліосистеми;
- циркуляційні насоси;
- контролер сонячної станції;
- теплообмінники;

- традиційний котел (газовий/електричний);
- буферна ємність гарячої води.

Колектор нагріває теплоносії, який передає тепло у бак-акумулятор. Далі гаряча вода подається на магістраль високого тиску і змішувачі з автохімією потім на контур підігріву технічних приміщень. Автоматизація геліосистеми це сучасні системи, які оснащуються: температурними сенсорами, витратомірами, електронними контролерами, системами захисту від перегріву, системами антизастою в зимовий період. Це робить роботу мийки самообслуговування повністю автономною та безпечною.

Екологічні переваги застосування сонячних колекторів - зменшення викидів CO₂ в першу чергу. Сонячна геліосистема дозволяє скоротити викиди CO₂ на 2–5 тонн щорічно, залежно від інтенсивності використання мийки. Це сприяє екологізації транспортного сектору і дає змогу об'єкту бізнесу відповідність сучасним нормам сталого розвитку і використання ВДЕ є важливим аргументом при отриманні екологічних сертифікатів, податкових пільг (у деяких регіонах ЄС), статусу “зеленої” компанії [10].

Економічна доцільність та прогнозований ефект від застосування сонячних колекторів дають можливість значно скоротити експлуатаційні витрати мийки. Розрахунки показують економію на рівні 30–70 тис. грн щомісяця залежно від розміру мийки, зменшення споживання газу/електроенергії на 50–80 % у піковий сезон, окупність від 24 до 48 місяців. При правильному проектуванні економія може досягати до 800 000 – 1 200 000 грн за перші 10 років експлуатації.

Застосування сонячних колекторів для мийок самообслуговування є економічно вигідним, технологічно доцільним та екологічно перспективним рішенням, яке дозволяє: суттєво знизити витрати на енергоносії, підвищити автономність та стабільність роботи бізнесу, забезпечити високу температуру технологічної води протягом усього року, продовжити термін служби котлів і насосів за рахунок зменшення навантаження на них, адаптуватися до сучасних ринкових викликів і зростаючих тарифів.

Геліосистеми є ефективною інвестицією, яка підвищує конкурентоспроможність підприємства та сприяє розвитку низьковуглецевої економіки. Завдяки високому потенціалу відновлюваної енергії, доступності технологій та позитивному співвідношенню “вартість–ефект”, сонячні колектори стають одним з ключових елементів сучасних мийок самообслуговування в Україні та ЄС.

2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМ КОЛЕКТОРОМ

2.1 Обґрунтування умов та постановка задачі розробки автоматизованої системи керування сонячним колектором

Сучасна енергетична інфраструктура характеризується інтенсивним зростанням споживання теплової енергії в побуті, промисловості та сфері послуг, що супроводжується значним збільшенням витрат на енергоносії. Традиційні джерела теплопостачання — природний газ, електроенергія, дизельне паливо — стають дедалі дорожчими та нестабільнішими в умовах глобальної енергетичної кризи. У зв'язку з цим зростає актуальність використання альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних теплових установок, здатних забезпечити високий рівень енергоефективності та зменшити залежність від мережевих ресурсів.

Сонячні колектори, будучи простими за конструкцією та високими за ефективністю, дозволяють отримувати теплову енергію без прямого споживання палива або електроенергії. Однак ефективність їх роботи значною мірою залежить від правильно організованого процесу керування: режиму циркуляції теплоносія, теплового навантаження, температурного графіка, взаємодії з допоміжними джерелами тепла, стану накопичувальних баків та зовнішніх кліматичних умов. Це зумовлює необхідність створення автоматизованої системи керування сонячним колектором (АСК СК), яка забезпечує оптимальне функціонування системи в реальному часі, підвищує ККД геліоустановки та мінімізує енерговитрати.

Аналіз умов функціонування сонячних колекторів на сьогоднішній день включає ряд чинників, що напряму впливають на ефективність їх роботи для тих чи інших задач. Вплив кліматичних та експлуатаційних чинників значною мірою залишає видимий слід ефективності і окупності

установки для малого та середнього бізнесу. Робота сонячного колектора залежить від багатьох змінних, зокрема:

- інтенсивності сонячного випромінювання;
- кута падіння сонячних променів;
- температури навколишнього середовища;
- швидкості вітру;
- теплового навантаження споживача;
- стану поверхні абсорбера;
- гідравлічних характеристик циркуляційної системи.

Змінність кліматичних параметрів означає, що система повинна автоматично підлаштовуватися під поточні умови, змінюючи:

- швидкість циркуляції теплоносія;
- режим взаємодії з буферними ємностями;
- включення/відключення допоміжного джерела тепла;
- алгоритм захисту від перегріву та замерзання.

Без автоматизації ці процеси неможливо коректно забезпечувати вручну. І відповідно ефективність функціонування вище вгаданих процесів на пряму відображає економічну доцільність розробки і експлуатації автоматизованої системи.

Типові режими та проблеми роботи сонячних геліосистем наглядно демонструють те, що не під усі задачі доцільно і економічно обґрунтовано будувати таку систему. Сонячні колектори працюють у різних режимах [11]:

- * нормальний режим — інтенсивність сонячного випромінювання достатня для підігріву теплоносія;
- * режим низької інсоляції — потребує оптимізації циркуляційного потоку для уникнення втрат тепла;
- * режим перегріву — у випадку надлишку сонця температура може досягати 130–180°C, що вимагає захисних алгоритмів;
- * режим замерзання — при температурі <0 °C потрібні спеціальні заходи (антифриз, періодична циркуляція);

* режим взаємодії з альтернативним нагрівачем — сонячний колектор працює паралельно з електричним або газовим котлом у комбінованій системі.

Усі ці режими вимагають точного та своєчасного керування, яке можна реалізувати лише через автоматизовану систему.

Обґрунтування необхідності створення автоматизованої системи керування сонячним колектором перш за все економічна доцільність та необхідність значних запасів дешевих тепло ресурсів. Такі умови якраз актуальні для мийок самообслуговування. Недоліки ручного керування вносять свої корективи в роботу геліосистеми і створюються додаткові труднощі в процесі експлуатації такої установки. Ручне керування геліосистемою має такі істотні недоліки:

- низька точність регулювання параметрів;
- значні тепловтрати через несвоєчасне перемикання режимів;
- високий ризик перегріву колектора;
- неможливість адаптації до погодних умов;
- збільшення зносу насосів та клапанів;
- відсутність діагностики дефектів;
- потреба в постійній присутності оператора.

Ці обмеження знижують ефективність роботи системи та її безпеку.

Переваги автоматизованого керування АСК на відміну від ручного дозволяє:

- оптимізувати циркуляцію теплоносія;
- забезпечувати максимальний ККД колектора;
- підтримувати необхідний температурний режим;
- захищати систему від замерзання або перегріву;
- підвищувати термін служби обладнання;
- вести журнал подій та телеметрію;
- забезпечувати дистанційний контроль через GSM/Інтернет;
- підвищувати економічну рентабельність геліосистеми.

Технічними критеріями ефективності АСК завжди буде підбір перевіреного професійного обладнання та програмно-апаратних засобів. Для автоматизованої системи встановлюються наступні вимоги [12]:

- швидкодія;
- енергоефективність;
- стійкість до зовнішніх перешкод;
- можливість масштабування;
- адаптивність режимів;
- наявність алгоритмів безпеки;
- інтеграція з іншими енергетичними системами.

Постановка задачі розробки автоматизованої системи керування сонячним колектором проводиться і декілька етапів. Перш за все основна мета проекту, розробити автоматизовану систему керування сонячним колектором, що забезпечує оптимізацію процесу нагрівання теплоносія, безпечну роботу обладнання та максимальний рівень енергоефективності відповідно до змінних кліматичних умов.

До основних функціональних задач АСК відносяться: вимірювання параметрів системи, регулювання циркуляції, захист системи (захисні алгоритми), оптимізація енергетичного балансу, інформаційно-комунікаційні функції.

Вимірювання параметрів системи відбувається циклічно з певним інтервалом в часі. Основне опитування сенсорів проводить центральний контролер чи ПЛК. Базові параметри що опитуються це: температура колектора; температура в баку-акумуляторі; температура зовнішнього середовища; тиск у контурі; витрата теплоносія.

Регулювання циркуляції відбувається на основі даних опитування центральним контролером. Після аналізу отриманих даних з сенсорів контролер згідно запрограмованого алгоритму проводить регулювання циркуляції теплоносія, а також проводить додаткові дії, а саме: автоматичний

запуск/зупинка насоса; регулювання швидкості насоса (за потреби); перерозподіл потоків між баками.

Захисні алгоритми потрібні для того, щоб реагувати на аварійці та нештатні ситуації. В алгоритмі роботи центрального контролера закладені певні захисні дії щодо автоматизованої системи при виникненні аварійних ситуацій. Перш за все контролер реагує функціями захисту на: захист від перегріву; захист від замерзання; аварійне відключення; контроль leaks & pressure drop.

Оптимізація енергетичного балансу ПЛК за певних умов, що супроводжуються вибором пріоритетних режимів роботи, перемиканням між альтернативними джерелами тепла та мінімізацією втрат у трубопроводах.

Інформаційно-комунікаційні функції центрального модуля управління АСК включають в себе: передачу даних на сервер або смартфон; зберігання історії вимірів; встановлення режимів користувачами.

Вимоги до програмно-апаратного комплексу є досить жорсткі, програмне забезпечення має бути ліцензійним з можливістю періодичного оновлення через мережу Internet. Апаратне забезпечення має включати наступні елементи:

- контролер (PLC, STM32, ESP32, Arduino, Raspberry Pi — залежно від складності) [12, 13];
- сенсори температури (DS18B20, PT1000);
- сенсори тиску;
- витратомір;
- реле/твердотільні ключі;
- циркуляційний насос;
- електропривідні клапани;
- модуль зв'язку (Wi-Fi, GSM, LoRaWAN).

Програмне забезпечення в свою чергу повинно:

- реалізовувати логіку керування;

- обробляти дані датчиків;
- забезпечувати аварійні сценарії;
- відображати інформацію на дисплеї або у веб-інтерфейсі;
- підтримувати протоколи обміну даними (Modbus, MQTT тощо).

Формалізація задачі керування сонячним колектором включає представлення математичної моделі об'єкта керування. Сонячний колектор розглядається як динамічна система з тепловими та гідравлічними характеристиками. Відповідно присутність впливових факторів є обов'язковою, а саме:

- сонячне випромінювання $G(t)$,
- температура повітря $T_a(t)$,
- швидкість вітру $V(t)$,
- теплові втрати Q_{loss} ,
- потік теплоносія $m'(t)$,
- ККД поглинання $\eta(t)$.

Відповідно тепловий баланс колектора описується наступним рівнянням [13]:

$$Q_{useful} = A \cdot G(t) \cdot \eta - U_L(T_{col} - T_a)$$

де A – площа колектора, U_L – коефіцієнт тепловтрат. Це рівняння є базовим для алгоритмів оптимізації.

Структурована постановка задачі керування включає мету, а це підтримка максимального теплового потоку до накопичувального бака при мінімальних втратах та забезпечення стабільної роботи системи. Вхідні параметри:

- $T_{col}(t)$ - температура колектора;
- $T_{tank}(t)$ - температура бака;
- $T_{air}(t)$ - температура навколишнього середовища;
- $p(t)$ – тиск в гідросистемі;
- $F(t)$ — витрата теплоносія.

В процесі роботи АСК стикається з керуючими впливи, а це: швидкість насоса; положення клапанів; перемикання контурів; запуск резервного нагрівача. Що в свою чергу призводить до обмеження керування при наступних умовах, а саме: температура не повинна перевищувати 95–140°C (залежно від типу колектора); тиск не вище межі безпеки; недопущення негативних температур теплоносія.

Узагальнені вимоги до розробки АСК сонячним колектором складаються з функціональних умов (точне вимірювання ключових параметрів, адаптивне керування за умов зміни погоди, інтеграція із суміжними системами), технічних умов (сумісність із насосами та клапанами різних типів, робота в температурному діапазоні -20...+90°C, захист від збоїв живлення), експлуатаційних умов (простота обслуговування, можливість дистанційного доступу), і енергетичних умов (мінімізація споживання електроенергії насосами, зменшення навантаження на котли).

Розробка автоматизованої системи керування сонячним колектором є актуальною задачею сучасної енергетики, яка відповідає ключовим вимогам енергоефективності, надійності та автономності інженерних систем. В умовах нестабільних ринкових цін на енергоносії, зростаючого попиту на «зелену» енергетику та збільшення вимог до екологічності теплотехнічних рішень, автоматизація процесу експлуатації геліоколекторів є необхідною для забезпечення їх максимальної продуктивності.

На основі аналізу умов експлуатації сформульовано комплексну постановку задачі, що містить вимоги до апаратної архітектури, алгоритмів керування, режимів безпеки та принципів інтеграції з іншими джерелами тепла. Створення такої системи дозволить ефективно використовувати потенціал сонячної енергії, оптимізувати роботу нагрівальних контурів, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільну роботу теплотехнічного обладнання протягом багатьох років.

2.2 Розробка структурної схеми та функціональних вузлів автоматизованої системи керування сонячним колектором

Сонячні колектори широко застосовуються в галузях, де необхідне отримання гарячої води з мінімальними енергозатратами. У мийках самообслуговування нагріта сонячною енергією вода дозволяє суттєво скоротити експлуатаційні витрати, знизити навантаження на основний бойлер, продовжити ресурс підігрівального обладнання та підвищити загальну економічну ефективність.

Однак ефективна робота сонячного колектора нерозривно пов'язана з правильним автоматизованим керуванням: підтриманням температури, циркуляцією теплоносія, захистом від перегріву, замерзання, зворотного потоку, а також інтеграцією з обладнанням мийки. Це й зумовлює необхідність створення автоматизованої системи керування (АСК), яка забезпечує стабільну роботу колектора незалежно від погодних умов і режимів використання. Загальна структура автоматизованої системи керування сонячним колектором представлена на рисунку 2.1 [14, 15].

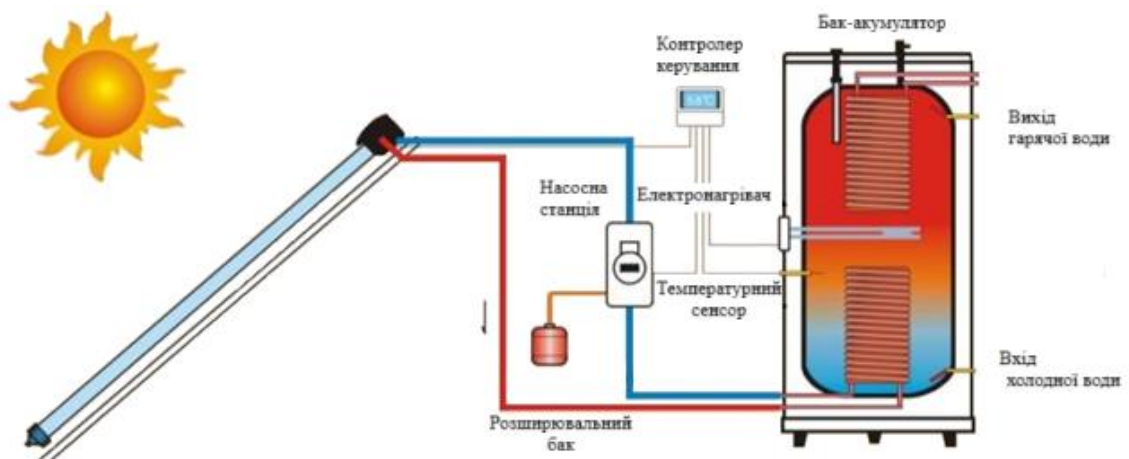


Рисунок 2.1 - Загальна структура автоматизованої системи керування сонячним колектором

Сонячна водонагрівальна установка (СВУ) складається з сонячного колектора та теплообмінника-акумулятора. Через сонячний колектор

циркулює теплоносієм (спеціальний антифриз). Теплоносієм нагрівається в сонячному колекторі енергією сонця і потім віддає теплову енергію воді через теплообмінник, (звичайно вмонтований в бак-акумулятор, але може бути і окремим). У баку-акумуляторі зберігається гаряча вода до моменту використання, тому він повинен мати хорошу теплоізоляцію. У першому контурі, де розташований сонячний колектор, може використовуватись природна або примусова циркуляція теплоносія. У бак-акумулятор може встановлюватись електричний нагрівач-дублер. У разі зниження температури в баку-акумуляторі нижче встановленої (тривала похмура погода або невелика кількість годин сонячного сяйва взимку) нагрівач-дублер автоматично вмикається і догріває воду до заданої температури. Дуже часто сонячні нагрівачі використовують спільно з іншими джерелами тепла – газовими, рідкопаливними, пелетними котлами або бойлерами.

Для оцінки ресурсу сонячної енергії, що приходить на одиницю поверхні, використовуються різні показники. Зазвичай використовується значення середньорічної, середньомісячної та добової кількості енергії, яка вимірюється в кВт*год/м². Також часто використовується так звана «кількість пікових годинників» сонячного сяйва за період - це наведене значення, зазвичай виходить розподілом приходу енергії за період на 1000 Вт/м². Цей параметр зручно використовувати, оскільки зазвичай всі параметри сонячних батарей та сонячних колекторів вказуються саме за цієї пікової освітленості.

Практична задача, що стоїть перед розробниками різного виду сонячних установок, полягає в тому, щоб найбільш ефективно зібрати цей потік енергії і перетворити його в потрібний вид енергії (теплоту, електроенергію) при найменших витратах на установку. Найпростішим і найдешевшим способом використання сонячної енергії є нагрівання побутової води в так званих плоских сонячних колекторах. Приклад найпростішої установки сонячного колектора наведено на рисунку 2.2.

Завдання такого сонячного колектора максимальний нагрів води у баку-акумуляторі.

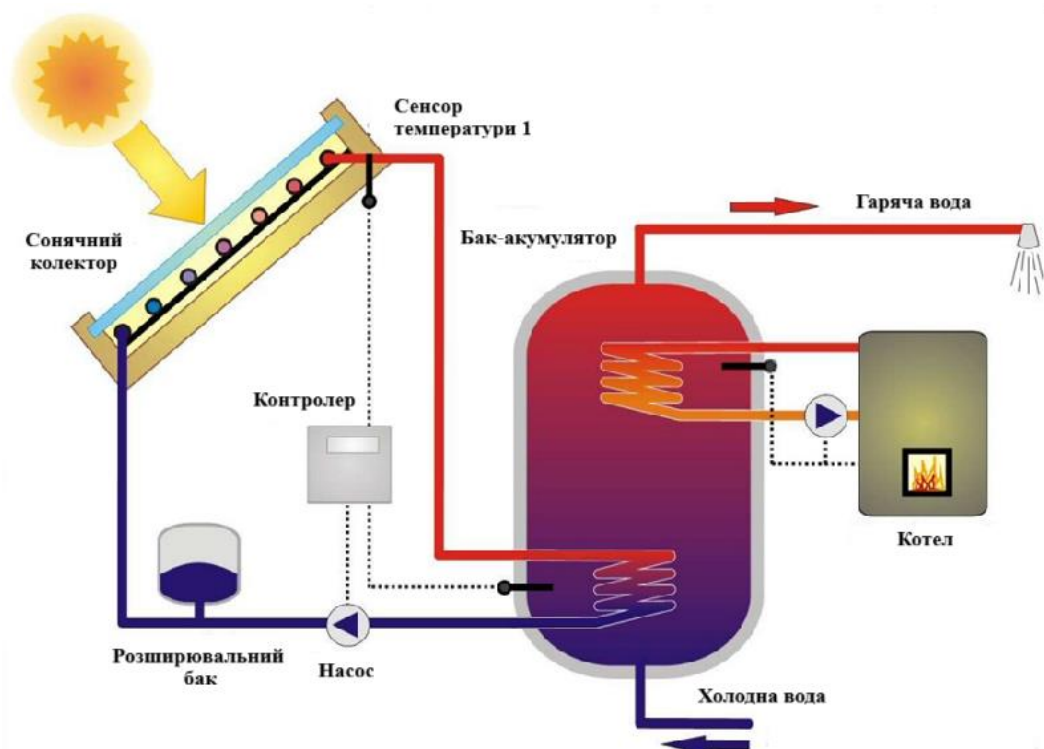


Рисунок 2.2 – Найпростіша установка сонячного колектора

Сонячні колектори різного типу дозволяють отримати теплову енергію, яка в першу чергу використовується для приготування гарячої води, що особливо актуально в літній період, коли спостерігається максимальна сонячна активність і максимальне споживання гарячої води [15].

Крім цього в окремих випадках при побудові комбінованих котельень тепло від сонячних колекторів частково можна використовувати в різних системах опалення, наприклад, при роботі котельної установки в перехідні періоди року. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити ефективність котельної установки загалом.

Загальний підхід до побудови структурної схеми АСК сонячного колектора включає поетапну розробку усіх функціональних вузлів системи. Автоматизована система керування складається з кількох логічно пов'язаних рівнів це: вимірювальний рівень, аналітично-регуляторний рівень, виконавчий рівень, інтерфейсно-комунікаційний рівень, енергетичний рівень.

Вимірювальний рівень обумовлений наявністю сенсорів температури, тиску, рівня, витрати, сонячної інсоляції, протоку, захисних сенсорів.

Аналітично-регуляторний рівень включає у свою структуру центральний контролер, модуль логічної обробки сигналів, алгоритмічні модулі (ПД-регулювання, порогові модулі, сценарне керування).

Виконавчий рівень наявний у своєму розпорядженні – насос циркуляції, електромагнітні клапани, змішувальні клапани, дросельні механізми, запірна арматура.

Інтерфейсно-комунікаційний рівень відповідає інформаційно-аналітичне інформування користувачів АСК і включає ряд пристроїв: дисплей, НМІ-панель, система віддаленого моніторингу (Wi-Fi, Ethernet, GSM), аварійна сигналізація.

Енергетичний рівень включає всі наявні пристрої і блоки живлення, запобіжники, контролери захисту, перетворювачі.

Структурна схема АСК сонячним колектором може бути представлена як взаємодія програмно-апаратних вузлів за засобів автоматизації (рисунок 2.3) [16]:

- сонячний колектор;
- теплообмінний контур із теплоносієм;
- циркуляційний насос;
- бак-акумулятор гарячої води;
- контролер управління (ПЛК або мікроконтролер);
- датчики (температури, тиску, протоку, рівня);
- електроклапани та механічна арматура;
- система захисту та сигналізації;
- інтерфейс користувача (НМІ-панель).

Опис функціональних вузлів автоматизованої системи керування – принцип роботи АСК сонячного колектора закладений в структурну схему рисунка 2.3. Сонячний колектор як теплоенергетичний об'єкт і відповідає усім міжнародним нормам за рахунок того, що для проектування

використовуються спеціалізоване обладнання. Сонячний колектор перетворює сонячну енергію на теплову, яка передається теплоносію (вода або антифриз) [17].

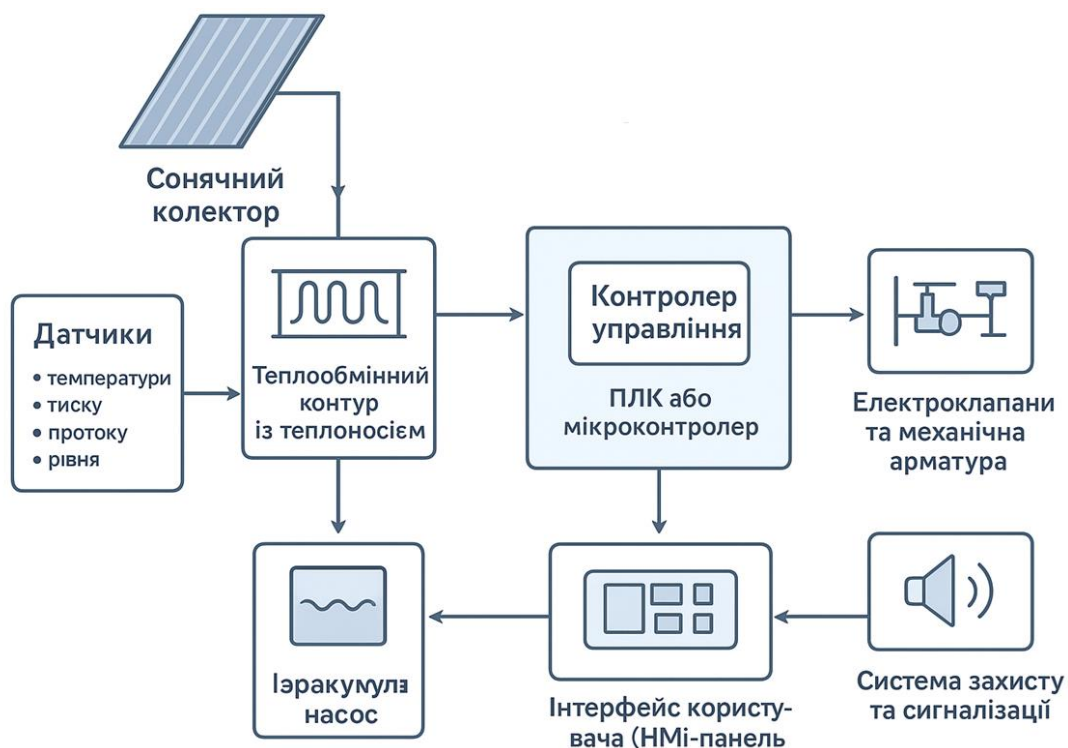


Рисунок 2.3 – Структура запропонованої АСК сонячного колектора мийки самообслуговування

У системах мийок самообслуговування застосовують зазвичай вакуумні трубчасті колектори у яких висока ефективність цілий рік по відношенню до плоских сонячних колекторів, що дешевші і використовуються в помірних умовах. АСК повинна враховувати їх фізичні властивості, а саме:

- інерційність теплоаккумуляційних поверхонь;
- нелінійність тепловіддачі залежно від сонячної інсоляції;
- можливість перегріву (110–150°C);
- ризик замерзання теплоносія;
- ризик зворотного теплового потоку.

Це визначає потребу в точному контролі параметрів АСК для ефективної роботи сонячного колектора і теплогенеруючої установки загалом.

Сенсори та сенсорні вузли є основним джерелом інформації для АСК. У таких системах використовуються сенсори температури (DS18B20, PT100/1000, NTC-термістори), які вимірюють температуру колектора, бака, подачі та зворотки. Сенсори тиску вимірюють і контролюють надлишковий тиск у контурі, сигналізують про можливість аварії. Сенсори потоку фіксують факт циркуляції теплоносія в первинному контурі системи і дозволяють контролеру відключати насос при блокуванні потоку. Сенсори рівня у баку запобігають роботі системи “всуху”. Сенсори інсоляції допомагають контролеру прогнозувати зміну теплової потужності.

Функціональне призначення сенсорних вузлів це в першу чергу забезпечення зворотного зв'язку для контролера і формування сигнальної інформації для реалізації алгоритмів захисту, а також автоматична адаптація системи до погодних умов, що підвищує точність регулювання.

2.2.1 Вибір та обґрунтування центрального модуля керування та периферійних пристроїв АСК

Контролер і модулі логічного керування є центральними і невід'ємними функціональними блоками АСК. Контролер – центральний вузол АСК.

Головний контролер призначений для контролю температури в сонячному колекторі та резервуарі-теплообміннику, а також для вибору залежно від величини цих температур оптимального режиму роботи системи протягом доби. У цьому контролер регулює потік теплоносія через теплообмінник, визначає напрям подачі тепла. У нічний час автоматика системи забезпечує мінімально необхідне залучення додаткової енергії підтримки заданої температури всередині приміщення. Система має малу інерційність, швидкий вихід на робочий режим і дозволяє забезпечити ефективну роботу установки.

Зазвичай при проектування АСК використовують перевірені контролери та контролерні модулі (ПЛК) відомих виробників (Siemens LOGO, Zelio, ОВЕН ПЛК) (рисунок 2.4). Для більш простіших АСК використовують мікроконтролерні плати (Arduino, ESP32, STM32). Інтелектуальні контролери геліосистем (Resol, WDC, SR series) застосовують на бюджетних варіантах сонячних колекторів для приватних домогосподарств [18].



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд спеціалізованого ПЛК Siemens LOGO

Основними завдання контролера у АСК сонячного колектора є збір інформації з сенсорів в режимі реального часу, цифрова/аналогова обробка та прийняття рішень (запуск/зупинка насоса, відкриття/закриття електроклапанів, перемикання контурів, захисні алгоритми у разі перегріву чи відсутності циркуляції), реалізація алгоритмів регулювання (ПД-регулювання температури, порогове регулювання (on/off), адаптивне керування за інсоляцією), моніторинг стану системи (локально через дисплей, віддалено через WI-FI, GSM або Ethernet), реєстрація аварій та подій (перегрів, замерзання, гідравлічні удари, падіння тиску), захисні дії (вимкнення насоса, відкривання аварійного клапана, відключення нагрівача бака).

Циркуляційний насос в загальній системі забезпечує рух теплоносія між колектором та баком-акумулятором (рисунок 2.5). До основних функцій циркуляційного насоса можна віднести:

- забезпечення безперервної циркуляції;

- контроль різниці температур між колектором та баком;
- підтримка теплового балансу;
- відведення надлишкового тепла.



Рисунок 2.5 – Циркуляційний насос АСК сонячного колектора

Засоби автоматизації, що взаємодіють з насосом, тобто підтримують його правельне функціонування в різних режимах роботи це є: твердотільні реле (SSR); контактори; частотні перетворювачі (для плавного регулювання); автоматичні вимикачі та термозахисти.

Контролер подає сигнал на ввімкнення насоса лише тоді, коли температура в колекторі на 5–10°C вища за температуру бака, тиск першому контурі у нормі, присутній протік теплоносія [19, 20].

Електромагнітні та змішувальні клапани використовуються у автоматизованій системі для якісного управління потоками. У сонячному колекторі застосовують електромагнітні клапани (2- та 3-ходові), змішувальні термостатичні клапани, зворотні клапани та розподільні клапани (рисунок 2.5 а) і б)). Основним призначенням клапанів різного типу є: захист від перегріву – перехід теплоносія в захисний контур; розподіл потоків при роботі з бойлером та гідрофорним контуром; керування напрямом теплоносія (основна лінія – байпас); захист від зворотного руху рідини; підтримання заданої температури води для мийки (наприклад, 40–50°C).



Рисунок 2.6 – Різновиди клапанів АСК сонячним колектором: а) – змішувальний клапан, б) – пропускний електроклапан

Бак-акумулятор гарячої води призначений для накопичення теплової енергії (води) і нагрівання проточної води, яка вже даліше використовується на призначенням (рисунок 2.7). АСК взаємодіє з баком таким чином, що контролює температуру в різних його зонах та перемикає систему нагріву між колектором і бойлером, що запобігає перегріву керуючи електричним нагрівачем (ТЕНом). Часто використовується багатозонний температурний контроль (верх/низ/середина).



Рисунок 2.7 – Бак-акумулятор теплової енергії для АСК сонячного колектора

Інтерфейс користувача та система моніторингу представлена у вигляді дисплея чи монітора на якому відображається стан роботи АСК, проводиться налаштування основних параметрів, діагностування та керування всією системою. До складу даного модуля входять [21]:

- LCD-дисплей або сенсорна НМІ-панель;
- світлодіодна індикація стану;
- дистанційний веб-інтерфейс або мобільний додаток.

Основними функціями інтерфейсного модуля є:

- перегляд температур, тиску, стану насосів і клапанів;
- журнал подій;
- встановлення параметрів (граничні температури, режими роботи);
- дистанційне керування системою;
- отримання аварійних повідомлень.

2.2.2 Алгоритм роботи АСК та взаємодія сонячного колектора з мийкою самообслуговування

Алгоритм роботи автоматизованої системи керування сонячним колектором багатоетапний структурно складний (рисунок 2.8). Система працює за принципом динамічного керування зі зворотним зв'язком та включає послідовність етапів роботи функціональних модулів.

На етапі вимірювання контролер отримує інформацію від сенсорів (температура в колекторі, температура у баку, тиск, протік, рівень, інсоляція). Після йде етап опрацювання даних або логічне рішення (контролер порівнює $T(\text{колектор}) > T(\text{бак})$, $\Delta T >$ встановленого порогу) після чого приймає рішення - запустити насос, відкрити клапан або перейти в захисний режим.

Етап регулювання проводиться залежно від алгоритму насос працює на постійній швидкості або частотно регулюється або циклічно вмикається/вимикається [22].

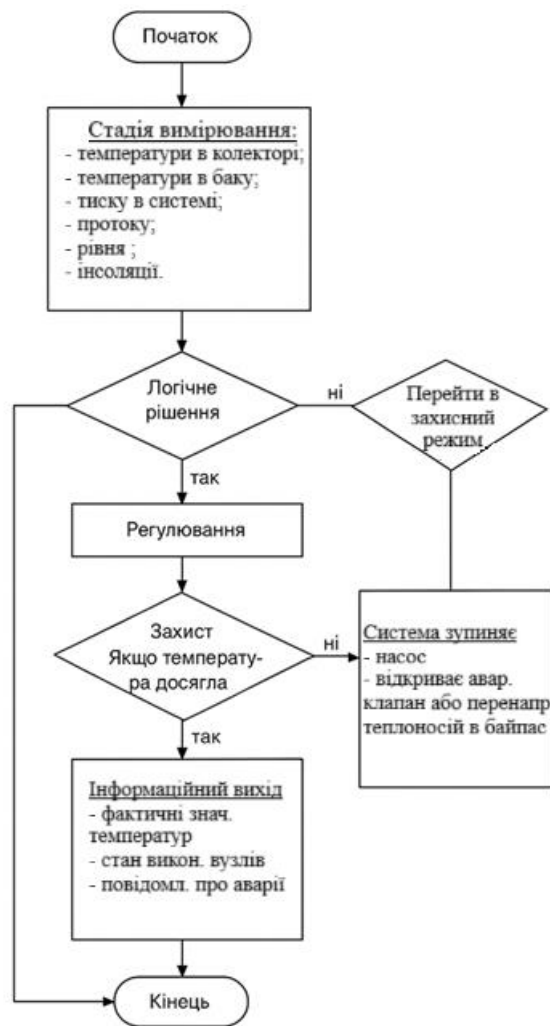


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритму роботи АСК сонячного колектора

Захист спрацьовує якщо температура досягла критичних значень система зупиняє насос, відкриває аварійний клапан або перенаправляє теплоносій у байпас і подає сигнал про перегрів. Інформаційний вихід задіюється для того щоб на дисплей або в мережу вивести:

- фактичні значення температур;
- стан виконавчих вузлів;
- повідомлення про аварії.

Взаємодія АСК сонячного колектора з мийкою самообслуговування відбувається по внутрішніх каналах зв'язку. У системі мийки гаряча вода повинна подаватися стабільно, без перепадів температури. АСК забезпечує подачу нагрітої води в контури мийки, проводить перемикання між сонячним

нагрівом і підігрівом бойлером і в свою чергу захищає обладнання мийки від перегріву (не більше 60°C). Також система проводить автоматичне відключення сонячного контуру вночі і стабілізує температури під час пікового навантаження.

Розробка структурної схеми та функціональних вузлів автоматизованої системи керування сонячним колектором є фундаментальним етапом створення ефективної системи гарячого водопостачання мийки самообслуговування.

Відповідно АСК забезпечує основні вимоги і потреби локації чи станції мийки самообслуговування, що в свою чергу дає:

- енергетичну економію;
- точне регулювання температури;
- захист обладнання;
- безперервну роботу всіх технологічних контурів;
- гнучку адаптацію до погодних умов;
- можливість дистанційного контролю та керування.

Завдяки такій системі сонячний колектор працює максимально ефективно, підвищуючи рентабельність та надійність роботи мийки самообслуговування.

3. ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

3.1 Розробка аналітичного методу ідентифікації низькочастотних об'єктів

Завдання ідентифікації динамічних об'єктів за експериментальними даними є одним із основних завдань сучасної теорії автоматичного управління. Ідентифікація є обов'язковим елементом та найбільш складною стадією процесу вирішення прикладних завдань. Необхідність оптимізації процесу вирішення практичних проблем шляхом раціональної ідентифікації стимулює прогрес теорії у класичному напрямі. У третьому розділі представлений метод ідентифікації об'єктів за їх частотними характеристиками та розгінними кривими. Виконано оцінку похибки ідентифікації шляхом порівняння характеристик моделі та реального об'єкта, а також з результатом ідентифікації методом Сімою.

У даному розділі представлений опис фізичної мотивації, математичної моделі, вибору структури ідентифікації, алгоритм оцінки параметрів, процедуру валідації, вимоги до апаратури та практичну інтеграцію в контролер ПЛК або мікроконтролер. Мета — отримати надійну, робастну і достатньо просто реалізовану процедуру для діагностики, оцінки стану та прогнозування поведінки низькочастотних теплових об'єктів (колектор + бак) у режимі експлуатації.

Однією з основних задач сучасної теорії автоматичного управління є задача ідентифікації, без вирішення якої неможливо виконати синтез алгоритмів керування динамічними об'єктами. Ідентифікація є обов'язковим елементом та найбільш складною стадією процесу вирішення прикладних завдань управління. Постійна необхідність в оптимізації процесу вирішення практичних проблем шляхом раціональної ідентифікації стимулює прогрес теорії управління у класичному напрямку. У загальному вигляді завдання

ідентифікації полягає у визначенні оператора об'єкта, що перетворює вхідні дії у вихідні. Особливу цікавість представляє аналітична ідентифікація об'єкта за роботи АСК сонячного колектора.

Низькочастотні об'єкти — це системи, в яких характерні часи релаксації/перехідні часи значно більші (на порядки) за періоди вимірювань — наприклад теплові контури сонячного колектора і бака-акумулятора (часова константа годинного/декілька-годинного масштабу) [23].

У таких об'єктах динаміка дуже інертна, нелінійна (температурна залежність коефіцієнтів), вплив зовнішніх факторів (інсоляція, температура повітря) суттєвий і стохастичний.

Ідентифікація (виявлення параметрів моделі, а також визначення відхилень від еталонного режиму) дозволяє: оптимізувати режим роботи (максимум корисного тепловиділення), виявляти деградацію (запливи, втрата герметичності, засмічення), планувати сервіс і попереджувати аварії.

Для АСК сонячного колектора мийки самообслуговування критично виявляти зниження продуктивності колектора чи розлад обміну тепла заздалегідь, щоб зменшити фінансові втрати й уникнути простоїв.

Отже завдання — розробити аналітичний метод ідентифікації, який дає надійні оцінки параметрів і змін у режимі реального часу або з невеликою затримкою, враховуючи особливості низькочастотної (теплової) динаміки.

Як правило прийнята в теорії ідентифікації процедура може бути представлена наступною структурною схемою, що показаної на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Структурна схема процедури ідентифікації

Вибір структури моделі об'єкта, що налаштовується, може бути виконаний двома способами:

- ідентифікацією об'єкта виконуваної перед початком процедури адаптації;
- використанням рекомендацій досвідчених експертів, обираючи при цьому модель об'єкта у вигляді кількох однакових інерційних ланок та ланки запізнення.

Число параметрів, що підлягають оцінці, в цьому випадку виявляється рівним не двом, а чотирьом i , отже, оцінити всі параметри моделі, знаючи тільки ступінь загасання i і період коливань перехідної характеристики, виявиться неможливим [24].

Перш за все потрібно відзначити, що останнім часом не часто зустрічаються роботи, пов'язані з частотними методами аналізу та синтезу систем автоматичного управління, хоча доведено зв'язок між частотними характеристиками та показниками процесу управління системи у часовій області. Очевидно, це пояснюється тим, що багато вчених звернули свою увагу на процеси управління стохастичного характеру. Хоча окремі технологічні процеси, як наприклад, процеси сушіння, абсорбції, перегонки та ректифікації, процеси в парових котлах можуть бути досліджені частотними методами.

У даному розділі представлено спробу використовувати для ідентифікації процесу нагрівання тимчасову та частотну характеристики об'єкта ідентифікації (OI). При цьому запропонований метод може застосовуватися для ідентифікації промислових об'єктів з розгінними характеристиками, що повільно змінюються на початковій ділянці та функціонують у відсутність високочастотних перешкод. До таких об'єктів належать перелічені вище технологічні процеси і, як показано, процес нагрівання в баку-акумуляторі сонячного колектора. Модель таких об'єктів може бути представлена передавальною функцією наступного виду

$$W_{oy}(s) = \frac{K_{oy}}{(Ts+1)^N (T_{oy}s+1)}, \quad (1)$$

де K_{oy} – коефіцієнт передачі, T_{oy} – найбільш значуща постійна часу, визначальна тривалість перехідного процесу $t_{п.п.}$, T та N – постійна часу та порядок інерційної ланки, що відповідає початковій ділянці розгінної характеристики об'єкта, що ідентифікується [25].

Метод ідентифікації застосований на АСК сонячного колектора. За результатами застосування, що дає розгінну характеристику об'єкта ідентифікації (ОІ), розраховуються наступні параметри: коефіцієнт передачі

$$K_{oy} = \frac{h_{уст} - h_{нач}}{U_{доп}}, \quad (2)$$

найбільш значуща постійна часу

$$T_{oy} = 1,25(t_2 - t_1), \quad (3)$$

час перехідного процесу $t_{п.п.}$.

У виразах (2) і (3) $h_{уст}$, $h_{нач}$ – встановлене і початкове значення вихідний змінної ОІ, $U_{доп}$ – допустима величина тестового сигналу управління на вході ОІ під час зняття розгінної характеристики, t_2 , t_1 – моменти часу, що відповідають значенням

$$h_1 = 0,7\Delta h + h_{нач},$$

$$h_2 = 0,3\Delta h + h_{нач},$$

$$\Delta h = h_{уст} - h_{нач}.$$

Для визначення значень T і N у виразі (1) пропонується зняти реакцію ОІ на гармонійний сигнал $u(t) = \sin \omega t$ із частотою

$$\omega_u \leq \frac{\pi}{t_{п.п.}} \quad (4)$$

і визначити $(2-3)t_{п.п.}$, тобто. після остаточного встановлення процесу на виході об'єкта, запізнення фазою $\Delta \varphi_y$ і величину амплітуди A_y його вихідного сигналу $y_{oy}(t)$.

Слід зазначити, що порушення умови (4) призведе до значних спотворень об'єктом ідентифікації гармонійного сигналу, аж до фазового зсуву на $-\pi$ та ослаблення амплітуди у 3 і більше разів. Пов'язано це з тим, що об'єкти, що підлягають цьому методу ідентифікації, належать до низькочастотних.

За знайденими значеннями $\Delta\phi_y$ та A_y складається система алгебраїчних рівнянь для модуля та фази комплексного коефіцієнта передачі $W_{oy}(s)|_{s=j\omega}$, до якої входять дві невідомі величини: постійна часу інерційної ланки T і кількість цих ланок N [26]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_{oy}}{\left(\sqrt{\omega^2 T_{oy}^2 + 1} \cdot \left(\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}\right)^N\right)} &= A_y \\ -\arctg\omega T_{oy} - N \cdot \arctg\omega T &= \Delta\phi_y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Система рівнянь (5) дозволяє після підстановки до неї знайдених вище значень $\Delta\phi_y$ та A_y визначити величини T та N .

3.2 Моделювання методів ідентифікації об'єктів нагріву і їх порівняння

Для прикладу ідентифікація параметрів процесу нагрівання бак-акумулятора на установці АСК сонячного колектора мийки самообслуговування, що дозволяє вивчати не тільки ідентифікацію, а й синтезувати алгоритми управління та дослідити процес нагрівання в SCADA-системі (рисунок 3.2). Нагрів здійснюється за допомогою керамічних нагрівальних елементів (максимальний струм нагріву 2.4 А).

Вибір підходу ідентифікації для низькочастотних об'єктів відбувається за певними критеріями. Критерії вибору методу є наступні [27]:

- робастність до шуму і повільної зміни сигналів;
- здатність відрізнити системні зміни (наприклад деградація) від випадкових коливань;
- реалізованість у ПЛК / edge-контролері (обмежені ресурси);

- можливість адаптивності (параметри можуть змінюватись сезонно).

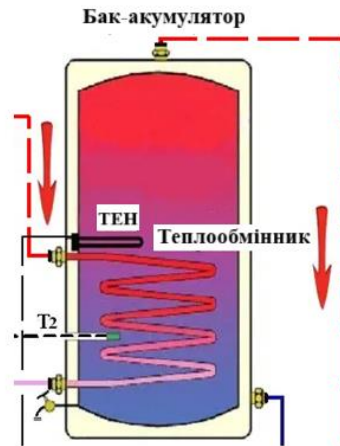


Рисунок 3.2 – Накопичувач теплової енергії з електричним догрівом води

На рисунку 3.3 представлений графік розгінної характеристики вказаного об'єкта з відповідними значеннями часу та температури. Як видно з графіка, температура процесу нагрівання, що розглядається, змінюється повільно і на початковій ділянці її зміна може бути змодельована ланкою транспортного запізнення або, як було сказано вище, набором інерційних ланок [28].

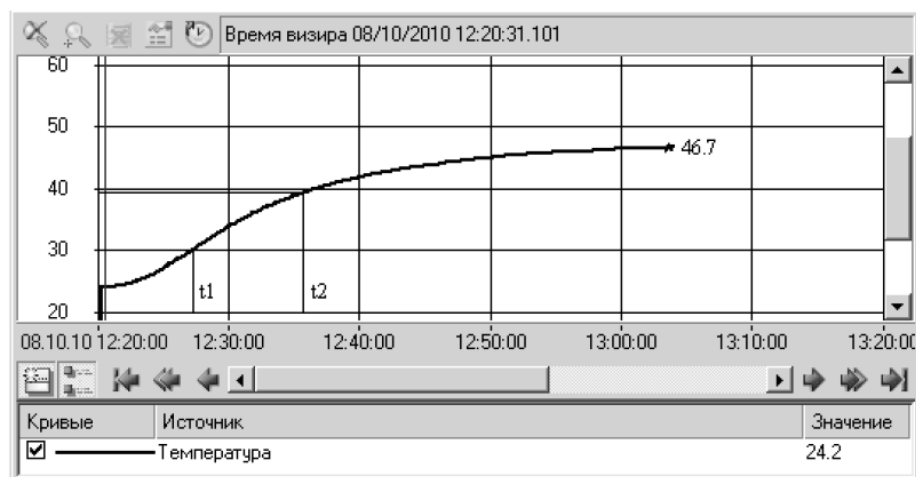


Рисунок 3.3 - Графік розгінної характеристики процесу нагрівання

По представленому графіку рисунка 3.3 та отриманими в SCADA-системі Trace Mode табличними значеннями температури від часу було визначено наступні параметри об'єкта, такі як:

- коефіцієнт передачі $K_{oy} = \frac{h_{yem} - h_{нач}}{U_{дон}} = \frac{(46,7 - 24,2) \text{ } ^\circ\text{C}}{2,4 \text{ A}} = 9,36 \text{ } ^\circ\text{C/A}$,
- найбільш значуща постійна (складова) часу $T_{oy} = 1,25(t_2 - t_1) = 670 \text{ с}$,
- час перехідного процесу $t_{п.п.} = 45 \text{ мин} = 2700 \text{ с}$,
- величина запізнення $\tau_{зан} = 0,5(3t_1 - t_2) = 170 \text{ с}$.

Зазначені значення дозволили записати передаточну функцію ОІ у вигляді

$$W_{oy}(s) = \frac{K_{oy}}{(T_{oy}s + 1)} e^{-s\tau_{зан}}$$

Оскільки в об'єкті, що розглядається, фізично неможливо організувати керуючий гармонійний сигнал, що досліджується параметри сигналу на виході ОІ були отримані в результаті дослідження моделі (6) у середовищі MATLAB.

На рисунку 3.4 представлений результат моделювання, за яким можна представити, як знаходяться запізнення по фазі $\Delta\varphi_y$ і величина амплітуди гармонійного сигналу A_y на виході ОІ, які в даному випадку виявилися рівними: $\Delta\varphi_y = t_{зан} \cdot \pi / 000 = -0,3685$, $A_y = 8,9629$. Підстановка цих значень у систему рівнянь (5) дозволила не тільки визначити постійну складову часу інерційної ланки T і кількість цих ланок $N: T = 41,079 \text{ с}$, $N = 4,14 \approx 4$, но й отримати передавальну функцію ОІ у вигляді

$$W_{oy}(s) = \frac{9,36}{(41,079 \cdot s + 1)^4 (670 \cdot s + 1)} \quad (7)$$

Для оцінки результатів ідентифікації виконано моделювання відповідно до отриманої передавальної функції (7), результат моделювання представлено на рисунку 3.5 [28, 29].

Як критерій порівняння експериментальної розгінної характеристики з характеристикою моделі об'єкта, отриманої в результаті ідентифікації, використаний критерій, запропонований у вище:

$$\rho(y, y_M) = t \in [0, t_{п.п.} \max] \cdot |y(t) - y_M(t)| \rightarrow \min.$$

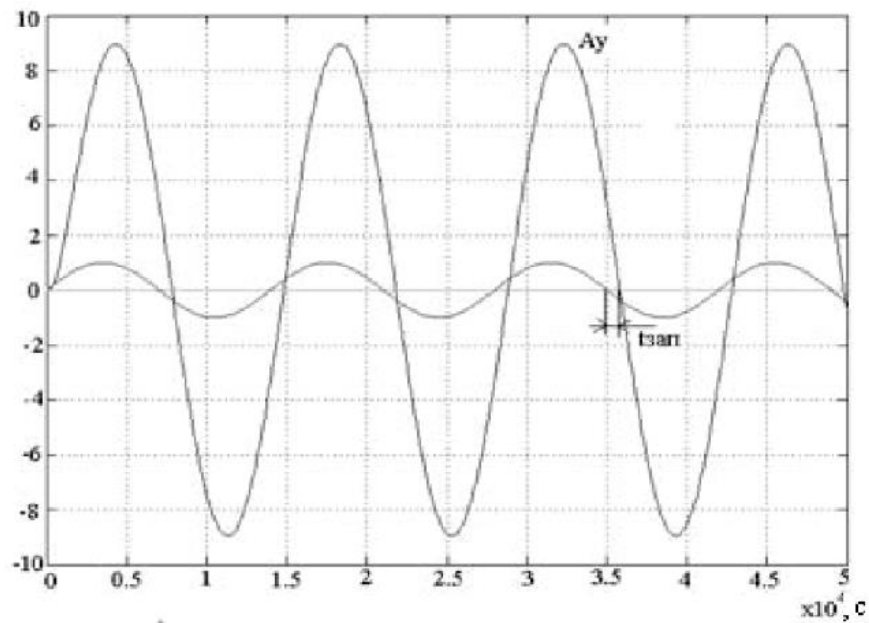


Рисунок 3.4 - Результат моделювання процесу нагрівання

Порівняння розгінних характеристик моделі (рисунок 3.5) та реального об'єкта (рисунок 3.3) показало, що максимальне значення критерію на інтервалі перехідного процесу не перевищує величини $1,1^{\circ}\text{C}$, що становить 2,4% по відношенню до діапазону зміни температури.

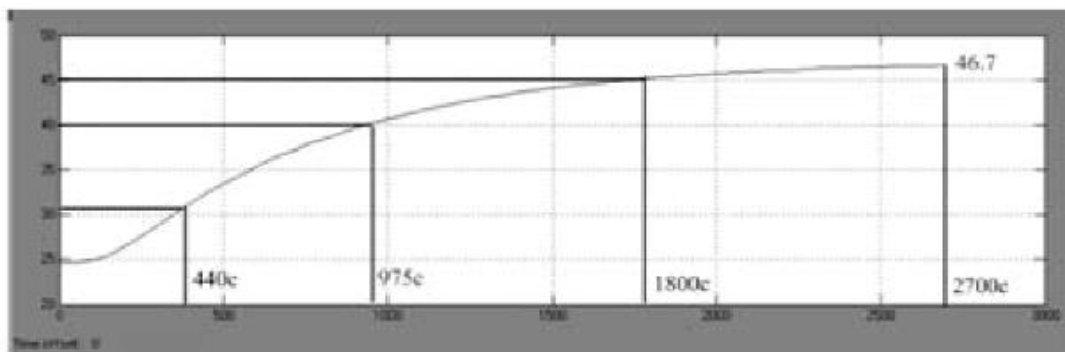


Рисунок 3.5 - Графік розгінної характеристики моделі ОІ (7)

Ідентифікація методом Сімою, який запропонований є у 1956 р., що дозволяє визначити параметри передавальної функції за кривою розгону об'єкта є, як зазначається в літературі, одним із найбільш ефективних та зручних для реалізації на ПК. Внаслідок застосування цього методу для ідентифікації об'єкта нагрівання отримали передавальну функцію

$$W_{oy}(s) = \frac{22,5}{34150000 \cdot s^3 + 179800 \cdot s^2 + 616,8 \cdot s + 1},$$

для якої графік розгінної характеристики представлений на рисунку 3.6.

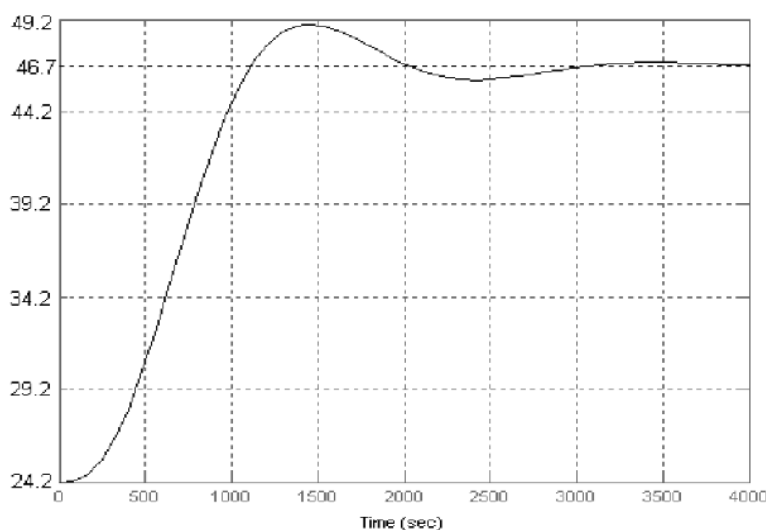


Рисунок 3.6 - Розгінна характеристика за методом Сімою

З порівняння показників, представлених на рисунках 3.3 та 3.6 за критерієм (8), отримано максимальне значення помилки ідентифікації 5°C , що склало 10,7% від діапазону зміни температури, тобто 4,5 рази більше, ніж забезпечує запропонований метод ідентифікації [29].

Отже можна відзначити, що в даному розділі ще раз підтверджено зв'язок між тимчасовими та частотними характеристиками, при використанні яких досить просто виконується параметрична ідентифікація низькочастотних об'єктів управління. Запропонований метод ідентифікації, по-перше, простий у використанні, по-друге, дає значно краще наближення до реальної розгінної характеристики ОІ порівняно з методом Сімою, по-третє, вирішує проблему, зазначену на початку цього розділу. Відповідно до класифікації методів ідентифікації, цей метод можна віднести до експериментально-аналітичних.

Розробка аналітичного методу ідентифікації низькочастотних об'єктів у контексті АСК сонячного колектора для мийки самообслуговування —

реалізована комбінація фізичної РС-моделі і рекурсивних оцінювачів (RLS/EKF) з вбудованою статистичною детекцією змін — дозволяє:

- надійно оцінювати параметри динаміки у реальному часі;
- виявляти деградацію/дефекти на ранніх стадіях;
- забезпечувати адаптивне регулювання для підтримки продуктивності;
- зменшувати експлуатаційні ризики та економічні втрати.

Такий підхід поєднує інтерпретованість фізичної моделі (що важливо для технічного персоналу) та адаптивність сучасних алгоритмів, і є практично реалізовним у сучасних ПЛК/edge-системах, інтегрованих у АСК мийки.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на розробку та обґрунтування автоматизованої системи керування сонячним колектором для мийки самообслуговування, а також формування аналітичного методу ідентифікації низькочастотних теплотехнічних об'єктів. Проведена робота дозволила отримати нові результати, які мають як теоретичне, так і практичне значення.

У першому розділі здійснено огляд сучасних автоматизованих систем керування сонячними колекторами, визначено їхню загальну структуру, функціональні можливості та принципи взаємодії зі спорудами теплоспоживання. Було встановлено, що сучасні АСК орієнтовані на підвищення енергоефективності та надійності роботи сонячних теплових установок, забезпечення захисту від перегріву, оптимізацію роботи насосного обладнання та інтеграцію з іншими технологічними системами. Розглянуто різновиди структурних рішень — від простих двоточкових схем керування до багатоконтурних систем з адаптивними алгоритмами. Особливу увагу приділено доцільності використання сонячних колекторів у мийках самообслуговування, де потреба у гарячій воді є високою та нерівномірною. На основі аналізу підтверджено, що використання сонячної теплоти дозволяє істотно зменшити експлуатаційні витрати та підвищити енергоефективність роботи таких об'єктів.

У другому розділі виконано розробку автоматизованої системи керування сонячним колектором мийки самообслуговування. Обґрунтовано умови функціонування системи, визначено ключові вимоги до алгоритмів та обладнання, сформульовано задачу керування. Розроблено структурну схему АСК, яка включає центральний модуль керування, вимірювальні сенсори, виконавчі елементи та підсистему захисту. Проведено аналіз можливих апаратних рішень та обрано оптимальну конфігурацію на основі сучасних мікроконтролерних платформ, що забезпечують високу точність

регулювання та можливість інтеграції з цифровими сервісами моніторингу. Запропоновано алгоритм роботи системи, який враховує температурні градієнти між колектором і баком-акумулятором, сезонні умови, графік завантаженості автомийки та вимоги до захисту обладнання. Показано, що розроблений алгоритм забезпечує оптимальний баланс між енергоефективністю та надійністю.

У третьому розділі виконано оптимізацію методів ідентифікації динамічних об'єктів, характерних для теплотехнічних систем, зокрема низькочастотних контурів нагріву. Розроблено аналітичний метод ідентифікації, який дозволяє визначати параметри математичної моделі на основі експериментальних перехідних процесів та апроксимації їх відомими функціями. Запропонований метод забезпечує зменшення похибки ідентифікації порівняно зі стандартними підходами та дозволяє отримувати адекватні моделі для подальшої оптимізації алгоритмів керування. Проведено моделювання різних методів ідентифікації, виконано їх порівняння за критеріями точності, швидкодії та стійкості до шумів. Результати підтвердили переваги запропонованого аналітичного методу для застосування у системах автоматичного керування сонячними тепловими установками.

У результаті дослідження:

- обґрунтовано доцільність використання сонячних колекторів у мийках самообслуговування з точки зору енергоефективності та економічної вигоди;
- розроблено структурну й функціональну модель автоматизованої системи керування сонячним колектором;
- створено алгоритм роботи АСК, адаптований до реальних умов експлуатації;
- обрано та обґрунтовано апаратні компоненти системи, що забезпечують надійність та точність керування;

- розроблено аналітичний метод ідентифікації низькочастотних об'єктів та доведено його ефективність шляхом моделювання;

- підтверджено можливість практичного впровадження системи з очікуваним зменшенням енергоспоживання та підвищенням ресурсу обладнання.

Таким чином, магістерська робота вирішує актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності сонячних теплових систем у сфері автономних самообслуговування, забезпечує наукове обґрунтування вибору технічних рішень та пропонує практичні методи оптимізації алгоритмів керування. Отримані результати можуть бути використані як у подальших дослідженнях, так і при розробці промислових систем керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Н.М. Мхитарян. Гелиоэнергетика. – К.: Наукова думка, 2002. – 350 с.
2. Настанова з улаштування систем сонячного теплопостачання в будинках житлового і громадського призначення. ДСТУ-Н Б-В.2.5-43: 2010. –К., МінРегіонБуд, 2010.
3. Дрексель Р. Сооружение солнечных коллекторов для горячей воды. Практическое руководство / Р. Дрексель, Р. Гамисония. – WECF, 2010. – 28 с.
4. Степанова Н. Д. Економічний та екологічний аспекти теплопостачання на базі геліоустановок / Н. Д. Степанова, Т. І. Пилипенко // Вісник Хмельницького національного університету. - 2013. - №5. - С. 65 - 68.
5. 17. М.О. Дикий. Поновлювані джерела енергії. Київ: Вища школа, 1993.- 416 с.
6. Попель О.С. Порівняльний аналіз показників конструкцій сонячних колекторів зарубіжного і вітчизняного виробництва. Нові технічні рішення // Теплоенергетика. - 2006. - № 3. - С. 23-29.
7. Слесаренко І.В. Слесаренко І.Б. Дослідження процесів генерації теплоти в схемі сонячно-теплонасосної установки // Гірський інформаційно-аналітичний бюлетень. Окремий випуск № 4. Нафта і газ. - 2014. - С. 234-241.
Слесаренко В.В., Копилов В.В., Княжев В.В. Оцінка ефективності установок сонячної енергетики в системах теплопостачання // Вісник ДВО РАН. - 2010. - № 3. - С. 119-124.
8. Слесаренко В.В., Богданович Г.А., Жуків В.А., Слесаренко І.Б. Особливості застосування геліоустановок з тепловими насосами // Енергозбереження та водопідготовка. - 2011. - № 5. - С. 24-28.
9. Пона О.М. Підвищення ефективності комбінованої системи теплопостачання з геліюпокрівлею: дис.... канд. техн. наук. Львів, 2018. 201с.
10. Максимова Н.А. Енергозберігаючі системи на основі абсорбційних термотрансформаторів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.23.03. Макіївка, 2007. 19 с.

11. Гальчак В., Боярчук В. Альтернативні джерела енергії : навч. посіб. Львів : Арал, 2008. 135 с.
12. Voznyak O. Method of determining the efficiency of heliocollector in system with forced circulation of coolant / O. Voznyak, O. Pona, A. Eltman, S. Shapoval, N. Spodyniuk // Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 7-К: КНУБА, 2015. – с. 10-16.
13. Vožnyak O. Rise of use effectiveness of solar energy in annual solar systems / O. Vožnyak, S. Shapoval, O. Dacko // Budownictwo i inżynieria środowiska. – Rzeszow, 2009. – S. 91-98.
14. Voznyak O. Vplyv prúdenia vzduchu na energetickú účinnosť solárneho kolektora / O. Vožnyak, O. Pona, S. Shapoval, P. Kapalo // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2014. – № 3.– s. 14-15.
15. Julian Chen. Physics of Solar Energy// JOHN WILEY & SONS, INC. – New Jersey. – 2011. – P. 312.
16. Maczulak A. E. Renewable energy : Sources and Methods / Anne Maczulak. – NY : Infobase Publishing, 2010. – 206 p.
17. Mahmud M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, M.H. Ruslan. Review of solar air collectors with thermal storage units// Renewable and Sustainable Energy Reviews 15. – 2011. – Pp. 1476–1490.
18. Возняк О. Т. Combined solar collector / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона, І.І. Венгрин // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"].– Л. : В-во НУ «ЛП», 2014. – № 781. – С. 212-215.
19. Возняк О. Т. Вплив вітру на роботу сонячного колектора з гофрованим теплопоглиначем / О.Т. Возняк, О.М. Пона, С.П. Шаповал // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №18 (1061). С. 32-38.
20. Возняк О.Т. Вплив напрямку та швидкості повітряного потоку на роботу сонячного колектора без прозорого покриття / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал,

- О.М. Пона, І.І. Венгрин //Строительство и техногенная безопасность // Сборник научных трудов. – Симферополь. – 2014 – Выпуск № 50. С. 49-52.
21. Гальчак В. Альтернативні джерела енергії : навч. посіб. / В. Гальчак, В. Боярчук. – Л.: Арал, 2008. – 135 с.
22. Курдюков А.П. Синтез робастного Н ∞ -регулятора для управления энергетической котельной установкой / А.П. Курдюков, В.Н. Тимин // Управление большими системами. – 2009. – № 25. – С. 179–214.
23. Бунке О.С. Автоматизація процесів керування інерційними контурами котлоагрегата теплової електростанції з використанням методу динамічної корекції [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / О.С. Бунке – Київ, 2014. – 174 с.
24. Артюх С.Ф. Основы автоматизированных систем управления энергогенерирующими установками электростанций [Текст] / С. Ф. Артюх, М.А. Дуэль, И.Г. Шелепов – Х.: Знание, 1998. – 324 с.
25. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації в схемах. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
26. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник. / М.І. Клепач / Рівне: НУВГП, 2007. – 206 с.
27. Пальчевський Б.О. Автоматизація технологічних процесів. – Львів: Світ, 2007 – 392с. 5. Проць Я.І., Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Ляшук О.Л. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. - Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. - 344с.
28. М.М.Дранчук «Проектування систем автоматизації технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості» Навчальний посібник, - Івано-Франківськ, 2003.-941с.
29. М.С. Пушкар Проектування систем автоматизації: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.