

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

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

тема роботи:

*«Інтелектуальна підсистема керування позиціонуванням автономної
геліосистеми для енергоживлення житлового комплексу»*

Виконав ст. гр. АКІТР-24-2м	_____	Таран А. Ю.
Керівник	_____	Маринич І. А.
Нормоконтроль	_____	Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____	Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 15 » травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-2м Тарану Артуру Юрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Інтелектуальна підсистема керування
позиціонуванням автономної геліосистеми для енергоживлення
житлового комплексу»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 87с.,
додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (20 слайдів) в електронному та
друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Маринич І. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.03.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.06.25</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.08.25</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>15.10.25</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>20.11.25</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.25</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.25</i>

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ /Маринич А. А./

7. Запевнення: Я, Таран Артур Юрійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Таран А. Ю./

АНОТАЦІЯ

Таран А. Ю. Інтелектуальна підсистема керування позиціонуванням автономної геліосистеми для енергоживлення житлового комплексу : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 87 с.

Метою роботи є вивчення та розробка інтелектуальної автоматизованої системи керування як модуля автономної автоматизованої сонячної системи, спрямованої на оптимізацію положення робочої поверхні сонячного колектора з метою підвищення ефективності отримання теплового випромінювання.

У першому розділі проведено аналіз геліосистем для умов холодного клімату, визначено особливості їх роботи та вимоги до регулювання колектора. На основі дослідження сформовано концепцію інтегрованої автоматизованої системи управління, окреслено її структуру, принципи функціонування та необхідні параметри для подальшого моделювання й синтезу системи керування.

В другому розділі розроблено концепцію ІАСУ для керування кутом нахилу вакуумного сонячного колектора з метою підвищення ефективності перетворення сонячної енергії. Запропоновано моделі розрахунку прямої радіації та регулювання за годинним кутом Сонця, що використовуються для побудови імітаційної моделі системи отримання випромінювання та подальшого синтезу керування.

В третьому розділі представлено метод оптимізації процесу перетворення енергії геліосистемою з використанням алгоритмів нечіткого логічного виведення. Запропоновано інтелектуальний алгоритм, реалізований у середовищі Matlab Simulink, який забезпечує прогноз ефективності колектора в умовах випадкових теплових впливів.

АЛГОРИТМ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ОПТИМІЗАЦІЯ, СОНЯЧНИЙ КОЛЕКТОР; СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, MATLAB/SIMULINK

ANNOTATION

Taran A. Y. Intelligent Positioning Control Subsystem of an Autonomous Heliosystem for Power Supply of a Residential Complex : Master's Qualification Thesis : 174 – Automation, computer-integrated technologies, and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 87 p.

The aim of this work is to study and develop an intelligent automated control system as a module of an autonomous automated solar energy system, designed to optimize the position of the solar collector's working surface in order to increase the efficiency of capturing thermal radiation.

In the first chapter, an analysis of solar heating systems for cold-climate conditions is carried out, the specific features of their operation are identified, and the requirements for collector regulation are determined. Based on this study, a concept of an integrated automated control system is formulated, outlining its structure, operating principles, and the necessary parameters for further modeling and control system synthesis.

In the second chapter, a concept of the intelligent automated control system (IACS) for regulating the tilt angle of a vacuum solar collector is developed in order to increase the efficiency of solar energy conversion. Models for calculating direct radiation and controlling the system based on the solar hour angle are proposed. These models are used to build a simulation model of the radiation acquisition system and to further synthesize the control algorithm.

The third chapter presents a method for optimizing the energy conversion process of a solar system using fuzzy logic inference algorithms. An intelligent algorithm implemented in the Matlab Simulink environment is proposed, which provides a forecast of the collector's efficiency under random thermal influences.

ALGORITHM, FUZZY LOGIC, OPTIMIZATION, SOLAR COLLECTOR;
CONTROL SYSTEM, THERMAL RADIATION, MATLAB/SIMULINK

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	12
1.1 Вивчення можливості застосування сонячних технологій на територіях з холодним кліматом	12
1.2 Вибір підходу до реалізації системи регулювання робочої поверхні колектора	16
1.3 Ідентифікація елементів геліосистеми	18
1.4 Розробка концепції ІАСУ	21
1.5 Визначення необхідних параметрів абстрактної геліосистеми....	24
Висновки за розділом.....	28
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ІАСУ ГЕЛІОСИСТЕМИ.....	29
2.1 Розробка інтелектуального модуля управління у складі імітаційної моделі процесу одержання сукупного сонячного випромінювання.....	29
2.2 Розробка інтелектуального модуля управління у складі імітаційної моделі процесу одержання сукупного сонячного випромінювання.....	37
2.3 Розробка імітаційної моделі приходу прямої сонячної радіації всередині атмосфери.....	41
2.4 Розробка модуля розрахунку кута нахилу робочої поверхні сонячного колектора за годинним кутом схилення сонця.....	47
Висновки за розділом.....	52
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА	

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	54
3.1 Аналіз ефективності алгоритмів нечіткого логічного висновку Sugeno та Mamdani у задачах оптимізації автоматизованих систем стеження.....	54
3.2 Розробка алгоритму функціонування системи управління геліосистеми інтегрованої з ІАСУ.....	56
3.3 Розробка методу оптимізації положення робочої поверхні сонячного колектора.....	65
3.4 Розробка алгоритму прогнозуючого та оптимізуючого модуля.....	67
3.5 Реалізація прогнозуючого та оптимізуючого модуля.....	70
3.6 Реалізація інтелектуальної автоматизованої системи управління у складі розробленої імітаційної моделі.....	74
Висновки за розділом.....	81
ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСК – автоматизована система керування;
- ІАСУ – інтелектуальна автоматизована система управління;
- KL – коефіцієнт поглинання скла;
- ВП – вимірювальні пристрої;
- ІВ – імітаційна модель вимірювальних пристроїв;
- ІС – імітаційна модель прямого сонячного випромінювання;
- ІР/О – імітаційна модель дифузного / відбитого випромінювання;
- ПМ – прогнозуючий модуль;
- ОМ – оптимізуючий модуль;
- РУ – імітаційна модель зміни кута нахилу робочої поверхні колектора;
- ПУКб – пристрій керування бойлерною системою;
- ПКк – пристрій керування системою регулювання положення робочої поверхні колектора;
- ТЕН – трубчастий електронагрівач;
- Ф – кутовий коефіцієнт між напрямком випромінювання (від джерела) та прийнятною поверхнею;
- G – загальне випромінювання;
- UML – Class – формат подання інформаційної моделі об’єктно-орієнтованого підходу;
- SDL – формат подання алгоритму у вигляді блок-схеми з розширеним набором блоків.

ВСТУП

Світові тенденції стимулюють дослідження, спрямовані на розкриття техніко-економічного потенціалу сонячних технологій, що розширює географію їх застосування [1]. Однак більшість досягнень у частині ефективності елементів, безпосередньо задіяних у прийомі випромінювання, можуть бути повністю нівельовані низькоефективною підсистемою керування положенням поглинаючих поверхонь.

Вакуумні колектори придатні для отримання прямого, дифузного та відбитого сонячного випромінювання, і для розкриття їхнього потенціалу ефективності доцільно застосовувати системи екстремального регулювання. Оскільки, на відміну від детермінованого процесу надходження прямої сонячної радіації (на основі якого побудовано більшість актуальних автоматизованих систем регулювання робочих поверхонь сонячних колекторів), дифузне та відбите випромінювання можна класифікувати як стохастичний зовнішній вплив.

У дослідженнях доведено, що відсутність системи оптимізації положення поглинаючої поверхні не лише знижує показники номінальної ефективності геліосистеми, але й накладає обмеження при реалізації масиву сонячних колекторів, особливо в житлових районах із щільною забудовою.

Тому необхідна система екстремального регулювання, здатна коригувати положення центру поглинаючої поверхні, що включає вакуумні трубки з поглинаючими пластинами (ККД трубок до 80%) відносно найбільшого сукупного випромінювання, що, зокрема, підтверджується дослідженнями Fabio Moacir Hoffmann [1], Soteris A. Kalogirou [2].

Актуальність теми. Реалізація такої підсистеми можлива на базі інтелектуальної автоматизованої системи управління (ІАСУ), що дозволяє прогнозувати та оцінювати вплив на перетворювач усього доступного випромінювання (включаючи пряме, дифузне та відбите сонячне випромінювання) і синтезувати закон управління з урахуванням співвідношення

кількості поглиненої енергії до кількості витраченої енергії під час виконання регулювання.

Додатковим стимулом при розробці ІАСУ є можливість покращити на основі отриманих результатів уже впроваджені в експлуатацію сонячні трекери (слідкуючі системи та системи програмного регулювання), що дозволить скоротити термін окупності проектів із введення в експлуатацію таких систем і підвищить їхню ефективність. Оскільки існуючі промислові зразки переважно орієнтовані на отримання прямого сонячного випромінювання, що не повною мірою розкриває потенціал ефективності сонячних колекторів у ранкові та вечірні години.

Виходячи з цього, пріоритетним завданням щодо підвищення ефективності сучасних геліосистем є розробка інтелектуальної автоматизованої системи управління, спрямованої на оптимізацію роботи систем регулювання положення робочої поверхні високоефективних сонячних колекторів.

Мета та завдання дослідження. На основі аналізу вітчизняної та зарубіжної літератури можна зробити певні висновки та сформулювати мету і завдання дослідження.

Метою роботи є вивчення та розробка інтелектуальної автоматизованої системи керування як модуля автономної автоматизованої сонячної системи, спрямованої на оптимізацію положення робочої поверхні сонячного колектора з метою підвищення ефективності отримання теплового випромінювання.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз основних складових геліосистеми;
- виконати ідентифікацію та аналіз основних елементів автоматизованої автономної сонячної системи та їх взаємодію;
- реалізувати метод оптимізації процесу отримання енергії сонячним колектором на основі алгоритмів нечіткого висновку;
- запропонувати інтелектуальний модуль для контролю положення робочої поверхні сонячного колектора на основі моделювання процесу

отримання повного сонячного випромінювання

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань були використані методи теорії нечіткої логіки, імітаційного моделювання, сучасної теорії управління, а також методів синтезу складних систем та їх аналізу.

Практична цінність. Отримані теоретичні результати можуть бути використані при розробці ІАСУ процесами перетворення електромагнітного випромінювання у тепло, засобами сучасних геліосистем.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Вивчення можливості застосування сонячних технологій на територіях з холодним кліматом

Застосування сонячних технологій слід досліджувати з урахуванням географічних, кліматичних та економічних факторів відповідної території. Ефективність різних систем відновлюваної енергетики вимагає іншого підходу до оцінки, але головним критерієм при виборі системи є доступність джерела.

Доступність джерела має бути безперервною або з чітко передбачуваними інтервалами і визначатися природними характеристиками території. У цьому сенсі найперспективнішими джерелами є потоки вітру та сонячна радіація.

Використання вітрового генератора для виробництва електроенергії рекомендується лише якщо середня швидкість вітру на землі перевищує 4 м/с, а перетворення в теплову енергію вимагає максимальної ефективності, що досягається при 9-12 м/с безперервного удару, тобто знижує потенціал застосування технології по всій Україні.

Використання сонячного колектора для перетворення тепла є ефективним у районі із середньою сонячною інсоляцією 3,5 кВт·год/м² на добу. Практика використання сонячних технологій найпоширеніша в регіонах із помірним кліматом, де промислові зразки вакуумних сонячних колекторів [5,6] з сегменту низьких цін достатні для реалізації економічно ефективного проєкту автономної системи опалення. Водночас, згідно з Global engagement -Areas of work - IEA, кількість сонячних годин у районах із холодним кліматом не поступається районам із помірним кліматом, а показник сонячної радіації вищий. Тобто, у деяких регіонах із холодним кліматом на 1 годину сонячного світла припадає більше енергії радіації, ніж у регіонах із помірним кліматом

Робоча поверхня колектора, що складається з вакуумних трубок типу «Heat pipe» [10] з пасивною циркуляцією охолоджуючої рідини, здатна працювати при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зокрема, при використанні пропіленгліколю як охолоджуючого - $\text{CH}_2(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_3$) і має ефективність 75% при перетворенні сонячного випромінювання в тепло [7]. Такі вакуумні сонячні колектори здатні ефективно функціонувати на більшій частині території, але для розкриття потенціалу колекторів необхідно враховувати особливості їхньої роботи в умовах, характерних для території експлуатації.

Вакуумні колектори підходять для отримання прямого, розсіяного та відбитого випромінювання від Сонця. За відсутності прямого випромінювання колектори здатні перетворювати теплову енергію під впливом дифузного та відбитого випромінювання. Враховуючи, що поселення характеризуються густою забудовою з середньо- та малоповерховими будівлями з розгалуженою інфраструктурою на плоскому даху (особливо на територіях промислових підприємств). Вільна площа даху, може використовуватися для встановлення вакуумних колекторних масивів. Така інфраструктура сприяє формуванню низки відбивних поверхонь, тобто потенційних джерел відбитого випромінювання, відбитого дифузного випромінювання та інших.

Орієнтація центру робочої поверхні колектора у напрямку найбільшого загального випромінювання підвищує його ефективність за умов обмеженого прямого випромінювання.

На рисунку 1.1 показано діаграму впливу типів випромінювання на приймальну поверхню колектора.

У роботі Solar Engineering of Thermal Processes [1] наведено розрахунок енергії, отриманої двома колекторами з ідентичною конфігурацією, які є частиною одного масиву. Водосховищні масиви побудовані секціями, з різними орієнтаціями (тобто з різними азимутальними та/або зенітними кутами). Це пов'язано з розташуванням території та інфраструктурою, доступною для встановлення колектора.

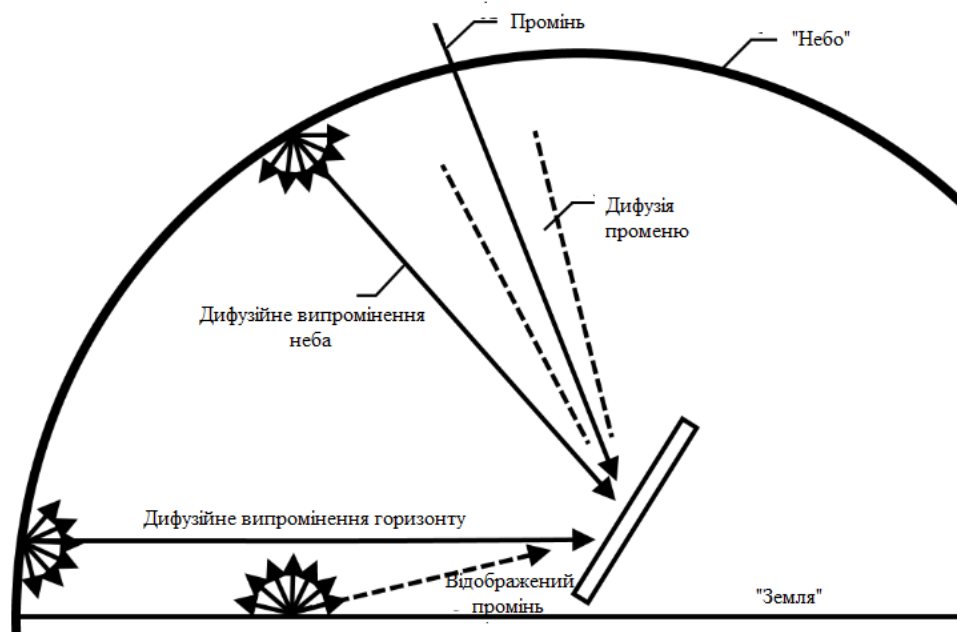


Рисунок 1.1 - Схема впливу типів випромінювання [1]

Ці розрахунки показують, наскільки велика різниця у виробництві енергії між двома однаковими колекторами, робочі поверхні яких однаково орієнтовані під зенітним кутом для прямого сонячного випромінювання, але з різними азимутальними кутами для орієнтації на дифузне та відбите випромінювання. Колектор S2 перетворює на 248% більше енергії, оскільки його робоча поверхня оптимально орієнтована на загальне випромінювання (пряме, розсіяне, відбите від землі).

І якщо для розрахунку надходження дифузного випромінювання можна використати середні значення коефіцієнтів, отриманих емпірично, то для розрахунку надходження випромінювання відбитого променю необхідно помножити інтенсивність струмового випромінювання на його суцільний кут (визначений у кожному експерименті) і косинус полярного кута. Отриманий потік випромінювання вимірюється значеннями того ж порядку, що й відбитий пучок, і тому, при обмеженому прямому випромінюванні від Сонця, відбитий промінь може бути джерелом найбільшого інфрачервоного випромінювання.

Щоб розкрити потенціал високоефективних вакуумних сонячних колекторів, недостатньо орієнтувати робочу поверхню лише в напрямку прямого

сонячного випромінювання, необхідно враховувати все доступне випромінювання, а оскільки дифузне випромінювання характеризується середніми значеннями, а процес формування відбитого променя класифікується як стохастичний, необхідно реалізувати систему екстремального регулювання положення поглинаючої поверхні колектора для орієнтування у напрямку найвищий загальний випромінювання (включаючи пряме, дифузне та відбите сонячне випромінювання).

Водночас у ранкові та вечірні години трекери з системами керування, які не враховують особливості впливу дифузного та відбитого випромінювання (системи керування відстеженням), не дозволяють розкрити потенціал ефективності [5] високоефективних сонячних колекторів. У роботі [6] запропоновано робочу поверхню з системою керування відстеження, яка забезпечує до 8 годин ефективної роботи при витратах енергії переміщення 0,018 Дж. У роботі [4] пропонується масив колекторів з автоматичним (програмним) регулюванням, такі системи найбільш ефективні в години активного прямого випромінювання, витрати додаткової енергії на регулювання мінімальні, оскільки вони враховуються під час початкового налаштування системи з детермінованим алгоритмом - колекторні масиви з програмним регулюванням ефективніші за стаціонарні, але не дозволяють розкрити повний потенціал високоефективних сонячних колекторів. У роботі [3] пропонується екстремальна система регулювання робочої поверхні колектора з урахуванням особливостей розташування, що дозволяє орієнтувати поверхню колектора на пряме та дифузне випромінювання. Такі системи керування забезпечують ефективне поглинання колекторного випромінювання, зокрема вранці та ввечері (світанок і захід сонця) з подібними енергетичними витратами на коригування положення, а також працюють ефективніше протягом дня завдяки функціональній здатності фокусуватися на загальному максимальному випромінюванні.

Отже, саме системи екстремального керування сприяють розкриттю потенціалу вакуумних колекторів, оскільки загальне випромінювання, серед

іншого, може включати відбиті промені (випромінювання, напрямок і довжину, що важко передбачити). Екстремальна система керування повинна передбачати вплив доступного випромінювання, оскільки при орієнтації у напрямку короточасного випромінювання (відбитого променя) енергоспоживання для регулювання буде недоцільним.

Для ефективного керування сучасними сонячними колекторами з системами керування робочою поверхнею потрібна інтелектуальна автоматизована система керування (ІАСУ) яка забезпечує екстремальне регулювання робочої поверхні у напрямку максимального загального теплового випромінювання серед усіх доступних джерел, з мінімальним додатковим енергоспоживанням для роботи актуаторів при регулюванні її положення. Розробка рішення в цій сфері підвищить ефективність сучасних сонячних систем, збільшуючи загальну кількість тепла в системі внаслідок взаємодії перетворювачів із доступним агрегованим випромінюванням.

1.2 Вибір підходу до реалізації системи регулювання робочої поверхні колектора

Сучасні системи регулювання робочої поверхні колектора інтегровані з САУ: слідкуючими системами, програмними регуляторами та системами екстремального регулювання [3,5,7]. На рисунку 1.2 представлені промислові зразки з різними системами регулювання.



а) слідкуючі системи регулювання; б) програмне регулювання; в) екстремальні системи регулювання

Рисунок 1.2 – Промислові зразки систем трекінгу

Підходи до реалізації систем регулювання положення робочої поверхні відносно напрямку випромінювання можна охарактеризувати за співвідношенням кількості витраченої енергії на виконання регулювання до кількості енергії, отриманої від випромінювання.

Слідкуючі системи актуалізують положення центру робочої поверхні відносно напрямку прямого випромінювання, регулювання виконується за часовим кутом Сонця і має добре співвідношення між витратами додаткової енергії та поглиненою енергією випромінювання (найпоширеніший підхід до реалізації систем трекінгу).

Недолік слідкуючих систем полягає в ігноруванні випромінювання, відмінного від прямого, тобто вони неефективні в години, коли пряме випромінювання обмежене.

Програмні системи регулювання найменше витрачають додаткову енергію (порівняно з іншими підходами), оскільки енергетичні витрати, пов'язані з регулюванням, враховуються на етапі проектування таких систем. Такі системи підходять для реалізації колекторних масивів на великому відкритому просторі. Недолік програмного регулювання полягає в тому, що воно не враховує поточного впливу випромінювання, а отже, не підходить для розкриття потенціалу вакуумних сонячних колекторів, здатних перетворювати енергію з будь-якого доступного випромінювання, яке складно врахувати на етапі проектування програмної системи регулювання.

Екстремальні системи регулювання проектуються з урахуванням особливостей локації, на якій планується експлуатувати колектор. Функціонал такої системи управління може включати параметри, що характеризують конкретні умови експлуатації (наприклад, такі системи можуть орієнтуватися в напрямку джерела найбільшого сукупного випромінювання). При цьому такі системи можуть значно підвищити кількість перетворюваної енергії, оскільки здатні адаптуватися до змін зовнішнього середовища.

До недоліків таких систем належить відносно висока складність проектування та ризик перевищення кількості енергії, витраченої на

регулювання, відносно отриманої енергії від випромінювання.

Робота спрямована на вирішення проблеми підвищення ефективності використання потенціалу сучасних вакуумних сонячних колекторів, інтегрованих із системами регулювання положення їхньої робочої поверхні в умовах експлуатації на територіях, де особливості розгорнутої інфраструктури суттєво впливають на параметри прямого, дифузного та відбитого випромінювання.

Сукупне випромінювання забезпечує найбільшу кількість енергії. Напрямок найбільшого сукупного випромінювання може бути основним критерієм управління в екстремальній системі регулювання.

Колектор із системою регулювання інтегрується з елементами передачі та зберігання перетвореної енергії. Для оцінки ефективності такого колектору необхідно врахувати показники, що характеризують усі елементи системи опалення.

1.3 Ідентифікація елементів геліосистеми

Сонячні колектори інтегруються з місцевими системами опалення бойлерного типу – геліосистемами [7,9,10,]. На рисунку 1.3 представлена схема типової геліосистеми.

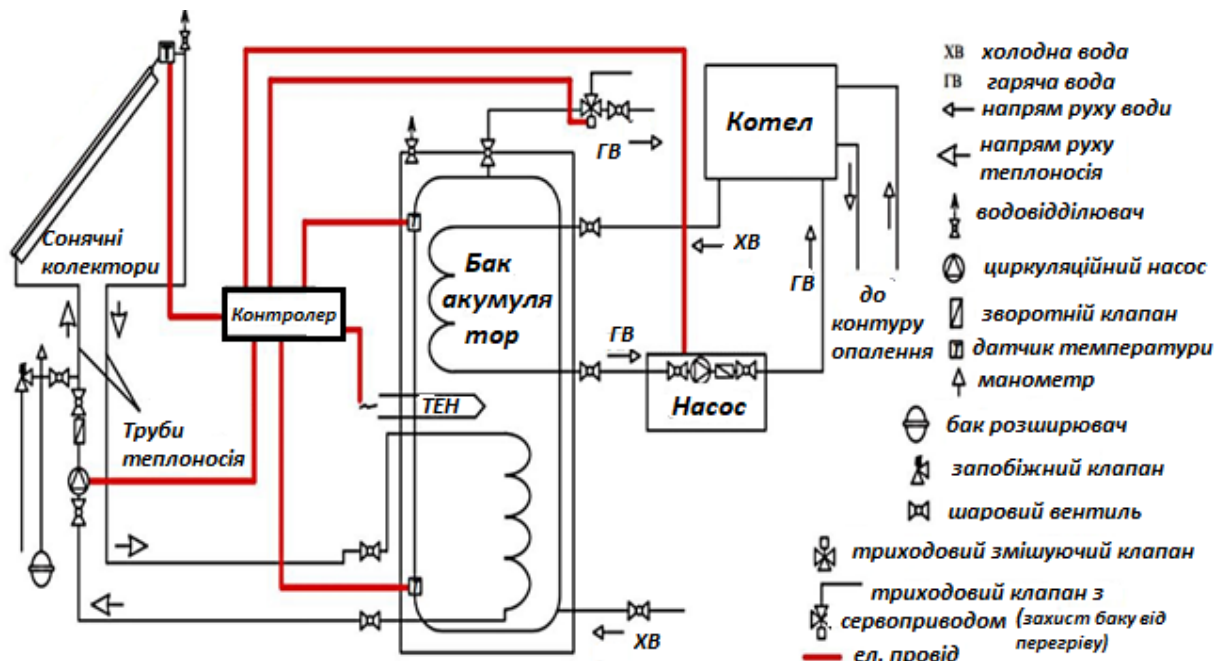


Рисунок 1.3 – Схема типової геліосистеми

Геліосистема забезпечує роботу з тепловою та/або електричною енергією від перетворювачів сонячного електромагнітного випромінювання – вакуумних сонячних колекторів і сонячних панелей відповідно.

Геліосистеми для холодних регіонів конфігуруються на основі стандартної системи опалення бойлерного типу. Відповідно, основним джерелом, що забезпечує нагрів води в системі, є котел, який вимикається, якщо масив колекторів забезпечує достатню температуру.

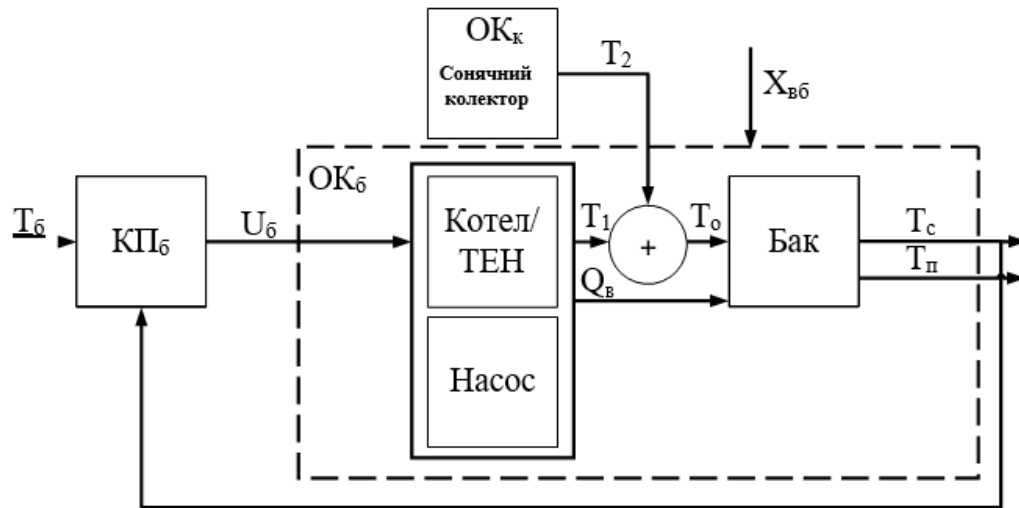
Також одним із основних елементів є бак-аккумулятор, що накопичує нагрітий теплоносієм для підтримання його температури в заданому діапазоні (якщо геліосистема оснащена сонячними панелями, додатковий нагрів теплоносія в баку здійснюється вбудованим ТЕНом).

Сучасна автономна автоматизована геліосистема оснащується контролером, який регулює роботу елементів системи з метою мінімізації використання енергії від котла.

Для визначення залежностей між елементами геліосистеми на рисунку 1.4 запропонована функціональна схема геліосистеми, здатної ефективно функціонувати на певній території.

Схема включає основні елементи автоматизованої автономної

геліосистеми та їх взаємодіючі параметри. Запропонована візуалізація – це схема системи автоматичного регулювання та управління, складена відповідно до функції [8], яку виконує система опалення бойлерного типу, інтегрована з сонячним колектором у конфігурації, придатній для експлуатації.



КПб - пристрій керування бойлерною системою; ОКб - об'єкт управління бойлерною системою; ОКк - об'єкт управління колектор

Рисунок 1.4 – Функціональна схема геліосистеми

На рисунку 1.4 прийняті наступні позначення: T_b – бажана температура ($^{\circ}\text{C}$), U_b – закон управління бойлерною системою опалення; T_1 – температура води, що виходить з котла ($^{\circ}\text{C}$); T_2 – температура води на виході з колектора ($^{\circ}\text{C}$); T_c – температура води, що виходить з бака ($^{\circ}\text{C}$); T_o – сумарна температура води ($^{\circ}\text{C}$); T_{π} – температура споживаної води (опалення/пряме призначення) ($^{\circ}\text{C}$); Q_v – витрата води (кг/с); $X_{вб}$ – збурювальний вплив на бойлерну систему (температура зовнішнього середовища, рівень вологості повітря тощо).

Якщо ПКб реалізує управління ОКб з урахуванням детермінованих параметрів підсистем ОУб, то для проектування та реалізації КП для ОКк необхідно встановити залежності між усіма параметрами об'єктів ОКб, ОКк та $X_{вб}$. Варто відзначити, що ОКк функціонує автономно, що необхідно врахувати при проектуванні системи управління.

Для декомпозиції функціональної схеми з метою формування повного переліку параметрів об'єктів та залежностей між ними запропоновано

застосувати об'єктно-орієнтований підхід, що передбачає використання об'єктної декомпозиції, тобто поведінка геліосистеми буде описана в термінах взаємодії об'єктів. Така реалізація загальної структури геліосистеми дозволить наочно відобразити залежності між параметрами абстрактних об'єктів системи, на основі чого можливо реалізувати імітаційну модель геліосистеми для подальшого дослідження та розробки ІАСУ.

1.4 Розробка концепції ІАСУ

На основі висновків про автономне функціонування колектора, що взаємодіє з бойлерною системою, і виявленої залежності (з використанням імітаційної моделі) щодо підвищення ефективності системи опалення через орієнтування центру робочої поверхні колектора в напрямку найбільшого сукупного випромінювання (прямого, дифузного та відбитого), була запропонована конфігурація вакуумного колектора, призначеного для перетворення всього доступного випромінювання в тепло при умові мінімізації витрат енергії на виконання регулювання.

Для ефективного функціонування колектора в запропонованій конфігурації необхідно розробити систему управління, яка враховує вплив зовнішніх факторів. Пропонується розробити інтелектуальну автоматизовану систему управління (ІАСУ), що включає в себе імітаційну модель, прогностичні та оптимізуючі модулі.

Інтелектуальна автоматизована система управління (ІАСУ) в запропонованій конфігурації геліосистеми має за мету оптимізувати використання доступного сонячного випромінювання для максимального перетворення його в теплову енергію при мінімальних енергетичних витратах на регулювання положення колектора.

Структура ІАСУ включає кілька основних блоків, кожен з яких виконує специфічні функції для забезпечення високої ефективності системи. Ось кілька з них:

- Інтерфейс користувача - цей блок дозволяє користувачу задавати бажану температуру або інші параметри системи. Всі значення передаються на блок синхронізації, що координує роботу системи.
- Блок синхронізації - формує послідовність операцій для забезпечення відповідності параметрів системи заданому впливу, наприклад, вимогам щодо температури.
- Модулі інформаційно-сенсорної системи - вимірюють і оцінюють зовнішні умови, такі як температура навколишнього середовища, рівень освітленості, вологість та інші фактори, що можуть впливати на ефективність роботи геліосистеми.
- Імітаційна модель - за допомогою цієї моделі система проводить розрахунки з урахуванням зовнішніх умов і прогнозує необхідні коригування в роботі колектора.
- Прогнозуючі модулі - зберігають результати розрахунків і використовуються для підготовки до майбутніх операцій, оптимізуючи енергетичну ефективність роботи системи.
- Оптимізуючі модулі - забезпечують досягнення оптимальних результатів, коригуючи роботу системи на основі прогнозів, не перевантажуючи обчислювальні потужності.

Основна мета цього підходу - забезпечити стабільну роботу геліосистеми за будь-яких умов зовнішнього середовища, при цьому мінімізуючи споживання енергії на регулювання і максимізуючи перетворення сонячного випромінювання в теплоту.

Пропонована концепція Інтелектуальної автоматизованої системи управління (ІАСУ) базується на важливому принципі оптимізації - досягненні максимального використання сонячного випромінювання з мінімальними енергетичними затратами на регулювання. Основним критерієм оптимізації є орієнтація центру робочої поверхні колектора в напрямку максимального сонячного випромінювання (Вт/м^2) за мінімальних витрат енергії на переорієнтування.

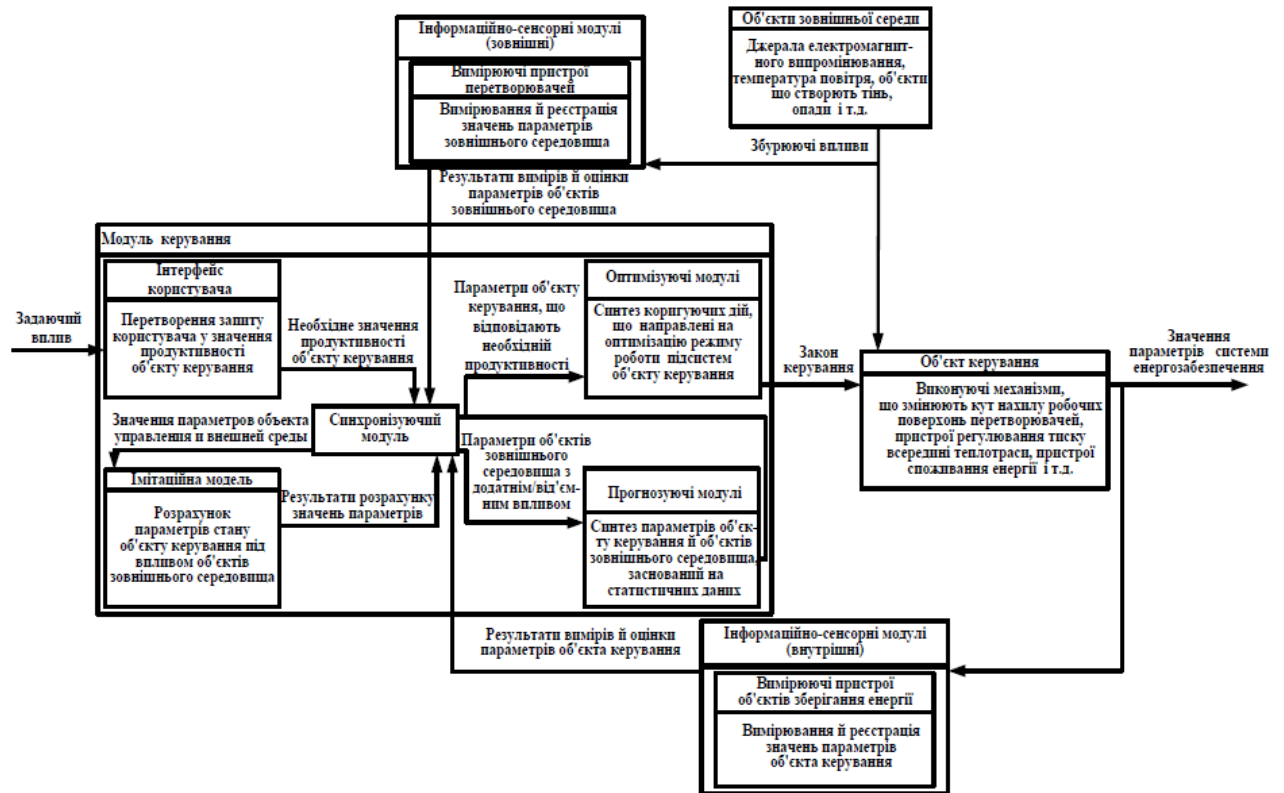


Рисунок 1.5 – Структура ІАСУ

Загалом, ІАСУ дозволяє не тільки ефективно управляти енергетичними потоками в системі, але й адаптувати систему до змінних умов навколишнього середовища, підвищуючи її загальну ефективність і автономність.

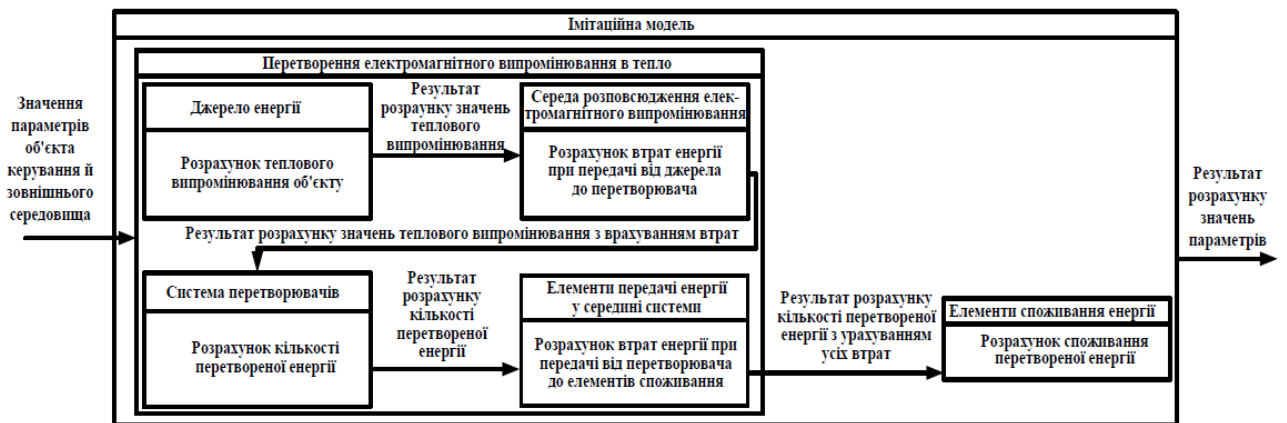


Рисунок 1.6 – Структурно-функціональна схема блоку імітаційної моделі у складі ІАСУ

Важливим етапом роботи системи є завершення послідовності операцій модуля управління, що включає синтез закону управління об'єктом, який

визначає параметри та стратегію роботи підсистем для оптимальної взаємодії з зовнішнім середовищем. Основною метою є мінімізація споживання енергії, що не може бути відновлена, та забезпечення ефективної роботи за різних зовнішніх умов.

Для цього в ІАСУ застосовується імітаційна модель, яка розраховує параметри стану об'єкта управління в залежності від зовнішніх впливів. Завдяки імітаційній моделі система отримує можливість прогнозувати та мінімізувати необхідність в дискретних регулюваннях, що дозволяє знизити витрати енергії на коригування.

Ключова функція якості системи управління полягає в реалізації основного критерію оптимізації: підтримці оптимального положення колектора за максимальним рівнем сонячного випромінювання при мінімальних витратах на його переорієнтацію. Це дозволяє підвищити ефективність роботи геліосистеми в умовах мінімальних енергетичних витрат і максимального використання доступної сонячної енергії.

1.5 Визначення необхідних параметрів абстрактної геліосистеми

Для визначення залежностей, які визначають ефективність перетворення енергії, було вирішено структурувати ідентифікований список параметрів об'єктів. Для вирішення цієї проблеми було використано об'єктно-орієнтований підхід, одним із ключових інструментів якого є розробка інформаційної моделі системи у вигляді діаграми класів. Діаграма класів буде використовуватися для розробки моделювання моделювання, необхідної для розв'язання дослідницьких задач, зокрема для реалізації аналізу впливу навколишнього середовища на геліосистему.

Запропонована інформаційна модель може бути використана для розробки алгоритмічного програмного забезпечення для інтелектуального керуючого модуля Сонячної системи. Запропоновані класи - це уніфіковані кадри, що містять атрибути, що описують параметри реальних об'єктів, що

беруть участь у процесі перетворення теплового випромінювання з різних джерел.

Таблиця 1.1 - Параметри, що впливають на ефективність сонячної системи

№	Найменування параметру	Характеристики впливу на ефективність системи енергопостачання	Експертна оцінка ступеня впливу
1	Кут нахилу робочої поверхні колектора до нормалі, град	Визначає значення кутового коефіцієнта Φ	висока
2	Середня потужність випромінювання на рік, Дж/м ² с	Визначає потенціал для генерації енергії	висока
3	Максимально можлива температура навколишнього середовища, °С	Визначає потенціал застосування сонячної установки, її конфігурацію та режими роботи, обмежуючи максимальну та мінімальну кількість тепла, що перетворюється за одиницю часу,	середня
4	Мінімально можлива температура навколишнього середовища, °С		висока
5	Поріг чутливості напівпровідників, лм·Гц ^{-1/2}	Визначає конфігурацію сонячної панелі та її роботу	нижче середньої
6	Ефективність оптичного поглинача, %	Впливає на питому/ємність вакуумного сонячного колектора	висока
7	Площа робочої поверхні, м ²	Впливає на питому ємність перетворювача та розміри системи перетворювача	висока
8	Ступінь чорноти об'єкту, що бере участь у передачі енергії випромінюванням, %	Визначає ефективність процесу передачі енергії від джерела до перетворювача	вище середньої
9	Температура джерела, °С	Визначає кількість тепла, передається від теплішого тіла до менш нагрітого	висока

Продовження табл. 1.1

10	Діапазон спектральної чутливості напівпровідника в перетворювачі (Атах), мкм	Визначає площу спектра для ефективного перетворення енергії	вище середньої
11	Довжина хвилі випромінювання джерела енергії, мкм	Визначає здатність перетворювача реагувати на випромінювання	нижче середньої
12	Ефективність трансформатора струму, %	Впливає на кількість корисних втрат енергії під час перетворення електромагнітного випромінювання в електрику, а потім у тепло	нижче середньої
13	Ефективність трубчастого електричного нагрівача, %		низька
14	Ефективність батареї, %		низька
15	Відстань між джерелом і колектором, м	Впливає на ефективність процесу передачі енергії випромінюванням у середовищі з заданою температурою	вище середньої
16	Кутовий коефіцієнт Φ	Впливає на ефективність процесу передачі енергії випромінюванням, враховуючи положення джерела та перетворювача в просторі	висока
17	Час доби, год	Визначає кількість енергії, перетвореної від Сонця	висока
18	Тривалість процесу випромінювання тепла від джерела до колектора, с	Визначає кількість перетвореної енергії з нагрітих об'єктів	висока
19	Взаємне випромінювання джерела та перетворювача, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$	Він визначає суцільний кут променю, який пройшов від більш нагрітого тіла до менш нагрітого тіла	висока

Продовження табл. 1.1

20	Теплове випромінювання об'єкта за одиницю часу, Дж/м ² ·с	Впливає на ефективність процесу передачі енергії випромінюванням у середовищі з заданою температурою	висока
21	Робота з перетворення в електричну енергію, Дж	Визначає загальну ефективність системи тепlopостачання. Після перетворення електрики на тепло	висока
22	Робота з перетворення у теплову енергію, Дж	Визначає загальну ефективність системи тепlopостачання	висока
23	Повна кількість теплоти, Дж	Визначає потенційну кількість енергії для перетворення. отримано внаслідок випромінювання нагрітим тілом	висока
24	Потужність споживачів, Вт	Визначає мінімальну продуктивність системи живлення для відповідності нормам опалення простору	висока
25	Потужність обладнання, що бере участь у процесі перетворення електроенергії на тепло, Вт	Визначає мінімальну продуктивність системи перетворення електроенергії в тепло	висока
26	Споживання тепла за одиницю часу, кал·год	Впливає на запас нагрітого рідкого теплоносія всередині системи тепlopостачання	середня
27	Споживання електроенергії за одиницю часу, Вт·год	Впливає на постачання перетвореної електроенергії	нижче середньої

Наведені взаємозв'язки між атрибутами класів інформаційної моделі відображають взаємодію між об'єктами типової сонячної системи і можуть використовуватися для формування моделювання процесів, пов'язаних із

перетворенням електромагнітного випромінювання в інші типи енергії за допомогою об'єктів, що є частиною сонячних систем.

Висновки до розділу:

У першому розділі було проведено всебічний аналіз об'єкта дослідження та технологічного процесу функціонування геліосистем у холодному кліматі. На основі вивчення кліматичних особливостей регіонів із низькими температурами встановлено, що сонячні технології можуть бути ефективно використані навіть за умов обмеженої інсоляції, за умови застосування сучасних технічних рішень, оптимального розміщення обладнання та автоматизованих систем керування.

У ході аналізу було визначено найбільш доцільний підхід до реалізації системи регулювання робочої поверхні колектора. Розглянуті технічні варіанти дали змогу сформулювати концепцію керування, яка забезпечує максимально ефективне використання сонячної енергії та адаптацію геліосистеми до змін зовнішнього середовища.

Детальна ідентифікація елементів геліосистеми дозволила визначити склад, функції та взаємозв'язки її ключових компонентів. Це створило основу для формування архітектури майбутньої автоматизованої системи та правильного вибору засобів контролю та виконавчих пристроїв.

Розроблена концепція інтегрованої автоматизованої системи управління (ІАСУ) окреслила принципи побудови, призначення та функціональні можливості системи. У межах цього розділу також було визначено основні параметри абстрактної геліосистеми, що необхідні для подальшого моделювання, синтезу системи керування та перевірки її працездатності.

Таким чином, розділ 1 заклав теоретичне та методологічне підґрунтя для подальших етапів проектування системи автоматичного керування геліоколектором. Проведений аналіз забезпечив розуміння структури об'єкта, особливостей його роботи та ключових вимог до майбутньої ІАСУ, що визначає напрям подальших досліджень і технічних рішень.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ІАСУ ГЕЛІОСИСТЕМИ

2.1 Розробка інтелектуального модуля управління у складі імітаційної моделі процесу одержання сукупного сонячного випромінювання

Розглядається система, що знаходиться під впливом прямого, дифузійного, відбитого випромінювання та/або їх сукупності. При цьому пряме є єдиним чітко прогнозованим випромінюванням. Вплив інших типів випромінювання є стохастичним процесом, залежним від безлічі факторів [1]. При цьому кількість джерел відбитого випромінювання, а також частота і ступінь їх впливу є випадковими величинами. Доцільно розглядати зареєстровані впливи дифузійного та відбитого випромінювання як сукупність, що характеризує їх загальну інтенсивність. Якщо розглядати сукупне випромінювання як множину значень з можливістю їх класифікацій, можливо синтезувати алгоритм прогнозу їх впливів у коротких інтервалах часу та знизити ризик орієнтування робочої поверхні колектора в напрямку найбільшого сукупного випромінювання з низьким інтервалом впливу.

Автоматизовані системи стеження, що входять до складу сучасних геліосистем [13,14,17], розвиваються в напрямку адаптації до різномірних впливів зовнішнього середовища (різні фактори, що впливають на зниження інтенсивності доступного випромінювання: кліматичні, географічні, фактори місцевості та інше) [14,15,21]. З останніх результатів досліджень [22,23] очевидна тенденція модернізації алгоритмів роботи таких систем, пов'язана з обробкою різномірних параметрів, які в свою чергу, пов'язані з особливостями локації, де розміщуються масиви колекторів (інфраструктура масиву може обмежувати доступне випромінювання, але водночас може бути використана як концентратор [24] відбитого випромінювання).

Варто врахувати, що в ранкові та вечірні години енергія від дифузійного та відбитого випромінювання може бути більшою за енергію прямого випромінювання, спрямованого не під прямим кутом відносно приймальної поверхні. Крім того, при сильній хмарності або в результаті утворення тіні на поверхні колектора інтенсивність прямого випромінювання може бути нижчою за відбиту. Оскільки значення параметрів відбитого випромінювання можуть бути того ж порядку, що й прямого, отже, його напрямок (незалежний від факторів, що впливають на пряме випромінювання) дозволить задіяти більшу площу поглинаючої поверхні.

Інтенсивність відбитого променя змінюється в діапазоні від мінімального до максимального значення залежно від тілесного кута (сонячні ферми оснащуються концентраторами випромінювання для досягнення найвищої ефективності) [7, 24]. Іншими словами, якщо охарактеризувати доступне випромінювання як множину значень, що змінюються в інтервалі їх максимальної та мінімальної інтенсивності, то сукупне випромінювання може бути описано як нечітка множина.

Поняття нечіткої множини розширює класичне поняття множини з допущенням, що характеристична функція множини (параметри інтенсивності прямого, дифузного та відбитого випромінювання) може приймати будь-які значення в інтервалі від мінімальної до максимальної інтенсивності променю.

Один з найбільш ефективних підходів для обробки множин таких значень і роботи з масивами даних - це теорія нечітких множин, представлена в праці «Fuzzy Sets» [25]. Засновані на цій науковій теорії алгоритми SUGENO та MAMDANI дозволяють модернізувати лінійні алгоритми автоматизованих систем стеження [27], обмежених операціями лише з константами. Зміна алгоритму з метою синтезу експертної системи можлива шляхом додавання етапу фазифікації вхідних змінних (переведення до нечіткості), що забезпечує можливість аналізу якісних характеристик впливу зовнішнього середовища, інтерпретованих як множини значень.

Вакуумні сонячні колектори здатні перетворювати теплове

випромінювання від будь-якого джерела [21,28]. У реальних умовах експлуатації колектор оточений безліччю поверхонь, що відображають випромінювання, формуючи сукупне теплове випромінювання [15,17]. Для забезпечення максимальної ефективності перетворення енергії колектором необхідно орієнтувати центр його робочої поверхні в напрямку центру максимального сукупного теплового випромінювання.

Відбиті та дифузні випромінювання залежать від безлічі параметрів, значення яких неперервно змінюються під впливом зовнішніх факторів, через що їх складно детермінувати. А якщо відбиваючих поверхонь багато, то визначення параметрів кожної з них не має сенсу. Для пошуку центру найбільшого теплового випромінювання доцільно розглядати параметри сукупного випромінювання, в результаті визначення яких можливо встановити підмножини, що включають параметри найбільшого впливового випромінювання. В такому випадку вказані підмножини будуть сформовані з значень параметрів, синтезованих в результаті стохастичних процесів, і поточне сукупне випромінювання в даний момент часу може виявитися меншим, ніж випромінювання в іншому напрямку в наступний момент часу. Часті зміни напрямку найбільшого сукупного випромінювання стають проблемою при реалізації системи, що коригує положення робочої поверхні вакуумного колектора, оскільки на кожне переорієнтування витрачається додаткова енергія, необхідна для роботи виконавчих механізмів, що переміщують навантаження мінімум у 20 кг (середня вага робочої поверхні вакуумного колектора з 15 трубок). Для вирішення цієї проблеми необхідно передбачити систему прогнозування, що дозволяє визначити доцільність переорієнтування в новий напрямок, де сукупне теплове випромінювання більше, ніж витрати енергії на коригування положення робочої поверхні.

Для вирішення задачі дослідження необхідний алгоритм оптимізації положення поверхні вакуумного сонячного колектора, побудований на базі методів м'яких обчислень, що забезпечує синтез значень з прийнятною точністю із значним скороченням обчислювальної навантаження, що дозволяє

реалізувати підсистему прогнозу ефективності роботи колектора, що знаходиться під впливом випадкових теплових випромінювань.

Завдяки впровадженню прогнозуючих і оптимізуючих модулів система може адаптуватися до змін навколишнього середовища, забезпечуючи високий рівень автономності та ефективності в експлуатації:

$$E = \{G_p, G_o, G_d, S_p, \varphi_a, \varphi_z, E_p\} \rightarrow \max \quad (2.1)$$

де E – отримана енергія (Вт ч);

G_p – пряме випромінювання сонця (Вт/м²);

G_o – відбите випромінювання (Вт/м²);

G_d – дифузне випромінювання (Вт/м²);

S_p – площа активно поглинаючої поверхні (м²);

φ_a – азимутальний кут нахилу поглинаючої поверхні (°);

φ_z – зенітний кут нахилу поглинаючої поверхні (°);

E_p – витрати енергії на переміщення робочої поверхні (Вт ч).

Процес передачі тепла випромінюванням характеризується значенням повної кількості теплоти:

$$Z \times S \times t \times \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right) \times \Phi \quad (2.2)$$

де Z – сукупне випромінювання джерел (Вт/м²); S – площа випромінюючої поверхні (м²); t_i – час дії випромінювання (ч); $T_{дж}$ – температура джерела (°C); T_p – температура активно поглинаючої поверхні (°C); Φ – кутовий коефіцієнт між джерелом та колектором.

Умови, які описують процеси нагріву та регулювання в сонячних колекторах, базуються на використанні математичних моделей для максимізації ефективності перетворення енергії.

Одним із важливих аспектів є кутовий коефіцієнт (Φ), який визначає оптимальне використання сонячної енергії. Для досягнення найкращих результатів перетворення енергії з випромінювання, має виконуватися умова $\Phi \geq 1$, що означає, що колектор знаходиться в найефективнішому положенні для

збору максимального випромінювання. У разі, коли значення Φ менше 1, це вказує на недостатнє чи неефективне використання доступного випромінювання.

Коригування значення Φ здійснюється через регулювання положення робочої поверхні колектора. Це регулювання здійснюється на основі параметрів напрямку до джерела випромінювання, таких як φ_a (азимутальний кут) та φ_z (висотний кут). Це дозволяє забезпечити точну орієнтацію колектора в напрямку максимального сонячного випромінювання, що значно підвищує ефективність роботи системи.

Однак стохастичні процеси (наприклад, відбиті, розсіяні чи відбиті розсіяні промені) становлять певну складність для прогнозування та ефективного керування системою. Вони можуть бути розглянуті як сукупність значень, де кількість джерел випромінювання, їхня частота та ступінь впливу є випадковими величинами. Це вимагає від системи здатності адаптуватися до таких змін, гарантуючи максимальне використання енергії при мінімальних енергетичних витратах на регулювання.

Крім того, стохастичність таких процесів може призводити до короткочасного відбитого випромінювання, яке може спричинити необхідність переорієнтації колектора в напрямку з більшим значенням G (щільність потоку енергії) та меншою температурою t . В такому випадку важливо уникнути переорієнтації в напрямки, де G та t низькі, оскільки це може знизити ефективність роботи системи і привести до зайвих енергетичних витрат.

Завдяки регулюванню та врахуванню стохастичних ефектів, система управління може обирати оптимальні моменти для переорієнтації колектора, при цьому мінімізуючи негативний вплив короткочасних коливань зовнішнього випромінювання.

Нова ІАСУ може бути інтегрована з елементами, які вже знаходяться в експлуатації геліосистеми [10,12]. Інтелектуальна автоматизована система управління - це програмно-апаратний модуль пристрою управління сонячним колектором ($УУ_k$), інтегрованого з тримачем робочої поверхні сонячного

колектора з кроковими виконавчими механізмами, що дозволяють коригувати кут нахилу робочої поверхні відносно норми. На рисунку 2.1 запропонована структурна схема геліосистеми, що розширює функціональну схему геліосистеми з метою відображення інтеграції нової ІАСУ.

Модулі ІАСУ (КПк) не впливають на функціонування стандартного пристрою управління бойлерною системою опалення (КПб) і при цьому можуть використовувати синтезовані ними дані (наприклад, для визначення необхідності блокування нагріву теплоносія колектором у літній період). КПк інтегрується в стандартну геліосистему, що підтримує зміни напрямків робочої поверхні сонячного колектора. На вході КПк значення виміряного випромінювання (X_p) у $Вт/м^2$, на основі яких синтезується закон управління – U_k , що забезпечує орієнтування центру робочої поверхні в напрямку найбільшого сукупного випромінювання.

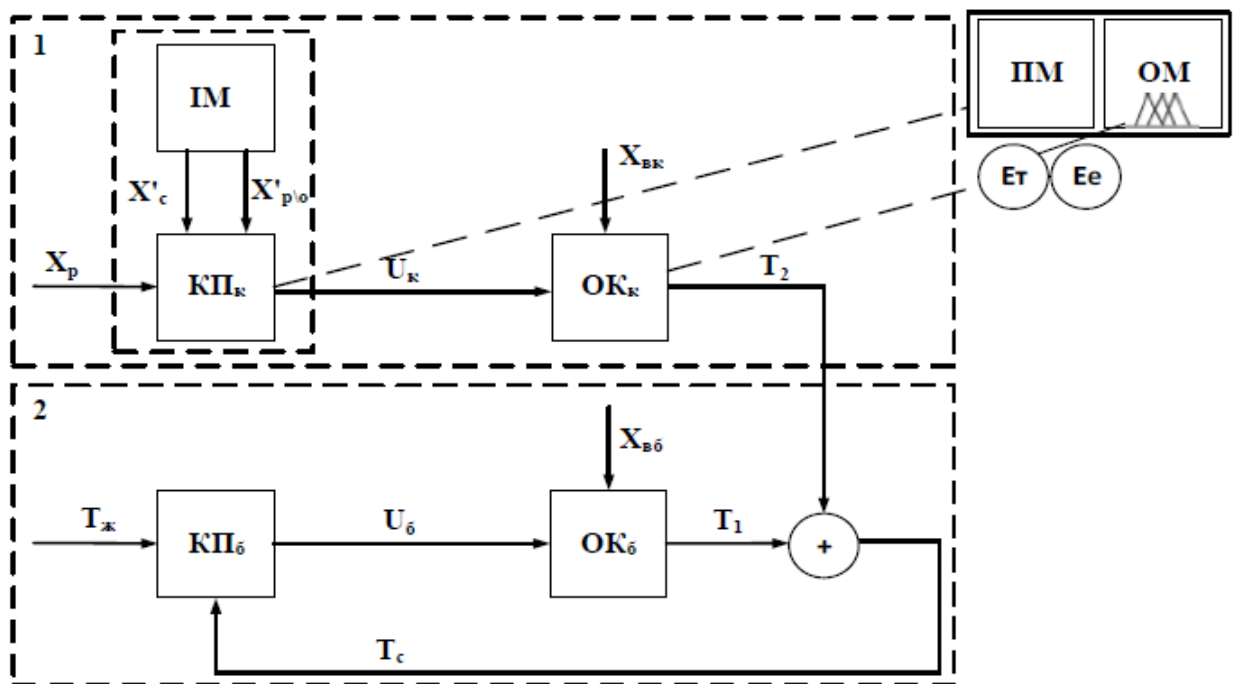


Рисунок 2.1 - Функціональна схема (1– колектор з ІАСУ, 2 – бойлерна система опалення).

На рис. 2.1 прийняті наступні позначення ІМ – імітаційна модель; КПк - пристрій управління колектором; ОКк - об'єкт керування колектор; ПМ – прогнозуючий модуль; ОМ – оптимізуючий модуль (що враховує E_r – перетворену теплову

енергію та $\dot{I}_i$ – затрачувану при регулюванні електричну енергію); КПБ - пристрій керування бойлерною системою; ОКБ - об'єкт управління бойлерною системою.

$$U_k = \begin{bmatrix} \varphi_{1a} & & \varphi_{1z} \\ \varphi_{2a} & & \varphi_{2z} \\ & \dots & \\ \varphi_{1440a} & & \varphi_{1440z} \end{bmatrix}$$

φ_{na} , φ_{nz} – азимутальний та зенітний кут нахилу робочої поверхні в задану хвилину (1,2...1440) протягом доби, змінюваний кроковим виконавчим механізмом (наприклад, кроковий лінійний електропривід з обертальним штоком).

Важливою частиною ІАСУ є ІМ, в складі якої є модулі розрахунку приходу прямої сонячної радіації, модулі, що генерують значення дифузійного та відбитого випромінювання, та елементи, що враховують витрати енергії на виконання регулювання положення робочої поверхні. Значення дифузійного та відбитого випромінювання, виміряних у Вт/м², змодельовані блоками Matlab Simulink – Uniform Random Number. Модель призначена для стресового випробування ІАСУ, тому блоки безперервно генерують випадкові значення в заданому діапазоні. Діапазон значень відповідає математичному опису дифузійного випромінювання та статистичним даним з експериментів з відбитим випромінюванням, наведених у працях [1,2,19].

Енергія відбитого випромінювання розраховується шляхом множення поточної інтенсивності випромінювання на її твердий кут (який має бути визначений у кожному експерименті) і косинуса полярного кута. З чого може бути отриманий потік випромінювання, який матиме значення того ж порядку, що і відбитий промінь (відбите випромінювання може мати числові значення від нуля до нескінченності). З чого випливає, що дифузійне та відбите випромінювання характеризуються усередненими значеннями, які можливо згенерувати як випадковий сигнал з заданим діапазоном зміни значень.

З метою аналізу взаємодії об'єктів розглянутої системи в динаміці пропонується реалізувати імітаційну модель. Для вирішення цього завдання

доцільно використовувати графічне середовище програмування на базі MATLAB – Simulink, так як деякі з розглянутих класів об'єктів вже знаходяться в її бібліотеці у вигляді реалізованих блоків, що містять формули, аналогічні тим, що розглядаються при реалізації UML-діаграми. Крім того, його основний інтерфейс є графічним інструментом для побудови динамічних моделей, що дозволяє наочно відобразити взаємозв'язки між фізично правильними моделями елементів досліджуваної системи. Simulink також пропонує тісну інтеграцію з рештою середовища MATLAB, в якій можна реалізувати процедури, необхідні для функціонування розробленої ІАСУ.

Зокрема, для реалізації моделі вони були використані в модулях бібліотек Matlab Simulink (Simscape: Electrical, Fluids, Specialized Power Systems) [11]. Загальний вигляд розробленої моделі представлений на рис. 2.2

Загальне енергетичне рівняння запропонованої імітаційної моделі має вигляд:

$$I_{iz} \times KKD_{OKk} \times KKD_{OKb} - P_{tp} = P_{norm} \quad (2.3)$$

де I_{iz} – теплове випромінювання (Вт/м²); KKD_{OKk} – коефіцієнт корисної дії колектору (%); KKD_{OKb} – коефіцієнт корисної дії бойлеру (%); P_{tp} – поточне споживання (Вт/м²); P_{norm} – норма витрати тепла (Вт/м²).

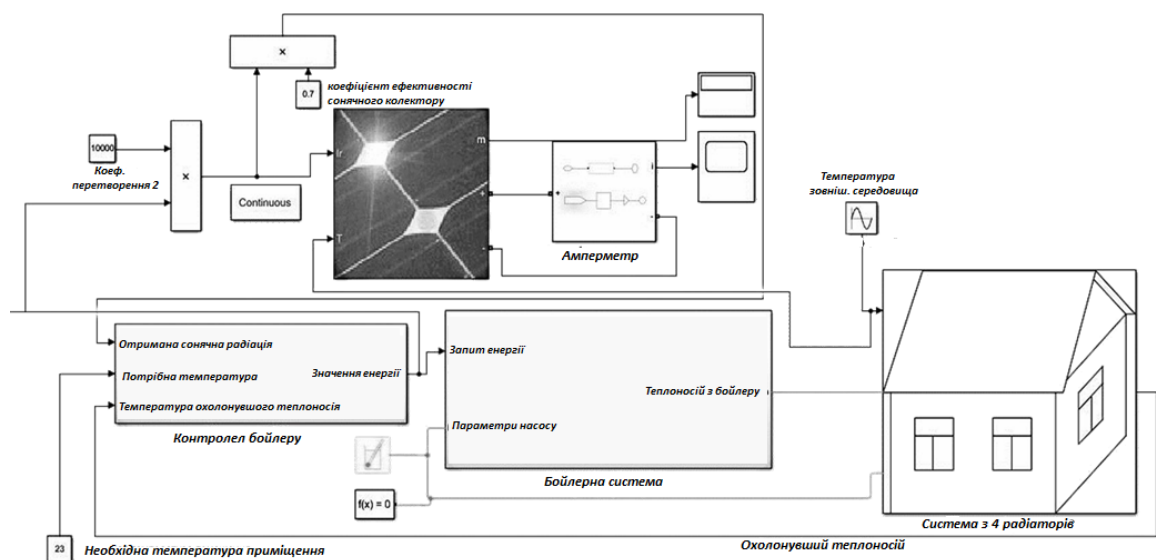


Рисунок 2.2 - Загальний вид імітаційної моделі геліосистеми, реалізованої в MATLAB Simulink

Експерименти над моделлю дозволили зробити наступний висновок: підключення сонячного колектора (OK_K) в систему опалення після нагрівача котла (OK_6) збільшить час охолодження теплоносія, що дозволить скоротити витрати на обігрів. Так як колектор функціонує автономно і впливає на OK_6 Тільки в результаті передачі теплоносія доцільно сконструювати керуючий пристрій, який функціонує незалежно від КП₆. Колектор перетворює найбільшу кількість енергії при $\Phi \geq 1$ відносно місцевості, де утворюється комбіноване пряме, дифузне і відбите випромінювання (відбите випромінювання залежить від твердого кута нахилу пучка і може бути в будь-якому напрямку).

Для розкриття потенціалу вакуумного сонячного колектора, інтегрованого з системою опалення котла і працює автономно, доцільно розробити автоматизовану систему управління, що враховує прогнозовані значення прямого випромінювання, зовнішніх впливів у вигляді дифузного і відбитого випромінювання і параметри енергоспоживання виконавчих механізмів, що коригують кут нахилу робочої поверхні колектора (для забезпечення $\Phi \geq 1$).

Для впровадження ІАСУ необхідно також визначити оптимальну апаратну складову. Такі системи регулювання робочої поверхні сонячного колектора припускають наявність рухомих елементів в конструкції підстави робочої поверхні. Мінімальне число свобод робочої поверхні - два, але такий тримач не здатний забезпечити опору для орієнтації в напрямку відбитого випромінювання.

2.2 Розробка інтелектуального модуля управління у складі імітаційної моделі процесу одержання сукупного сонячного випромінювання

Розглядається система, що знаходиться під впливом прямого, дифузійного, відбитого випромінювання та/або їх сукупності. При цьому пряме

є єдиним чітко прогнозованим випромінюванням. Вплив інших типів випромінювання є стохастичним процесом, залежним від безлічі факторів [1]. При цьому кількість джерел відбитого випромінювання, а також частота і ступінь їх впливу є випадковими величинами. Доцільно розглядати зареєстровані впливи дифузійного та відбитого випромінювання як сукупність, що характеризує їх загальну інтенсивність. Якщо розглядати сукупне випромінювання як множину значень з можливістю їх класифікацій, можливо синтезувати алгоритм прогнозу їх впливів у коротких інтервалах часу та знизити ризик орієнтування робочої поверхні колектора в напрямку найбільшого сукупного випромінювання з низьким інтервалом впливу.

Автоматизовані системи стеження, що входять до складу сучасних геліосистем [13,14,17], розвиваються в напрямку адаптації до різноманітних впливів зовнішнього середовища (різні фактори, що впливають на зниження інтенсивності доступного випромінювання: кліматичні, географічні, фактори місцевості та інше) [14,15,21]. З останніх результатів досліджень [22,23] очевидна тенденція модернізації алгоритмів роботи таких систем, пов'язана з обробкою різноманітних параметрів, які в свою чергу, пов'язані з особливостями локації, де розміщуються масиви колекторів (інфраструктура масиву може обмежувати доступне випромінювання, але водночас може бути використана як концентратор [24] відбитого випромінювання).

У цій роботі розглядаються залежності, пов'язані з максимізацією отримання сукупного випромінювання робочою поверхнею колектора. Значення сукупного випромінювання має сенс розглядати як множини. Варто врахувати, що в ранкові та вечірні години енергія від дифузійного та відбитого випромінювання може бути більшою за енергію прямого випромінювання, спрямованого не під прямим кутом відносно приймальної поверхні. Крім того, при сильній хмарності або в результаті утворення тіні на поверхні колектора інтенсивність прямого випромінювання може бути нижчою за відбиту. Оскільки значення параметрів відбитого випромінювання можуть бути того ж порядку, що й прямого, отже, його напрямок (незалежний від факторів, що

впливають на пряме випромінювання) дозволить задіяти більшу площу поглинаючої поверхні.

Інтенсивність відбитого променю змінюється в діапазоні від мінімального до максимального значення залежно від тілесного кута (сонячні ферми оснащуються концентраторами випромінювання для досягнення найвищої ефективності) [7, 24]. Іншими словами, якщо охарактеризувати доступне випромінювання як множину значень, що змінюються в інтервалі їх максимальної та мінімальної інтенсивності, то сукупне випромінювання може бути описано як нечітка множина.

Поняття нечіткої множини розширює класичне поняття множини з допущенням, що характеристична функція множини (параметри інтенсивності прямого, дифузного та відбитого випромінювання) може приймати будь-які значення в інтервалі від мінімальної до максимальної інтенсивності променю.

Один з найбільш ефективних підходів для обробки множин таких значень і роботи з масивами даних — це теорія нечітких множин, представлена в праці «Fuzzy Sets» [25]. Засновані на цій науковій теорії алгоритми SUGENO та MAMDANI дозволяють модернізувати лінійні алгоритми автоматизованих систем стеження [27], обмежених операціями лише з константами. Зміна алгоритму з метою синтезу експертної системи можлива шляхом додавання етапу фазифікації вхідних змінних (переведення до нечіткості), що забезпечує можливість аналізу якісних характеристик впливу зовнішнього середовища, інтерпретованих як множини значень.

Вакуумні сонячні колектори здатні перетворювати теплове випромінювання від будь-якого джерела [21,28]. У реальних умовах експлуатації колектор оточений безліччю поверхонь, що відображають випромінювання, формуючи сукупне теплове випромінювання [15,17]. Для забезпечення максимальної ефективності перетворення енергії колектором необхідно орієнтувати центр його робочої поверхні в напрямку центру максимального сукупного теплового випромінювання.

Відбиті та дифузні випромінювання залежать від безлічі параметрів,

значення яких неперервно змінюються під впливом зовнішніх факторів, через що їх складно детермінувати. А якщо відбиваючих поверхонь багато, то визначення параметрів кожної з них не має сенсу. Для пошуку центру найбільшого теплового випромінювання доцільно розглядати параметри сукупного випромінювання, в результаті визначення яких можливо встановити підмножини, що включають параметри найбільшого впливового випромінювання. Часті зміни напрямку найбільшого сукупного випромінювання стають проблемою при реалізації системи, що коригує положення робочої поверхні вакуумного колектора, оскільки на кожне переорієнтування витрачається додаткова енергія, необхідна для роботи виконавчих механізмів, що переміщують навантаження мінімум у 20 кг (середня вага робочої поверхні вакуумного колектора з 15 трубок). Для вирішення цієї проблеми необхідно передбачити систему прогнозування, що дозволяє визначити доцільність переорієнтування в новий напрямок, де сукупне теплове випромінювання більше, ніж витрати енергії на коригування положення робочої поверхні.

Для вирішення задачі дослідження необхідний алгоритм оптимізації положення поверхні вакуумного сонячного колектора, побудований на базі методів м'яких обчислень, що забезпечує синтез значень з прийнятною точністю із значним скороченням обчислювальної навантаження, що дозволяє реалізувати підсистему прогнозу ефективності роботи колектора, що знаходиться під впливом випадкових теплових випромінювань.

2.3 Розробка імітаційної моделі приходу прямої сонячної радіації всередині атмосфери

Для розрахунку значень приходу прямого випромінювання (X'_c), вимірюваного у Вт/м², застосована методика з найменшою похибкою, яка була використана NASA у 2017 році для формування «The NASA Surface Meteorology

and Solar Energy Data Set». Для обчислення горизонтального випромінювання за ясного неба на похилу поверхню у Вт/м^2 була застосована формула:

$$G_{cb} = G_{on} \times \tau_b \times \cos\theta_z \quad (2.4)$$

де G_{on} – позаатмосферне випромінювання Сонця, τ_b – коефіцієнт пропускання атмосфери, θ_z – кут падіння променевого випромінювання на горизонтальну поверхню. Формула позаатмосферного випромінювання має вигляд:

$$G_{on} = G_{sc}(1,00011 + 0,034221 \cdot \cos B + 0,00128 \cdot \sin B + 0,000719 \cdot \cos 2B + 0,000077 \cdot \sin 2B) \quad (2.5)$$

де G_{sc} - Сонячна стала (1367 Вт/м^2), B – коефіцієнт, що залежить від порядкового номера дня року (n):

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (2.6)$$

Для того, щоб обчислити коефіцієнт пропускання атмосфери, використано метод, який враховує значення зенітного кута та висоту над рівнем моря (для заданих координат) для стандартної атмосфери, а також поправки для чотирьох типів клімату:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot \exp\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right) \quad (2.7)$$

де a_0 , a_1 , k – константи для стандартної атмосфери, що залежать від висоти приймальної поверхні над рівнем моря (A):

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2 \\ a_1 &= 0,5055 - 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2 \\ k &= 0,2711 - 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Для коригування констант під певні типи клімату необхідно помножити їхні значення на відповідні коефіцієнти. У цій роботі застосовані коефіцієнти ($r_0=0.97$, $r_1=0.99$, $r_k=1.02$). Далі визначається кут падіння променевого випромінювання - це зенітний кут сонця θ_z . Косинус θ_z визначається за формулою:

$$\cos\theta_z = \cos\varphi \times \cos\delta \times \cos\omega + \sin\varphi \times \sin\delta \quad (2.9)$$

де φ – широта - кутове положення приймального майданчика на північ або південь від екватора ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$), β - схилення - кутове положення Сонця в сонячний полудень відносно площини екватора ($-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$), ω - годинний кут - кутове зміщення Сонця на схід або захід від місцевого меридіана. Схилення обчислюється за формулою:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.10)$$

Годинний кут ω обчислюється методом, запропонованим у (застосовний для автоматизованих обчислень). Годинний кут обчислюється за формулою:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12 - T_{YB} - dT_{UTC}) + \psi \quad (2.11)$$

де t – порядковий номер години (місцевий час), T_{YB} - часова поправка на рівняння часу, dT_{UTC} - різниця між місцевим офіційним часом та середнім часом по Грінвічу, ψ - географічна довгота точки розміщення приймальної поверхні. Для знаходження часової поправки використовується формула:

$$T_{YB} = \frac{1}{60} \left[9,87 \sin \left(2 \left(\frac{360}{365} (n - 81) \right) \right) - 7,53 \cos \left(\frac{360}{365} (n - 81) \right) - 1,5 \sin \left(\frac{360}{365} (n - 81) \right) \right] \quad (2.12)$$

На рис. 2.3 представлений код реалізованої програми як функції середовища Matlab. Розробка програми для автоматизованого розрахунку приходу сонячної радіації виконана в середовищі MATLAB, оскільки в такій реалізації вона може інтегруватися з пакетом Simulink, в якому можливо моделювати динамічні системи із застосуванням фізично коректних моделей (з бібліотеки *simscape*) об'єктів систем опалення бойлерного типу. Реалізована функція (*function Gcb = Prim_rad (N,t)*) включає вище перелічені формули, має вхідні змінні – порядковий номер дня та години, повертає значення горизонтального випромінювання за ясного неба на похилу поверхню у Вт/м². Для формування масиву погодинних значень випромінювання за календарний рік реалізовано програмний код, що формує матрицю розмірністю $q = [365 \times 50]$ для запису обчислених значень.

```

function [Geb,Gon,B,tb,k,a1,a0,cosQz,bi,w,Tuv,Bi,A,r0,r1,rk,fi,yi,Tute] = Prim_rad(N,t)
A=0.072;
r0=0.97;
r1=0.99;
rk=1.02;
fi=48.472584;
yi=135.057732;
Tute=10;
bi=23.45*sind(360*((284+N)/365));
Bi=360/365*(N-81);
Tuv=(9.87*sind(2*Bi)-7.53*(Bi)-1.5*sind(Bi))/60;
w=15*(t-12-Tuv-Tute)+yi;
cosQz=cosd(fi)*cosd(bi)*cosd(w)+sind(fi)*sind(bi);
a0=(0.4237-0.00821*(6-A)^2)*r0;
a1=(0.5055+0.00595*(6.5-A)^2)*r1;
k=(0.2711+0.01858*(2.5-A)^2)*rk;
tb=a0+a1*exp(-k/cosQz);
B=(N-1)*360/365;
Gon=1367*(1.000110+0.034221*cosd(B)+0.001280*sind(B)+0.000719*cosd(2*B)+0.000
077*sind(2*B));
Geb=Gon*tb*cosQz; end

```

Рисунок 2.3 – Лістинг коду розрахунку параметрів

Адекватність отриманих значень була перевірена на основі статистичних даних, представлених у [1]. Оскільки «q» заповнюється значеннями, отриманими автоматизованим розрахунком, при значеннях ω , що перевищують 360° , відбувається циклічне зміщення стовпців, а значення ω , що відповідають нічному часу доби, призводять до від'ємних значень випромінювання (Додаток В).

Тому необхідно перетворити отриманий масив таким чином, щоб стовпці матриці відповідали порядковому номеру години, рядки - порядковому номеру дня, а значення менше нуля були виключені. Початковий стовпець заповнення структурованого масиву визначається додатковою матрицею розмірності 365×1 , в якій містяться номери годин сходу сонця на території міста Хабаровськ, отримані статистичним методом і перевірені із застосуванням вимірювальних пристроїв. У таблиці 2.1 наведено структуру програми.

Таблиця 2.1 – Процедура для формування масиву значень випромінювання

Структура	Коментарі
<i>Процедура для формування масиву «q»</i>	
<pre> k1=0; n=0; l=0; for N=1:365 n= n+1; k1=0; for i=1:50 l = l+1; k1=k1+1; q(n, k1) = Prim_rad (N,t); end </pre>	N – лічильник днів, i – лічильник годин. Збільшений до 48 лічильник годин, дозволяє вмістити всі обчислені значення для подальшої фільтрації масиву. Процедура заповнює матрицю $q(n, k1)$ обчисленими значеннями G_{cb} функції $Prim_rad(N, t)$.
<i>Процедура для перетворення структури «q»</i>	
<pre> q=[365 × 48]; c= [365 × 1]; B= zeros [365, 24]; for i=1:365 k=0; for j=1:50 if A (i,j)>0 B(i,c(i,1)+k)= q(i,j); k=k+1; end end end </pre>	Оголошуються два масиви («q») – розраховані значення випромінювання, («с») – номери годин сходу на кожний календарний день. Створюється пуста матриця 365×24. Створюються лічильники для рядків і стовпців. Перевіряється наявність у матриці «q» ненульового елемента. Записується ненульовий елемент матриці «q» у матрицю «В» з урахуванням позиції, відображеної у матриці «с».

Результати статистичного аналізу були суміщені з класифікацією хмар за відбивною здатністю прямого сонячного випромінювання (найбільш щільні хмари знижують інтенсивність до 80%, хмари низької щільності - до 10%). На рисунку 2.4 наведено графік приходу сонячної радіації з різним рівнем хмарності протягом 3 днів березня.

Запропонована імітаційна модель приходу сонячної радіації з урахуванням хмарності дозволить забезпечити роботу прогнозуючого модуля, що входить до складу інтелектуального модуля управління автономною автоматизованою геліосистемою, яка підтримує орієнтування робочих поверхонь перетворювачів на джерело електромагнітного випромінювання.

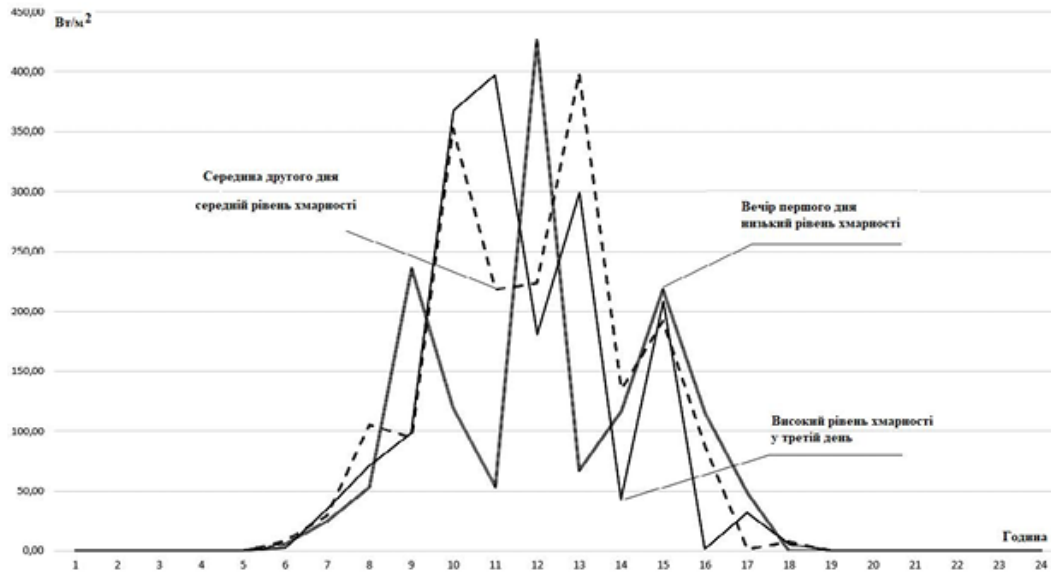
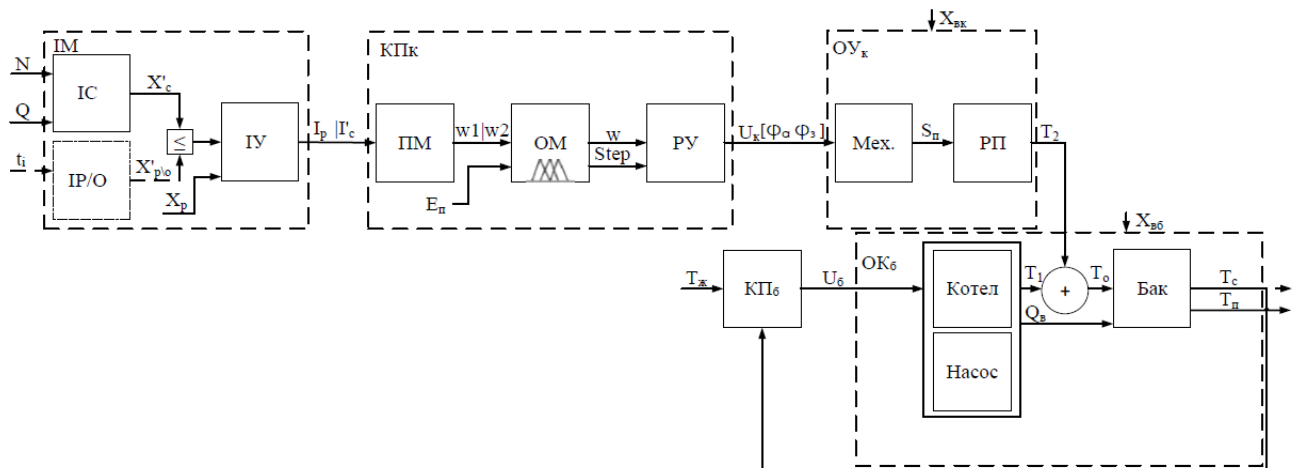


Рисунок 2.4 – Графік приходу сонячної радіації з різною хмарністю на 3 дні

Спрогнозовані значення сонячної радіації дозволяють синтезувати рішення про регулювання режиму роботи виконавчих механізмів таким чином, щоб перетворювач отримав максимум енергії від джерела, витративши при цьому мінімум невідновлюваної енергії на регулювання положення робочої поверхні.



IC – імітаційна модель прямого випромінювання сонця; IP/O – імітаційна модель дифузного/відбитого випромінювання; IV – імітаційна модель вимірювальних пристроїв;
 ПМ – прогностичний модуль; ОМ – оптимізувальний модуль; РУ - модуль розрахунку кута нахилу робочої поверхні колектора; Мех. - виконавчий механізм; РП – робоча поверхня;
 КПб - пристрій керування бойлерною системою.

Рисунок 2.5 – Функціональна схема геліосистеми з інтегрованою ІАСУ

Блок ІМ (імітаційна модель) включає: ІС – модуль розрахунку значень приходу прямої сонячної радіації у Вт/м^2 (N - порядковий номер дня, Q - рівень хмарності в певній годині від 0.1 до 0.9); ІР/О – модуль розрахунку значень випромінювання в період часу $t_{\text{и}}$ – період часу в год.) у Вт/м^2 , що використовується тільки при тестуванні та налаштуванні ІАСУ; ІУ – модуль розрахунку значень сили струму в А, перетвореного внаслідок впливу випромінювання у Вт/м^2 на вимірювальний пристрій, що використовується тільки при тестуванні та налаштуванні ІАСУ. Блок ІМ синтезує значення сили струму $I_p|I'_c$, пропорційні значенням X_p (випромінювання виміряне), які визначаються умовою $X'_c \leq X'_{p\text{до}}$ – якщо розсіяне/відбите випромінювання більше прямого, то враховувати $X'_{p\text{до}}$ (умова справедлива лише для сигналу вимірювального пристрою, розташованого на грані робочої поверхні, спрямованої вгору).

Блок КПК (пристрій управління колектором) включає: ПМ – прогнозуючий модуль, що виконує розрахунок номерів напрямків надходження найбільшого випромінювання ($w_1|w_2$ - номери напрямків з найбільшим випромінюванням); ОМ – оптимізуючий модуль, що виконує розрахунок кількості кроків виконавчого механізму для переміщення в напрямку найбільшого випромінювання відносно поточної позиції та синтезує рішення про зміну або ігнорування нового напрямку (w – напрямок, прийнятий на виконання, step - кількість кроків виконавчого механізму (по двом координатам), які необхідно здійснити до нового напрямку, ($E_{\text{п}}$ – енергія, необхідна на переміщення, враховується як потужність електричного двигуна виконавчого механізму, помноженого на час, за який механізм здійснює 1 крок для коригування кута нахилу робочої поверхні колектора на 4.5°)); РУ – модуль розрахунку кута нахилу робочої поверхні (U_k – закон управління $[\varphi_a, \varphi_z]$ – азимутальний та зенітний кут).

Блок ОУК (об'єкт управління - колектор) включає: Мех. – виконавчий механізм прямого ходу, що підтримує обертання штока [111], за 1 крок коригує азимутальний/зенітний кут на 4.5° ($S_{\text{п}}$ – площа активно поглинаючої поверхні у

м^2); РП – робоча поверхня колектора (T_2 – температура води на виході з колектора у $^{\circ}\text{C}$); $X_{\text{вк}}$ – збурювальний вплив на колектор (випромінювання пряме, дифузне, відбите у $\text{Вт}/\text{м}^2$, температура зовнішнього середовища у $^{\circ}\text{C}$).

Засобами ПМ, ОМ та РУ на базі систем нечіткого логічного виведення синтезується закон управління в результаті послідовності операцій:

- 1) проводиться оцінка, що характеризує параметри впливаючого випромінювання;
- 2) проводиться розрахунок витрат енергії на переорієнтування;
- 3) виконується розрахунок кута нахилу робочої поверхні на підставі номера напрямку та кількості кроків між позиціями, що відповідають поточному напрямку та новому напрямку.

При позитивній оцінці прогнозу коригування виконується операція з переорієнтування робочої поверхні. При негативній зміна напрямків ігнорується, і коригування не проводиться.

2.5 Розробка модуля розрахунку кута нахилу робочої поверхні сонячного колектора за годинним кутом схилення сонця

Варто зазначити, що дискретизація сигналу, синтезованого запропонованою моделлю приходу сонячної радіації, дозволяє моделювати сигнал, що відповідає впливу прямого випромінювання Сонця з добовим циклом на 365 днів на рік із загальним модельним часом, що дорівнює 24 дискретним інтервалам. Оскільки Сонце є одним з основних джерел теплового випромінювання (одним з основних впливаючих факторів), синтезовані в моделі значення використовуються в подальшому аналізі при формуванні закону управління інтелектуальною ІАСУ. Імітаційна модель, реалізована в такому вигляді, може бути застосована при налаштуванні програмних систем регулювання положення робочої поверхні колектора, а також підвищить точність роботи слідкуючих систем актуальних промислових зразків, оскільки синтезує погодинні значення сонячної радіації для будь-якої заданої

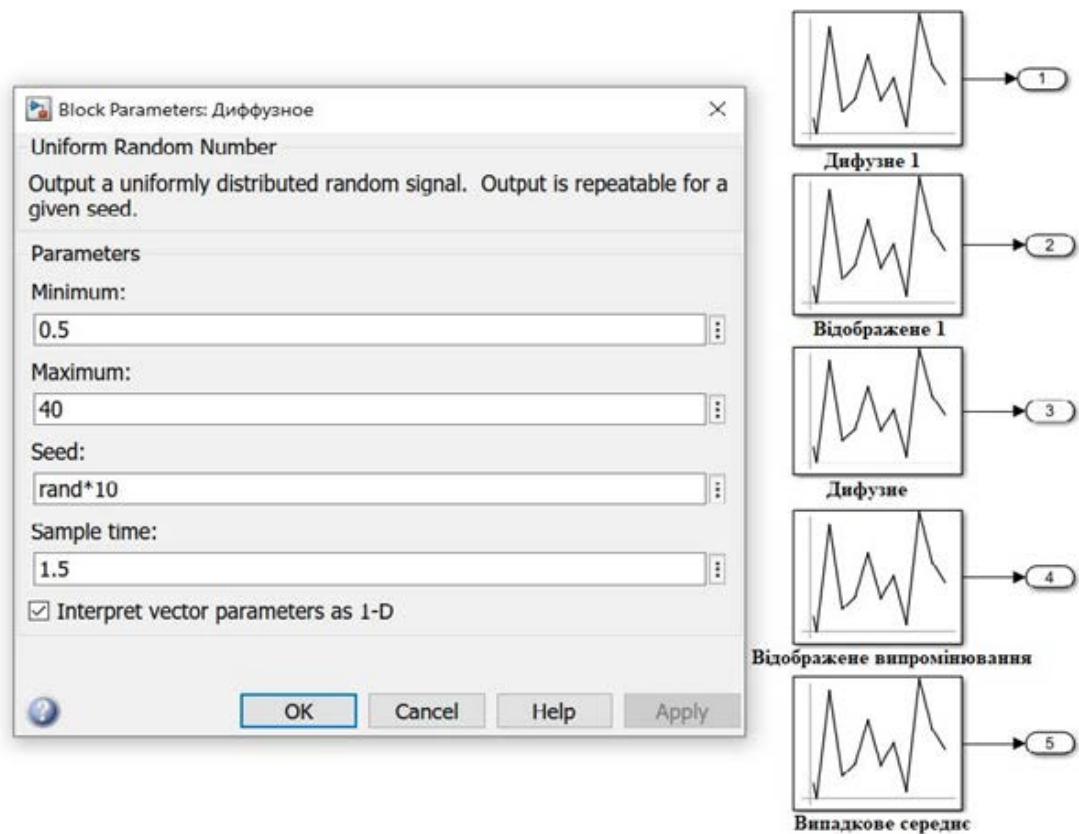


Рисунок 2.7 – Модель впливу випромінювань різних за параметрами джерел теплового випромінювання

При моделюванні, генерується масив випадкових значень щогодини. Результат моделювання представлений на рисунку 2.8.

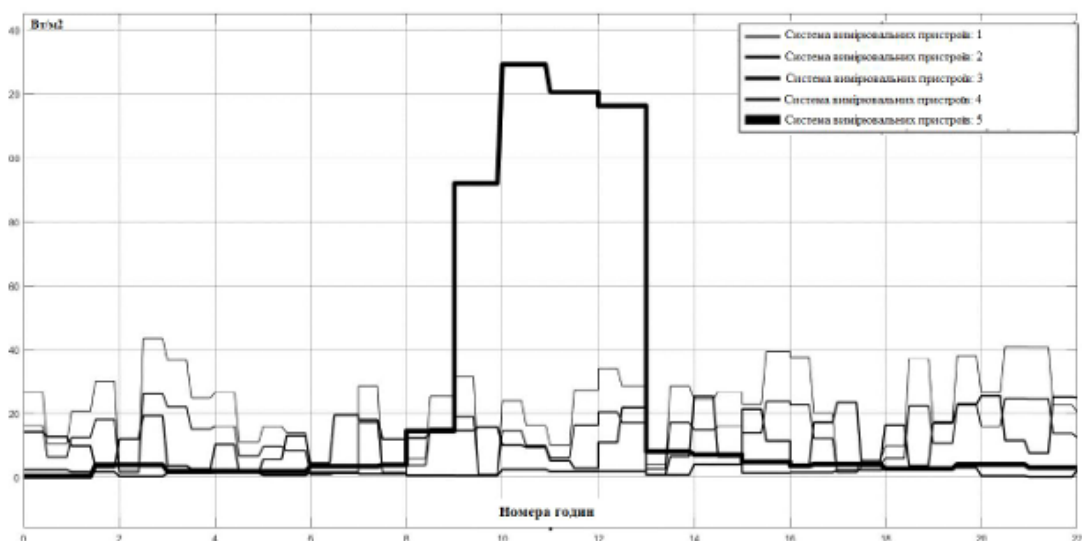


Рисунок 2.8 – Результат моделювань впливу на поверхню прямого, дифузного та відбитого випромінювання з дискретизацією по годинах

Графіки відображають випромінювання різної інтенсивності та протяжності. Змодельовано похмурий січневий день (з максимальним рівнем сонячної радіації 130 Вт/м^2), також змодельовано вплив на поверхню альтернативних випромінювань (дифузного - з максимальними та середніми значеннями для даної території, відбитого - з випадковими значеннями середнього та високого діапазону). Для аналізу впливів, з метою виявлення профілю найбільшого випромінювання, запропоновано процедуру оцінки впливу джерела. Процедура реалізована із застосуванням Fuzzy Logic Toolbox, а також логічних і математичних блоків. На рисунку 2.9 представлена структура розробленого модуля Matlab Simulink, що реалізує процедуру аналізу впливів джерел з метою розрахунку значень найбільшого сукупного випромінювання.

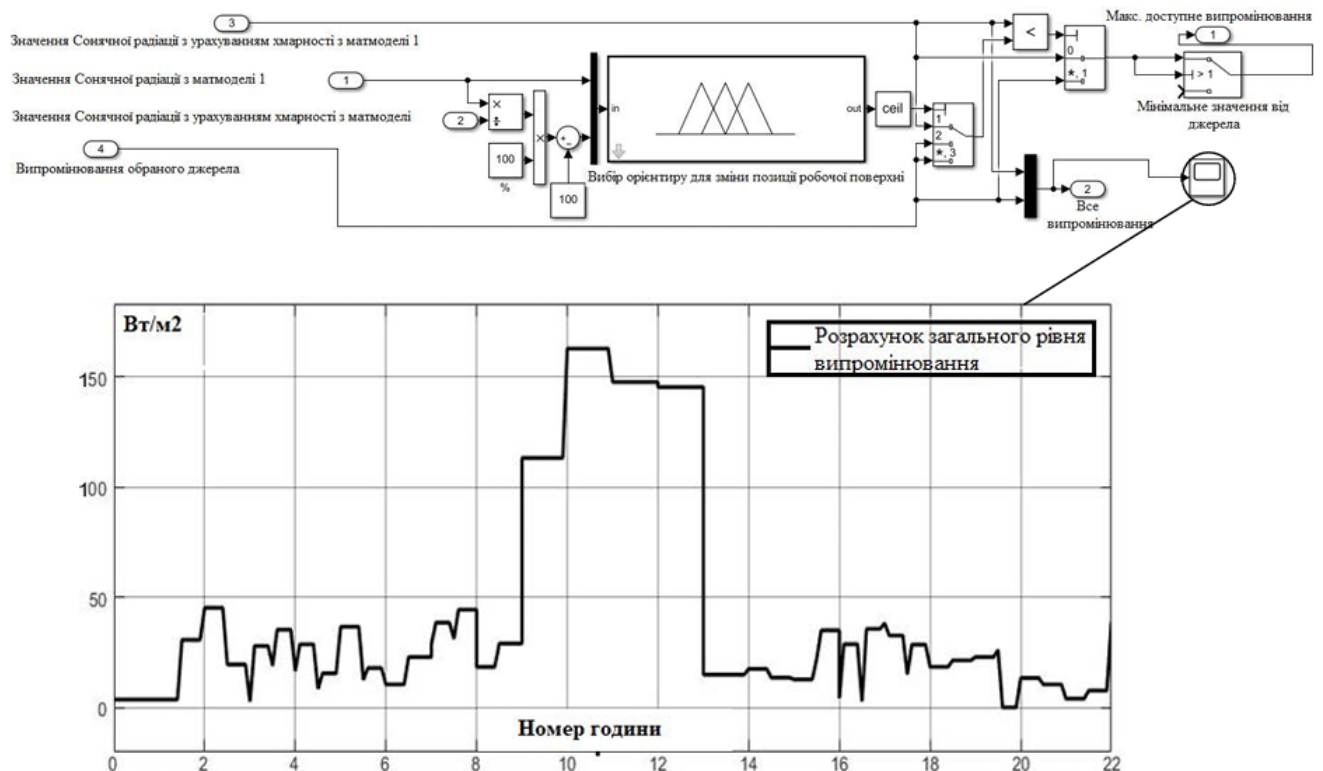


Рисунок 2.9 – Модуль розрахунку найбільшого сукупного випромінювання

На рисунку 2.10 представлено зіставлення результатів

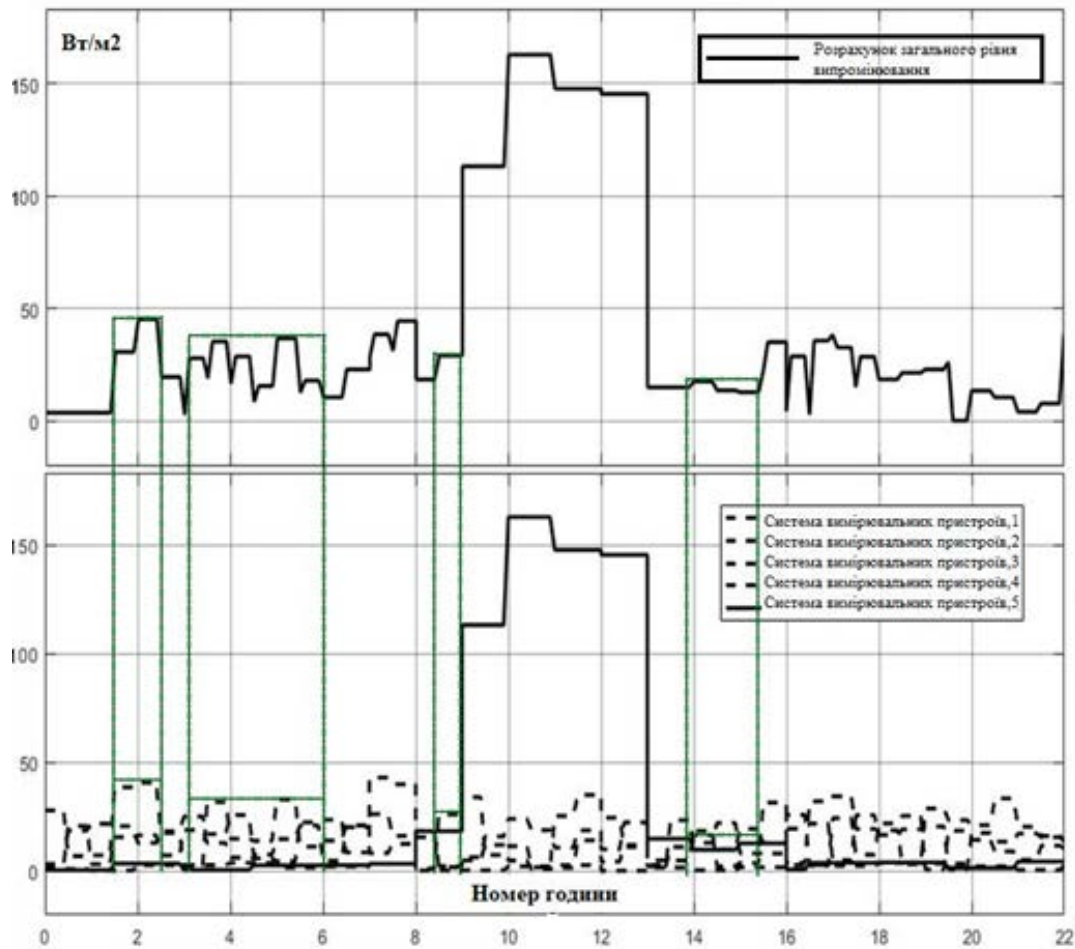


Рисунок 2.10 – Зіставлення графіків, що відображають результати моделювання всього випромінювання та максимального випромінювання

Реалізований модуль дозволяє обчислити максимальне випромінювання, регульоване в одному або кількох напрямках. Застосування Fuzzy Logic Toolbox дозволяє отримати на виході значення сукупного та/або певного випромінювання на основі обробки 5 входів. Залежно від значення випромінювання та рівня його скорочення в процентному співвідношенні синтезується значення, що інтерпретується як керуючий сигнал для перемикача. Високі значення впливу випромінювання з низьким відсотком скорочення завжди пріоритетніші за високе значення з високим відсотком скорочення. На рисунку 2.11 – налаштування входів для нечіткої системи виведення «Оцінка потенціалу випромінювання».

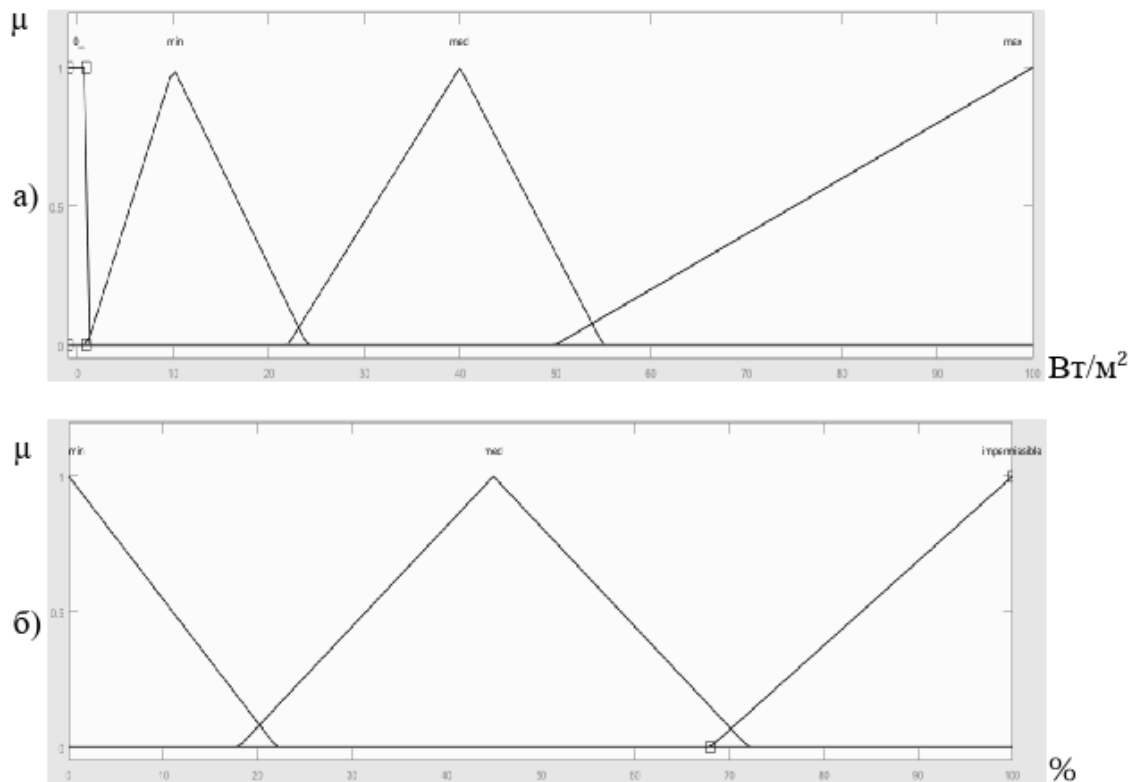


Рисунок 2.11– Входи нечіткої системи «Вибір орієнтиру для зміни позиції робочої поверхні»

В результаті виконання процедури формується набір значень, що відповідає максимальному доступному випромінюванню (прямого, дифузному, відбитому або їхній сукупності). Запропоновані модулі можуть бути застосовані для налаштування та тестування систем регулювання, що входять до складу сонячних трекерів (слідкуючих систем або систем програмного регулювання), зокрема, для тестування та налагодження нової ІАСУ для проведення стресових випробувань нової системи інтелектуальними модулями екстремального регулювання.

Висновки до розділу:

Щоб розкрити потенціал сонячного колектора, необхідно забезпечити функціональну здатність регулювати кут нахилу його робочої поверхні. Інтеграція нахиленої робочої поверхні вакуумного колектора з системою екстремального керування підвищить ефективність колектора в умовах

обмеженого доступу до прямого сонячного випромінювання, особливо вранці та ввечері. Сонячний колектор, який працює з найвищою ефективністю протягом максимальної кількості годин на добу, збільшить тривалість безперервного нагрівання теплоносія між системою котла, включно з котлом/нагрівальним елементом та елементами споживання тепла, що призведе до скорочення часу роботи котла/нагрівального елемента. Отже, чим більше енергії перетворюється з'єднаною підсистемою сонячних колекторів, тим менше енергії витрачається основне джерело (котел). На основі аналізу результатів експериментів та виявленої залежності вартості нагрівання від положення робочої поверхні відносно випромінювання з найвищою інтенсивністю, було сформовано концепцію ІАСУ.

Запропоновано реалізацію імітаційної моделі приходу прямої сонячної радіації на поверхню. Запропоновано реалізацію системи регулювання кута нахилу поверхні колектора за годинним кутом схилення Сонця. Запропоновано модель розрахунку найбільшого випромінювання, що надходить. Отримані результати будуть застосовані у наступній главі при розробці ІАСУ у складі імітаційної моделі системи отримання сукупного випромінювання.

Реалізовані модулі дозволяють обчислити кут нахилу поверхні колектора лише з урахуванням годинного кута схилення Сонця (алгоритм схожий зі слідкуючими та програмними системами регулювання), при цьому ігнорується дифузне та відбите випромінювання, що залежать не тільки від годинного кута сонця, а й від інших факторів, що виникають в результаті стохастичних процесів, що не дозволяє реалізувати функціонал якості запропонованої ІАСУ. Тому в наступній главі будуть запропоновані рішення, спрямовані на синтез керуючого впливу робочою поверхнею сонячного колектора при впливі всього доступного випромінювання.

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Аналіз ефективності алгоритмів нечіткого логічного висновку Sugeno та Mamdani у задачах оптимізації автоматизованих систем стеження

Алгоритми SUGENO та MAMDANI схожі на першому етапі інтеграції в алгоритм експертної системи автоматизованої системи спостереження [15]. Інтеграцію можна описати наступною послідовністю дій:

- Фазифікація вхідних змінних або введення нечіткої логіки. Цей етап пов'язаний з масивом правил, призначених для обробки значень вхідних змінних. Метою фазифікації є отримання істинності для всіх умов з бази правил;
- Агрегування - операція, пов'язана зі структурою правил. Правила можуть бути складеними і включати кілька підумов, пов'язаних логічними операторами (AND, OR тощо). Агрегування - це об'єднання, що передбачає визначення ступеня істинності умов для кожного правила;
- Активізація підвисновків. Етап призначений для визначення мінімальних значень підумов, що відповідають істинності правила;
- Накопичення висновків - операція по визначенню мінімального значення істинності правила при мінімальних значеннях всіх входящих в нього підумов;
- Дефазифікація вихідних змінних - операція, зворотна фазифікації, з метою отримання кількісного значення, яке може бути використане при подальших операціях лінійного алгоритму.

Вказана послідовність операцій справедлива як для алгоритму MAMDANI, так і для SUGENO. Варто зазначити, що всі вони пов'язані з базою правил, яку необхідно сформулювати паралельно з етапом фазифікації або до його проведення.

Основна відмінність між алгоритмами реалізації систем нечіткого логічного висновку полягає в етапі дефазифікації:

У випадку MAMDANI чітке значення вихідної змінної визначається як центр тяжіння для отриманої кривої.

У SUGENO знаходиться конкретне (чітке) значення змінної виводу.

Резюмуючи, можна зробити висновок, що метод MAMDANI добре підходить для систем із людським втручанням. Метод SUGENO краще підходить для математичного аналізу. При проектуванні та реалізації експертних систем, результат яких інтерпретується як керуючий сигнал в автоматизованих системах, доцільно застосовувати алгоритм MAMDANI.

Таблиця 3.1 – Порівняння алгоритмів

MAMDANI	SUGENO
Функція приналежності виходу присутня	Немає вихідної функції приналежності
Чіткий результат досягається за рахунок дефазифікації слідства правил.	Чіткий результат виходить із використанням середньозваженого значення слідства (консеквента)
Системи MISO (кілька входів, один вихід) та MIMO (кілька входів, кілька виходів)	Тільки системи MISO
Інтерпретовані наслідки правил	Втрата інтерпретованості
Найменша гнучкість у проектуванні системи	Більше гнучкості у проектуванні системи

У порівнянні з SUGENO, така система може вимагати більшої обчислювальної потужності через необхідність інтерпретації результату синтезованого виходу. Однак це надає можливість реалізувати інтерфейс, з яким зможе взаємодіяти користувач.

Оскільки автоматизовані системи регулювання положення робочої поверхні сонячного колектора в геліосистемах призначені для роботи з зовнішніми факторами, які неможливо повністю спрогнозувати, необхідно забезпечити інтерфейс, що дозволяє оперативно коригувати роботу системи у

випадку некоректної роботи алгоритму, викликаній впливом непередбачуваного фактора.

3.2 Розробка алгоритму функціонування системи управління геліосистеми інтегрованої з ІАСУ

В основі сучасних сонячних трекерів лежить лінійний алгоритм [13,14,24], який передбачає збір даних про поточне положення Сонця та подальше порівняння значень із базою даних. База даних може формуватися зі статистичних значень, отриманих у реальному часі за допомогою GPS, або синтезованих значень із використанням імітаційних моделей. Кожен підхід має низку переваг, зокрема застосування імітаційної моделі дозволяє синтезувати прогностичні дані та оптимізувати витрати додаткової енергії на переорієнтування робочих поверхонь перетворювачів.

При розв'язанні задачі розробки системи управління, що підтримує роботу з кількома джерелами, використання підходу з імітаційним моделюванням є особливо актуальним. Оскільки процес утворення відбитого випромінювання можна охарактеризувати як стохастичний, прогнозування дозволить оцінити доцільність переорієнтування без додаткових витрат енергії.

Робота з кількома джерелами відбитого випромінювання передбачає послідовність циклів оцінки впливів, які необхідно інтерпретувати, і лише певну множину значень впливів слід використовувати при формуванні закону управління. Для роботи з множинами значень всередині алгоритму застосовано системи нечіткого логічного виводу, інтегровані в лінійний алгоритм після процедури виконання запитів даних від ІЗУ. Результатом роботи нечіткого логічного виводу є агреговані значення, які беруть участь у подальшому виконанні лінійного алгоритму.

З огляду на широкий перелік елементів, що використовуються у структурі алгоритму, пропонується виконати його блок-схему в нотації SDL

[23]. Початок алгоритму спрямований на обробку задавального впливу, яким є процедура «Оптимізувати температуру приміщення». Завдання на оптимізацію може бути сформоване зворотним зв'язком або сутністю «Користувач». У будь-якому випадку ініціюється перевірка задавального впливу, що складається з операцій «Запит даних від ВП об'єктів зберігання енергії» та «Запит даних від користувача».

Користувач може вказати два статуси: «Холодно» або «Спекотно», які додатково перевіряються засобами нечіткого логічного виводу. На вхід подаються дані від користувача, дані датчика температури та норма згідно з СНіП 41-01-2003. Вхід перевіряється правилом:

«Якщо Вхід1: спекотно\холодно й Вхід2: $T_{\text{нос}} = \dots (^{\circ}\text{C})$ ($T_{\text{нос}2}$) й Вхід3:
спекотно\холодно, то...Q»

В результаті перевірки задавального впливу формується діапазон значень параметра Q (об'єм теплової енергії). Значення об'єму теплової енергії прямо пропорційне температурі теплоносія, відповідно, значення даних про температуру визначає діапазон значень параметра, що відображає кількість теплової енергії.

Якщо встановлено, що користувач надає дані «холодно», але датчики температури показують значення у діапазоні «жарко», то буде прийнято рішення не підвищувати значення Q (рішення буде позитивним). На рисунку 3.1 наведено фрагмент алгоритму з оцінкою задавального впливу.

Результати оцінки та значення задавальних впливів агрегуються в рівнянні:

$$Q_e = ((V1 \times (T_{\text{нос}1} - T_{\text{нос}})) - (V2 \times (T_{\text{нос}2} - T_{\text{нос}})))/1000 \quad (3.1)$$

де: Q_e – обсяг теплової енергії (Дж); V1 – параметр витрати носія тепла в трубі, що подає (л/ч). V2 – обсяг витрати води у трубі, що відводить (л/ч); $T_{\text{нос}1}$ – температура теплоносія ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{нос}2}$ – температура теплоносія на виході труби ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{нос}}$ – температура холодної води ($^{\circ}\text{C}$).

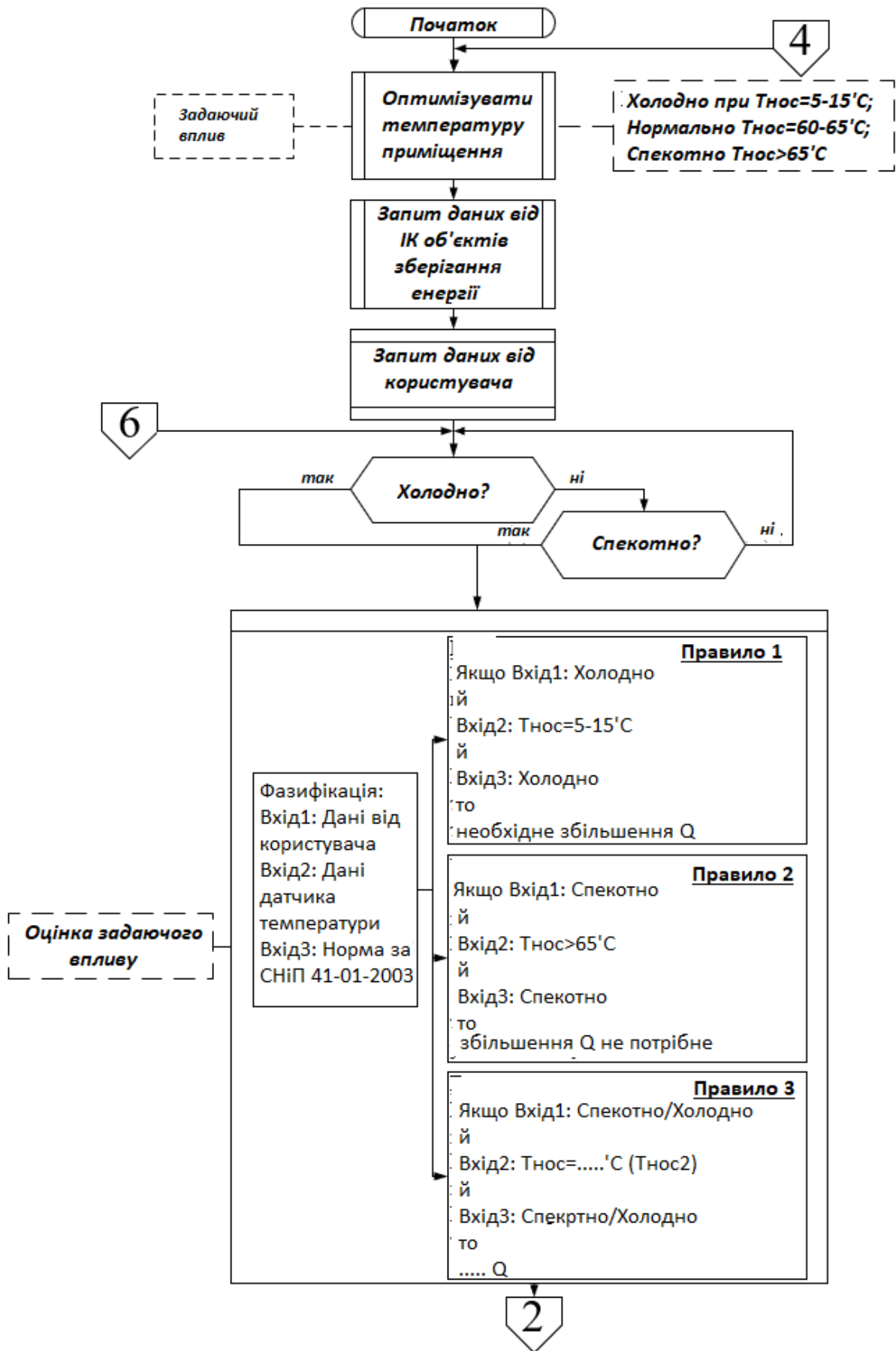


Рисунок 3.1 – Алгоритм обробки впливу

Дане рівняння є первинним розв'язком, і в разі виконання рівності формується послідовність вторинних рішень для визначення джерела енергії, яке забезпечило температуру теплоносія для виконання рівності.

Теплоносій може бути нагрітий за допомогою:

- перетворювача сонячної енергії,
- котла/ТЕНа,
- або гібридного поєднання перетворювача та котла/ТЕНа.

Результати передаються в сховище даних, після чого формується «Запит зворотного зв'язку від користувача».

Якщо температура в приміщенні влаштовує користувача, алгоритм завершується. В іншому випадку через зворотний зв'язок створюється новий запит до користувача («холодно» або «жарко»).

Це рівняння є первинним рішенням, у разі виконання рівності формується послідовність вторинних рішень для виявлення джерела енергії, яке забезпечило температуру теплоносія для виконання рівності. Теплоносій може бути нагрітий засобами перетворювача сонячної енергії, котла/ТЕНу та гібридом із перетворювача та котла/ТЕНу. Результати передаються до сховища даних, після чого формується «Запит зворотного зв'язку від користувача». Якщо температура приміщення влаштовує користувача, алгоритм завершується, в іншому випадку, через зворотний зв'язок створюється новий запит користувачу («холодно» або «жарко»). На рисунку 3.2 наведено фрагмент алгоритму при визначенні джерела (первинне рішення), що забезпечує необхідний обсяг теплової енергії для підтримки заданої температури.

Наведений фрагмент має гілку, пов'язану з використанням лише котла/ТЕНу. Вона ініціює послідовність операцій для мінімізації використання цього джерела. Дії, спрямовані на оптимізацію споживання енергії від різних джерел, реалізовані в гілці алгоритму, ініційованій у разі невиконання рівності в первинному рішенні. Формується запит на розрахунок параметрів стану об'єкта управління під впливом об'єктів зовнішнього середовища засобами імітаційної

моделі. Для зниження обчислювального навантаження проводиться конкретизація запиту через послідовність вторинних рішень «Перетворювач увімкнено?», «Додаткове джерело енергії увімкнено?». При визначенні задіяної частини підсистеми об'єкта управління визначається, яке обчислення необхідно провести, використовуючи елемент імітаційної моделі.

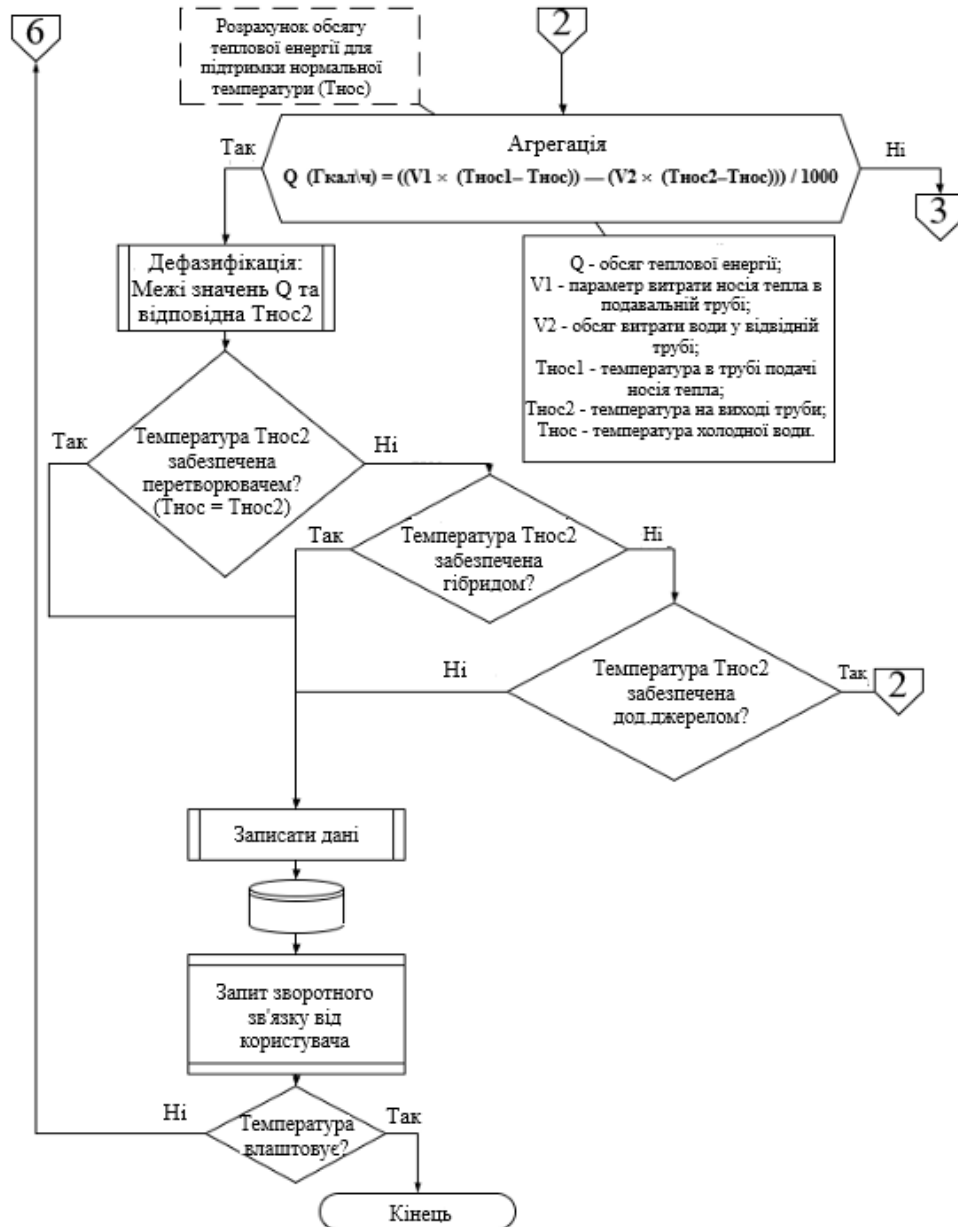


Рисунок 3.2 – Фрагмент алгоритму визначення джерела теплової енергії

На рисунку 33 наведено фрагмент алгоритму, що конкретизує запит на розрахунок параметрів стану об'єкта управління засобами певної частини імітаційної моделі.

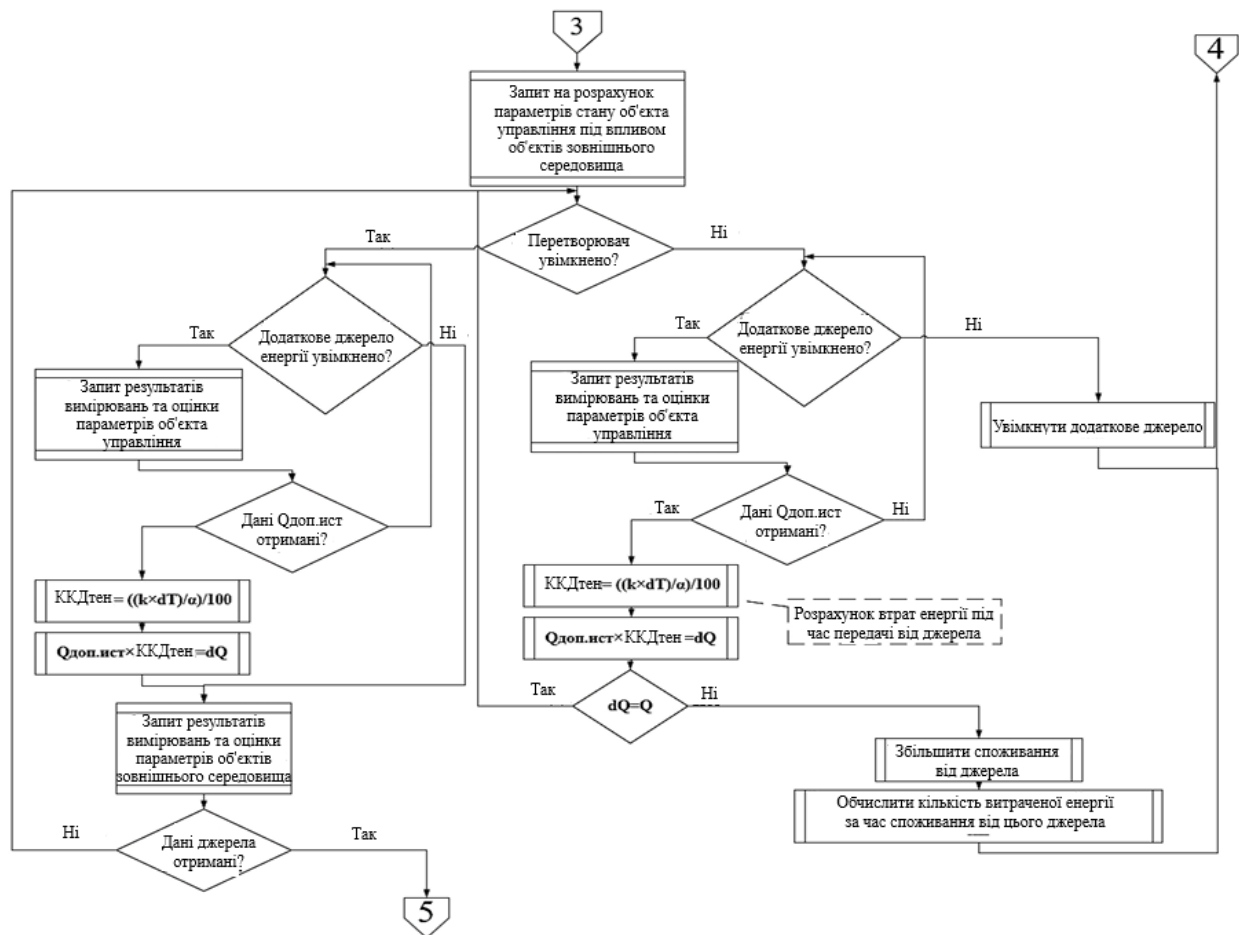


Рисунок 3.3 – Етап обробки запиту застосування імітаційної моделі

Одним із критеріїв оптимізації, що лежать в основі алгоритму роботи розроблюваного модуля управління, є мінімізація використання котла/ТЕНу. Тому перетворювач має бути ввімкнений за замовчуванням, і негативне рішення може бути отримане лише у разі відсутності показань вимірювальних пристроїв, що фіксують показники джерел теплової енергії. Котел/ТЕН за замовчуванням вимкнений і активується за запитом. Геліосистема може працювати в гібридному режимі (теплова енергія від перетворювача та котла/ТЕНу), у режимі від перетворювача (бажаний режим) і тільки від котла/ТЕНу (режим, при якому потрібен пошук рішень з оптимізації). В результаті виконання послідовності обробки запиту визначаються частини імітаційної моделі, де проводиться розрахунок втрат енергії під час передачі від джерела. Якщо перетворювач активовано, формується «Запит результатів вимірювань та оцінки параметрів об'єктів зовнішнього середовища». При отриманні даних про поточне доступне

випромінювання проводиться оцінка потенціалу випромінювання засобами нечіткого логічного виведення. Отримана оцінка направляється до сховища даних і формується рейтинг зареєстрованих впливів випромінювання. Параметри випромінювання з найвищою оцінкою направляються на розрахунок, засобами імітаційної моделі, що складається з послідовності: розрахунок взаємного випромінювання джерела та перетворювача, розрахунок повної кількості теплоти, розрахунок ККД системи передачі тепла/електрики, розрахунок сумарної продуктивності системи, розрахунок температури теплоносія на виході із системи. Значення змінної температури теплоносія (T_{nos1}) повинно виконувати рівність первинного рішення, якщо рівність не виконується, то необхідно задіяти додаткове джерело. На рисунку 3.4 наведено фрагмент алгоритму оцінки випромінювання.

Якщо отримана температура недостатня, а оцінка потенціалу джерела вища за середню, формується «Запит результатів вимірювань позиції центру сукупного випромінювання». Виконується послідовність вторинних рішень для визначення стану датчиків, що відображають задіяну зону робочої поверхні перетворювача.

Після визначення задіяної зони проводиться розрахунок значення параметра «Ф» кутового коефіцієнта. Це значення є підвищувальним коефіцієнтом для повної кількості теплоти, тому система повинна прагнути до збільшення значення Φ . Якщо кутовий коефіцієнт більший за одиницю — положення робочої поверхні ефективне, якщо дорівнює — то ініціюється послідовність операцій для збільшення значення Φ (значення може бути від'ємним, але в такому випадку відбите випромінювання від відбиваючої поверхні не буде зафіксовано, і таке випромінювання не пройде оцінку потенціалу, через що буде ігноруватися системою). Збільшення значення Φ досягається за рахунок регулювання положення робочої поверхні перетворювача.

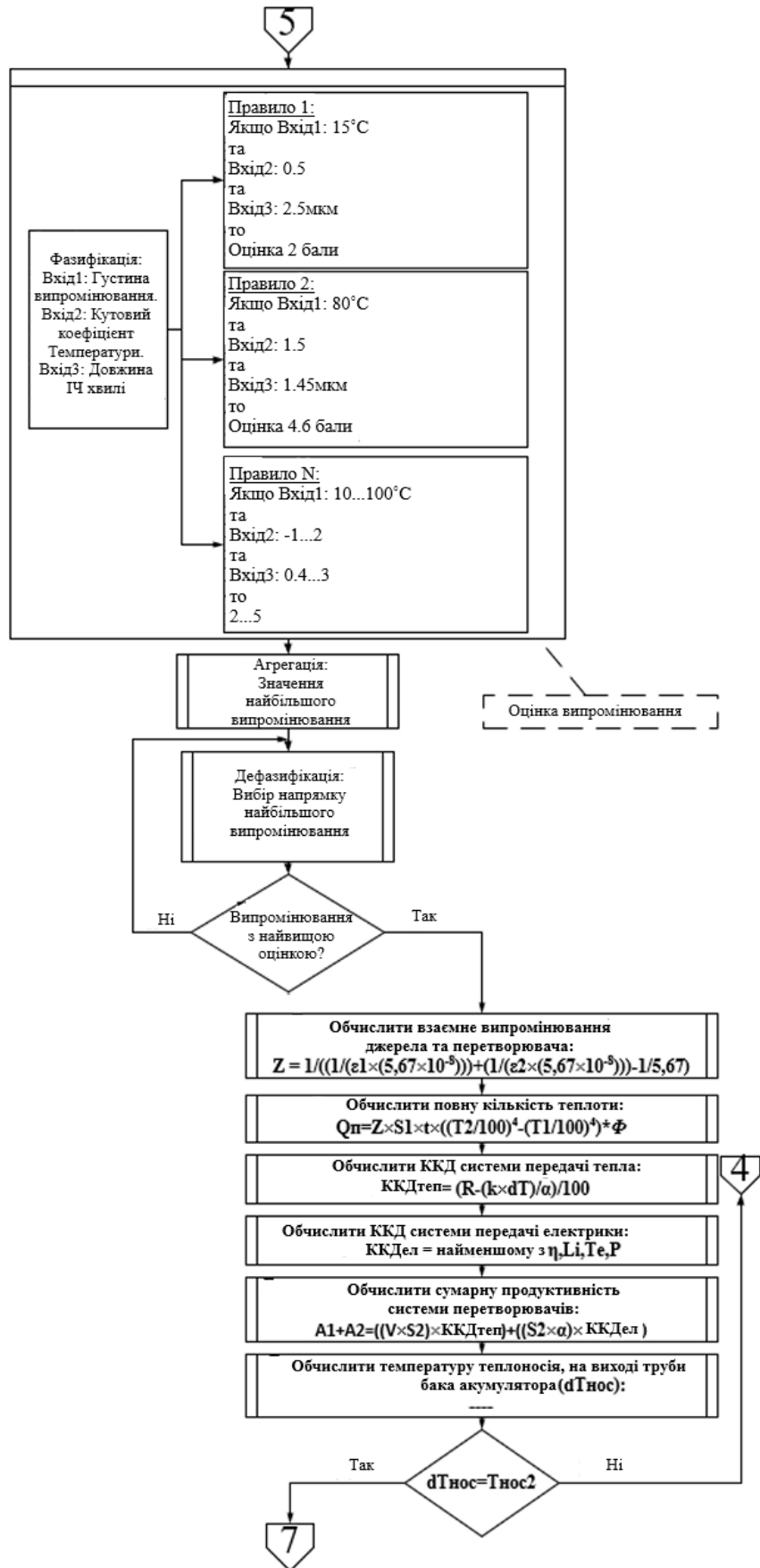


Рисунок 3.4 – Оцінка та розрахунок параметрів впливу джерела теплового випромінювання

Положення змінюється кроковим виконавчим механізмом (відповідно, збільшується споживання додаткової енергії), реєстрація поточного напрямку виконується вимірювальними пристроями, розташованими в 4 зонах по периметру робочої поверхні перетворювача.

На рисунку 3.5 запропоновано фрагмент алгоритму для визначення позиції робочої поверхні перетворювача, вираженої через кутовий коефіцієнт між перетворювачем і джерелом.

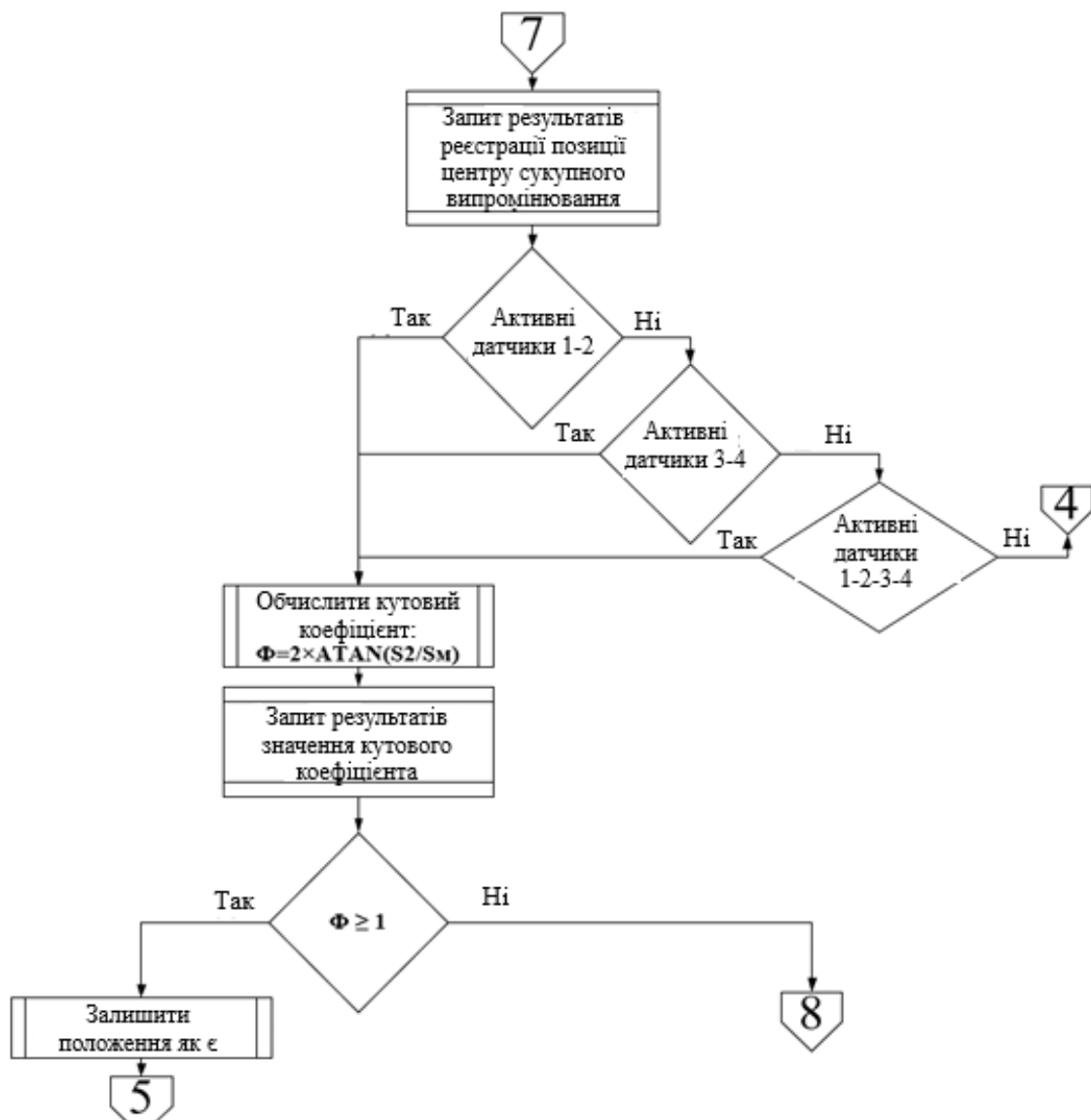


Рисунок 3.5 – Алгоритм визначення позиції робочої поверхні перетворювача

Наступна операція спрямована на оцінку коригуючої дії шляхом визначення співвідношення кутового коефіцієнта та витрат енергії на досягнення потенційного значення. Засобами системи нечіткого логічного виведення проводиться оцінка, що агрегує параметри джерела (виражена оцінкою його потенціалу), витрат енергії на переорієнтування та потенційний кінцевий результат (значення Φ , яке потенційно можливо досягти). При позитивній оцінці коригування виконується операція з переорієнтування робочої поверхні (виконуються кроки виконавчого механізму). Після виконання дії продовжується цикл перевірки позиції центру робочої поверхні перетворювача. Усі негативні рішення направляються до сховища даних і використовуються при наступних циклах оптимізації роботи геліосистеми.

Засобами систем нечіткого логічного виведення проводиться оцінка, що агрегує параметри джерела (виражена оцінкою його потенціалу), витрат енергії на переорієнтування та потенційний кінцевий результат. При позитивній оцінці прогнозу коригування виконується операція з переорієнтування робочої поверхні. Таким чином, синтезується коригуюча дія, спрямована на оптимізацію взаємодії джерел випромінювання та перетворювача.

3.3 Розробка методу оптимізації положення робочої поверхні сонячного колектора

Для реалізації підсистеми оптимізації положення робочої поверхні колектора необхідна конфігурація тримача робочої поверхні, що передбачає переорієнтування центру робочої поверхні за рахунок аналізу даних від Вимірювальних Пристроїв, які фіксують показники випромінювання, що входять до складу конструкції. Також необхідно враховувати кількість енергії на переорієнтування між позиціями робочої поверхні, що відповідають напрямкам випромінювання. Пропонується класифікувати значення зовнішніх впливів на систему ВиП, що характеризують випромінювання за інтенсивністю, напрямком

та кількістю енергії, необхідною для коригування положення робочої поверхні колектора.

Структура класів з іменами - $\{1a...9a, 2b...8b\}$, представлена на рисунку 3.6.

1a	2b
Direction - (left)	Direction - (left down)
Radiation intensity - (...) A	Radiation intensity - (...) A
Step - (...) 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11(0)	Step - (...) 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11(0)
Direction_left - (...) Step	Direction_left down - (...) Step

Рисунок 3.6 – Відображення структури класів оптимальних напрямів

- Ім'я класу з індексом «a»: (1a; 9a) – імена напрямків випромінювання, перпендикулярних до приймаючої поверхні ВП;
- Ім'я класу з індексом «b»: (2b; 8b) – імена напрямків випромінювання по діагоналі від приймаючих поверхонь мінімум двох ВП;
- Інтенсивність випромінювання: струм від фотодіодів – $(X_1, X_2 \dots X_n)$ перетворене в струм (A) випромінювання;
- Кількість кроків: кроки виконавчих механізмів (що регулюють азимутальний та зенітний кут нахилу робочої поверхні колектора) – (0(11); 10), кількість кроків виконавчого механізму прямого ходу, необхідних на зміну поточного положення центру робочої поверхні колектора в напрямку випромінювання з максимальною інтенсивністю.

Таким чином формується задача класифікації значень, що реєструються ВП, за іменами енергоефективних напрямків. Задача класифікації полягає у зіставленні параметрів випромінювання $X = (X_1, X_2 \dots X_n)$ до одного з наперед описаних класів напрямків випромінювання (1a ... 9a, 2b ... 8b).

Таким чином, необхідно виконати класифікацію на основі аналізу нечіткої множини значень.

Для роботи з нечіткими множинами запропоновано використовувати алгоритм налаштування нечіткого логічного виведення MAMDANI, де чіткий

результат досягається за рахунок дефазифікації консеквента правил і при реалізації функції оперативного коригування правил (користувацького інтерфейсу), можливо налаштувати систему для найбільшої ефективності при роботі з певними виконавчими механізмами. На основі аналізу нечітких множин значень, що характеризують пряме, дифузне та відбите випромінювання, буде синтезовано значення, що відповідає напрямку найбільшого випромінювання при оптимальному рівні витрат додаткової енергії на переміщення.

3.4 Розробка алгоритму прогнозуючого та оптимізуючого модуля

Далі на рисунку 3.7 запропоновано інтелектуальний алгоритм на основі м'яких обчислень, що реалізує класифікацію значень, які реєструються ВП, за іменами відповідних напрямків з урахуванням мінімізації витрат енергії на переміщення робочої поверхні. У структуру алгоритму також включена реалізація нечіткого логічного виведення, тому для його візуалізації застосована нотація SDL Diagram, що допускає додавання до структури блок-схеми розділеного процесу, до якого можна віднести реалізацію алгоритму MAMDANI.

Алгоритмом передбачена послідовність умов, що дозволяє встановити стан положення робочої поверхні колектора через визначення комбінації спрацювавших Вимірювальних Пристроїв (ВП) та обчислення кутового коефіцієнта між центром випромінювання і центром робочої поверхні. Далі реалізується підпроцес аналізу даних від визначених ВП засобами системи нечіткого логічного виведення. Дані від ВП проходять етап фазифікації, після чого для аналізу застосовується нечітка база знань.

1. Перша система нечіткого виведення (Класифікація напрямків)

Перша нечітка система призначена для класифікації значень (інтенсивності випромінювання), що реєструються п'ятьма вимірювальними пристроями (ВиП), до одного з попередньо описаних класів напрямків випромінювання.

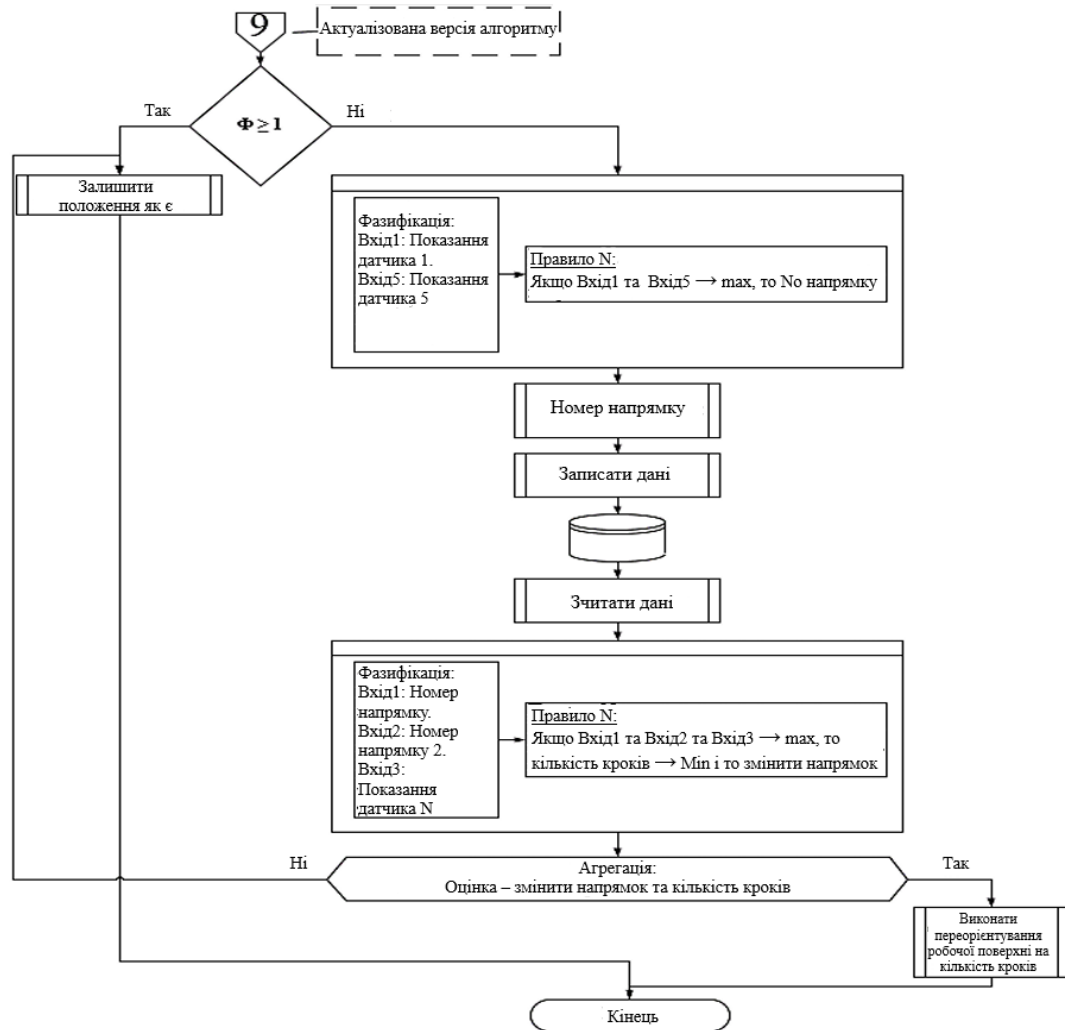


Рисунок 3.7 – Алгоритм «синтез рішення про переорієнтування»

Приклади правил із бази знань першої системи нечіткого виведення:

ЯКЩО

X1 = «max» та X2 = «max» та X3 = «min» та X4 = «min» та X5 = «min», то Y = class 2b;

ЯКЩО

X1 = «min» та X2 = «min» та X3 = «min» та X4 = «mid» та X5 = «min», то Y = class 7a;

ЯКЩО

X1 = «min» та X2 = «mid» та X3 = «max» та X4 = «max» та X5 = «min», то Y = class 9a;

Синтезовані системою нечіткого виведення значення – «номери напрямків» записуються у сховище даних, а потім зчитуються та подаються на вхід наступної системи нечіткого виведення.

2. Друга система нечіткого виведення (Оцінка доцільності переорієнтування)

Друга нечітка система призначена для синтезу оцінки рівня випромінювання в новому напрямку. Для цього на вхід подається:

- Номер поточного напрямку (X_1).
- Номер напрямку з найбільшим випромінюванням (X_2).
- Дані датчиків, що реєструють найбільше випромінювання (у новому напрямку) (X_3).

Система має схожий принцип формування бази знань, але з одним важливим відмінністю: номери позицій (класи) порівнюються між собою за кількістю кроків, необхідних виконавчим механізмам для здійснення переорієнтування.

Таким чином, друга нечітка система має два виходи (Y_1 і Y_2):

Y_1 : Кількість кроків на зміну положення між напрямками.

Y_2 : Оцінка доцільності зміни напрямку (за шкалою від 1 до 2, де 2 – однозначно міняти напрямок, 1 – однозначно не міняти напрямок).

Приклади правил із бази знань другої системи нечіткого виведення:

ЯКЩО

$X_1 = \text{«9»}$ та $X_2 = \text{«1»}$ та $X_3 = \text{«max»}$, то $Y_1 = 1$ та $Y_2 = 2$;

ЯКЩО

$X_1 = \text{«2»}$ та $X_2 = \text{«8»}$ та $X_3 = \text{«min»}$, то $Y_1 = 10$ та $Y_2 = 1$;

ЯКЩО

$X_1 = \text{«4»}$ та $X_2 = \text{«5»}$ та $X_3 = \text{«mid»}$, то $Y_1 = 4$ та $Y_2 = 2$;

Представлений інтелектуальний алгоритм на основі м'яких обчислень реалізує класифікацію значень, що реєструються ВП, за іменами відповідних напрямків з урахуванням мінімізації витрат енергії на переміщення робочої поверхні через розрахунок кількості кроків виконавчих механізмів (кожен крок збільшує витрати додаткової енергії), необхідних при переорієнтуванні робочої поверхні і синтез значень, що обмежують зміну напрямків при низьких значеннях співвідношення кількості кроків на потенційну енергію в новому напрямку.

3.5 Реалізація прогнозуючого та оптимізуючого модуля

Структура реалізованого модуля Інтелектуальної Автоматизованої Системи Управління (ІАСУ) включає дві системи нечіткого логічного виведення. Характеристика системи «Analysis of radiation» наведена на рисунку 3.8.

[System]				
Name=' Analysis of radiation'				
Type='Mamdani'				
Version=2.0				
NumInputs=5				
NumOutputs=1				
NumRules=1024				
AndMethod='min'				
OrMethod='max'				
ImpMethod='min'				
AggMethod='max'				
DefuzzMethod='centroid'				
[Input1]	[Input2]	[Input3]	[Input4]	[Input5]
Name=' X1'	Name=' X2'	Name=' X3'	Name=' X4'	Name=' X5'
Range= [0 100]	Range= [0 100]	Range= [0 100]	Range= [0 100]	Range= [0 100]
NumMFs=4	NumMFs=4	NumMFs=4	NumMFs=4	NumMFs=4
MF1='1':trimf, [0 0 0]	MF1='1':trimf, [0 0 0]	MF1='1':trimf, [0 0 0]	MF1='1':trimf, [0 0 0]	MF1='1':trimf, [0 0 0]
MF2='2':trimf, [1 16.01 20]	MF2='2':trimf, [1 16.01 20]	MF2='2':trimf, [1 16.01 20]	MF2='2':trimf, [1 16.01 20]	MF2='2':trimf, [1 16.01 20]
MF3='3':trimf, [20.01 50 60]	MF3='3':trimf, [20.01 50 60]	MF3='3':trimf, [20.01 50 60]	MF3='3':trimf, [20.01 50 60]	MF3='3':trimf, [20.01 50 60]
MF4='4':trimf, [60.01 90 101]	MF4='4':trimf, [60.01 90 101]	MF4='4':trimf, [60.01 90 101]	MF4='4':trimf, [60.01 90 101]	MF4='4':trimf, [60.01 90 101]
[Output1]				
Name='Y'				
Range= [1 10]				
NumMFs=9				
MF1='1':trapmf, [1.1 1.1 1.2 1.2]				
MF2='2':trapmf, [2.1 2.1 2.2 2.2]				
MF3='3':trapmf, [3.1 3.1 3.2 3.2]				
MF4='4':trapmf, [4.1 4.1 4.2 4.2]				
MF5='5':trapmf, [5.1 5.1 5.2 5.2]				
MF6='6':trapmf, [6.1 6.1 6.2 6.2]				
MF7='7':trapmf, [7.1 7.1 7.2 7.2]				
MF8='8':trapmf, [8.1 8.1 8.2 8.2]				
MF9='9':trapmf, [9.1 9.1 9.2 9.2]				
[Rules]				
Example:				
2 1 1 1 1, 1 (1): 1				
...				
Total 1024 rules				

Рисунок 3.8 - Характеристика системи «Analysis of radiation»

На рисунку 3.9 наведено структуру модуля прийняття рішення про зміну напрямку робочої поверхні сонячного колектора.

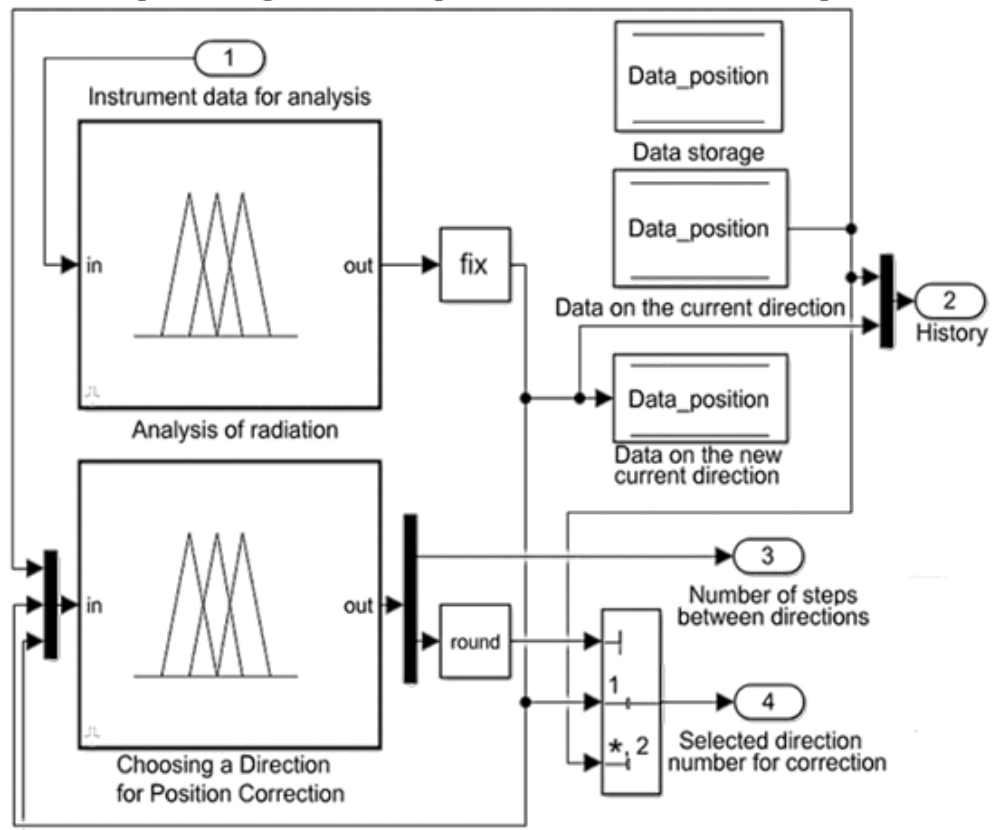


Рисунок 3.9 – Структура модуля прийняття рішення про зміну напрямку

На рисунку 3.9 відображено реалізацію другої частини алгоритму, оскільки перша частина реалізується стандартною логічною послідовністю визначення значення. Системи нечіткого логічного виведення синхронізуються блоками запису та читання даних, що дозволяють реалізувати функцію запису послідовно спрогнозованих номерів напрямків (історію напрямків). Значення, синтезоване другою нечіткою системою, подається на вхід перемикача сигналу, що реалізує виконання умови «Оцінка – змінити напрямок та кількість кроків»..

Характеристика системи нечіткого логічного висновку Choosing a Direction for Position Correction представлена на рис.3.10

[System]		
Name=' Choosing a Direction for Position Correction '		
Type='Mamdani'		
Version=2.0		
NumInputs=3		
NumOutputs=2		
NumRules=1790		
AndMethod='min'		
OrMethod='max'		
ImpMethod='min'		
AggMethod='max'		
DefuzzMethod='centroid'		
[Input1]	[Input2]	[Input3]
Name='Y1'	Name='Y2'	Name='X'
Range= [0 10]	Range= [0 10]	Range= [0 100]
NumMFs=9	NumMFs=9	NumMFs=3
MF1='1':trapmf, [1.1 1.1 1.2 1.2]	MF1='1':trapmf, [1.1 1.1 1.2 1.2]	MF1='low':trimf, [0 0 25]
MF2='2':trapmf, [2.1 2.1 2.2 2.2]	MF2='2':trapmf, [2.1 2.1 2.2 2.2]	MF2='medium':trimf, [25 40 60]
MF3='3':trapmf, [3.1 3.1 3.2 3.2]	MF3='3':trapmf, [3.1 3.1 3.2 3.2]	MF3='high':trimf, [60 100 100]
MF4='4':trapmf, [4.1 4.1 4.2 4.2]	MF4='4':trapmf, [4.1 4.1 4.2 4.2]	
MF5='5':trapmf, [5.1 5.1 5.2 5.2]	MF5='5':trapmf, [5.1 5.1 5.2 5.2]	
MF6='6':trapmf, [6.1 6.1 6.2 6.2]	MF6='6':trapmf, [6.1 6.1 6.2 6.2]	
MF7='7':trapmf, [7.1 7.1 7.2 7.2]	MF7='7':trapmf, [7.1 7.1 7.2 7.2]	
MF8='8':trapmf, [8.1 8.1 8.2 8.2]	MF8='8':trapmf, [8.1 8.1 8.2 8.2]	
MF9='9':trapmf, [9.1 9.1 9.2 9.2]	MF9='9':trapmf, [9.1 9.1 9.2 9.2]	
[Output1]		
Name='Y11'		
Range= [-1 11]		
NumMFs=11		
MF1='1':trapmf, [1.1 1.1 1.2 1.2]		
MF2='2':trapmf, [2.1 2.1 2.2 2.2]		
MF3='3':trapmf, [3.1 3.1 3.2 3.2]		
MF4='4':trapmf, [4.1 4.1 4.2 4.2]		
MF5='5':trapmf, [5.1 5.1 5.2 5.2]		
MF6='6':trapmf, [6.1 6.1 6.2 6.2]		
MF7='7':trapmf, [7.1 7.1 7.2 7.2]		
MF8='8':trapmf, [8.1 8.1 8.2 8.2]		
MF9='9':trapmf, [9.1 9.1 9.2 9.2]		
MF10='10':trapmf, [10.1 10.1 10.2 10.2]		
MF11='0(11)':trapmf, [0.1 0.1 0.2 0.2]		
[Output2]		
Name='Y12'		
Range= [0 3]		
NumMFs=2		
MF1='NO':trapmf, [1.1 1.1 1.9 1.9]		
MF2='YES':trapmf, [2.1 2.1 2.9 2.9]		
[Rules]		
Example:		
9 5 3, 10 2 (1): 1		
9 7 3, 10 2 (1): 1		
1 3 1, 1 2 (1): 1		
1 3 1, 2 1 (1): 1		
1 3 1, 3 1 (1): 1		
...		
Total 1790 rules		

Рисунок 3.10 - Характеристика системи Choosing a Direction for Position Correction.

Дана система має два виходи. Синтезовані значення, що відповідають кількості кроків, не округлюються, тим самим, зміна позицій буде більш плавною, оскільки число кроків, виражене значенням з точкою, дозволить

застосувати виконавчі механізми, що допускають виконання неповного кроку. Другий вихід синтезує значення, що відповідає оцінці переорієнтування. Значення доцільності, близькі до 1, означають, що переорієнтування не вимагається, значення, близькі до 2, означають, що виконавчим механізмам слід виконати кількість кроків у певному напрямку, отриманих у першому виході цієї системи.

Застосування блоку «Rounding» до другого виходу (і реалізація функції оперативного налаштування його параметрів) дозволить оперативно змінювати пріоритет системи при прийнятті рішення і, у разі застосування більш енергоємних виконавчих механізмів, - бути більш вимогливою при синтезі позитивного рішення.

Візуалізація результатів функціонування запропонованого інтелектуального модуля представлена двома лініями, що характеризують синтезовані модулем значення з дискретизацією за інтервалами модельного часу в Matlab Simulink, де 1 інтервал дорівнює астрономічній годині.

На рисунку 3.11 наведено результати роботи системи під час тестування.

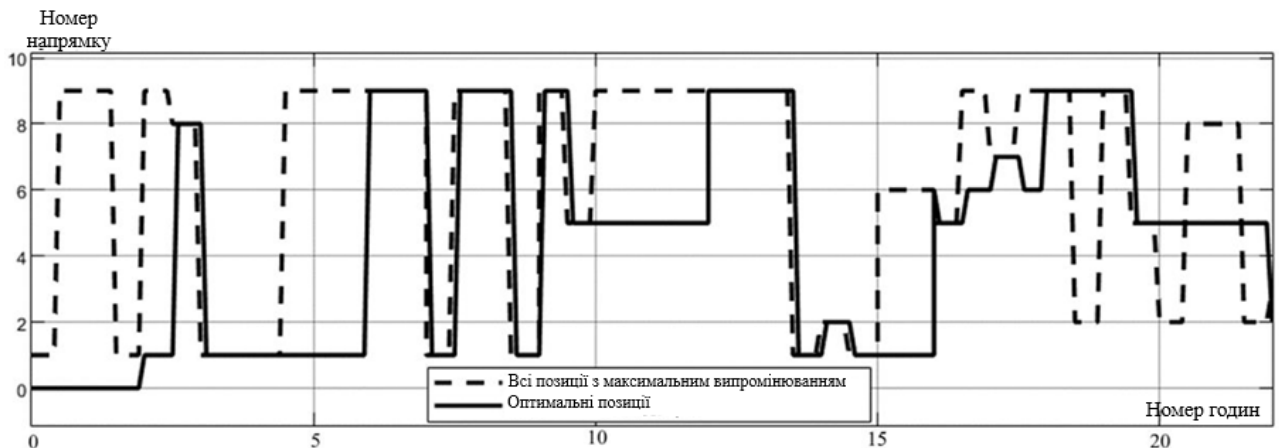


Рисунок 3.11 – Результат тестування реалізованого інтелектуального модуля прийняття рішення про зміну положення робочої поверхні

Пунктирною лінією відображено значення, що відповідають номерам напрямків з прогнозним найбільшим випромінюванням, суцільною лінією відображено значення оптимальних номерів напрямків. Представлені на рисунку

графіки проінтегровані за модельним часом, де один інтервал дорівнює астрономічній годині.

3.6 Реалізація інтелектуальної автоматизованої системи управління у складі розробленої імітаційної моделі

Запропонована ІАСУ передбачає роботу під впливом прямого, дифузного та відбитого випромінювання, підхід до моделювання яких розглянуто у главі 2. З метою отримання найбільш об'ємного масиву статистичних даних про роботу запропонованої системи, доцільно реалізувати модель, здатну забезпечити проведення експериментів над регульованими перетворювачами з інтегрованою ІАСУ.

Загальний вигляд реалізованої імітаційної моделі представлено в додатку А. Модель включає: модуль синтезу значень рівня хмарності, модуль синтезу значень теплового випромінювання джерел різного типу, модуль фізично коректної моделі системи ВП, модуль синтезу значень прямої сонячної радіації, в тому числі з урахуванням рівня хмарності, модуль інтелектуальної ІАСУ, що синтезує значення оптимального напрямку робочої поверхні колектора, модуль розрахунку загального рівня випромінювання від усіх джерел, що підтримує функцію визначення максимального загального випромінювання, модуль розрахунку кута нахилу робочої поверхні, актуалізованого за напрямком Сонця, модуль розрахунку кута обертання робочої поверхні перетворювача для зміни напрямку, модулі розрахунків кутів нахилу робочої поверхні по двох осях, блоки Matlab Simulink - Specialized Power Systems для фізично коректного моделювання перетворення випромінювання сонячною панеллю.

ВП змодельовані засобами Matlab Simulink (бібліотека Simscape Electrical). На рисунку 3.12 представлено загальний вигляд фізично коректної моделі системи фотомодулів.

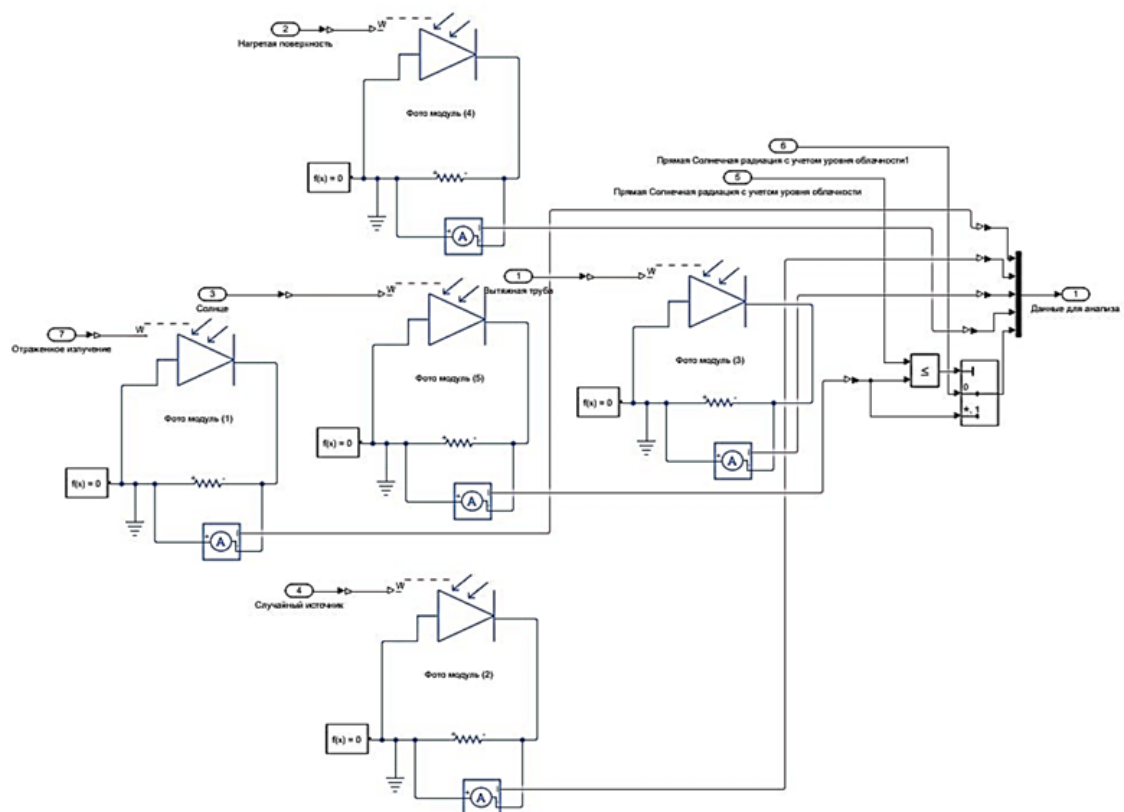


Рисунок 3.12 – Модель ВП

Модулі реалізують розрахунок за формулою:

$$I_p(A) = \text{Поріг чутливості } \varphi \times \text{випромінювання } X_n,$$

де: струм, перетворений фотомодулем I_p вимірюється в (А); поріг чутливості φ вимірюється в ($\text{м}^2 \times \text{А/Вт}$); випромінювання вимірюється в (Вт/м^2). Згенеровані значення випромінювання перетворюються на значення струму і подаються на вхід інтелектуального «Analysis of radiation».

Інтелектуальні модулі доповнені блоком «Multi Switch», що імітує перемикання між джерелами, таким чином імітується, в тому числі, вплив сукупного випромінювання джерел у кількох напрямках.

Аналіз типів вакуумних трубок представлено в роботах [1,2,62]. Сонячні колектори на базі вакуумних перових трубок характеризуються високою ефективністю (зокрема, за рахунок покращених оптичних характеристик, властивих скляним колбам, що входять до їхньої конструкції). Підвищена ефективність відносно коаксіальних трубок також пов'язана з такими

особливостями: застосована поглинаюча пластина, що безпосередньо передає поглинену енергію випромінювання тепловому каналу; відбиття випромінювання, що впливає, знижено, оскільки застосована колба з одинарною стінкою; модульність конструкції, що спрощує обслуговування колектора; деякі промислові зразки мають 77% ККД.

Новий вакуумний колектор передбачає підтримку зміни напрямку центру робочої поверхні. Кожна зміна напрямків пов'язана з додатковими витратами енергії на роботу виконавчих механізмів, що коригують кут повороту центру колектора відносно початкової позиції. Тому доцільно передбачити як програмну, так і апаратну підтримку енергозберігаючих модулів.

Оскільки основним джерелом енергії для перетворення є пряме випромінювання сонця, то як енергозберігаючі модулі будуть використані сонячні панелі. Вони підходять для перетворення випромінювання в електричну енергію, яка буде використовуватися виконавчими механізмами, а в разі надлишку - енергія буде акумулюватися іншими елементами геліосистеми, з якою сполучений колектор.

Сонячні панелі є допоміжними модулями, спрямованими на мінімізацію витрат додаткової енергії на переорієнтування робочої поверхні колектора, і повинні займати меншу частину робочої поверхні. На рисунку 3.13 наведено конструкцію робочої поверхні вакуумного колектора з енергозберігаючими модулями.

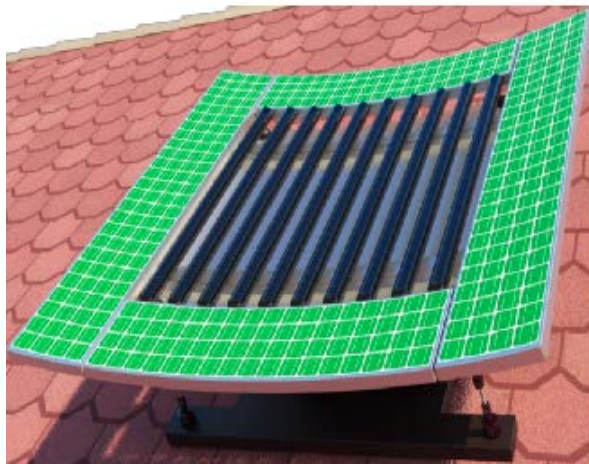
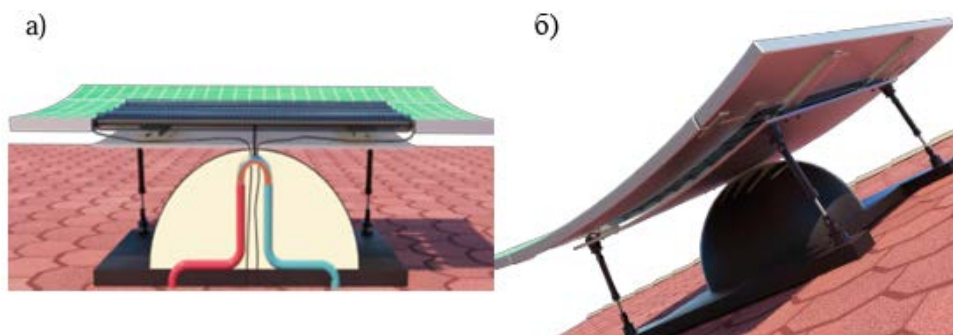


Рисунок 3.13 – Запропонована конфігурація робочої поверхні

Сонячні панелі встановлені на металевому профілі, який кріпиться до відбивача, розташованого під вакуумними трубками. Відбивач має увігнуту форму, радіус вигину відповідає радіусу основи у вигляді півсфери. На рисунку 45 – основа нового колектора.

Пропонований варіант кріплення дозволяє не розбирати конструкцію цілком, а замінювати елементи окремо, що в тому числі спрощує чищення пристрою під час експлуатації. З рисунка також видно масивну основу у вигляді півсфери. Вона є основною опорою для робочої поверхні, вага якої може доходити до 70 кг (з урахуванням ваги самої робочої поверхні та потенційного накопичення опадів).

Основне призначення вакуумного колектора — це перетворення теплової енергії, тому основну частину робочої поверхні повинні займати вакуумні трубки, при цьому з метою мінімізації тепловтрат довжина ділянки від вакуумних трубок до теплообмінника має бути мінімальною. Для дотримання цих критеріїв запропоновано розташувати трубки по центру поверхні тримача та виконати їх симетричними, а колбу з тепловою трубкою, пов'язаною з теплообмінником, вивести в центр конструкції. На рисунку 46 запропоновано основу нової конфігурації сонячного колектора.



а) підстава у розрізі; б) загальний вид основи

Рисунок 3.14 – Підстава для нової конфігурації сонячного колектора

Структура вакуумних трубок та принцип роботи відповідають типу трубок «Heat Pipes» [20], з відмінністю лише у розташуванні колби з тепловою трубкою «Heat Pipe Bulb». Таке рішення дозволить забезпечити нахили робочої поверхні

в будь-якому напрямку, на відміну від стандартних вакуумних колекторів з «Heat Pipes», кут нахилу яких обмежений одним напрямком, оскільки теплообмінник знаходиться на одному з кінців трубки, а для ефективного термодинамічного процесу всередині вакуумної трубки теплоносії повинен накопичуватися в її нижній частині. Така структура вакуумних трубок передбачає сполучення з теплообмінником через центральну частину конструкції.

У новій конструкції запропоновано інтегрувати шар теплоізоляції з теплообмінником в основу, що забезпечить найменшу протяжність зони сполучення для передачі енергії (теплотраси). Крім того, запропонована конструкція підійде для монтажу нових вакуумних колекторів на даху обігріваних об'єктів. На рисунку 3.15 запропонована схема встановлення нової конфігурації сонячного колектора.



Рисунок 3.15 – Схема підключення нової конфігурації

Новий вакуумний сонячний колектор із запропонованою конфігурацією підтримує різні виконавчі механізми (пневматичні, гідравлічні або електричні виконавчі механізми прямого ходу), що забезпечують коригування напрямку робочої поверхні в дев'яти напрямках. Коригування напрямку центру поверхні дозволить перетворювати енергію від сукупного теплового випромінювання (прямого, дифузного, відбитого). Для дослідження ефективності запропонованих рішень реалізовано функціональний зразок, що підтримує коригування напрямків робочої поверхні в результаті роботи автоматизованої системи стеження за джерелами теплового випромінювання.

На рисунку 3.16 наведено імітаційну модель зміни кута нахилу робочої поверхні колектора, інтегровану з ІАСУ, реалізовану в Matlab Simulink. Модель призначена для обчислення кута нахилу робочої поверхні на основі синтезованих значень напрямку найкращого (на основі виведення запропонованої інтелектуальної системи) випромінювання та кількості кроків до нової позиції. Розрахунок кута повороту (азимутального φ_a) та кута нахилу (зенітного φ_z) виконується на основі обраного системою номера напрямку. Кожному напрямку відповідає кількість кроків для переходу з попереднього положення. Кроки зміщують зенітний та азимутальний кут у діапазоні від -45° до 45° і від -45° до 135° відповідно. Алгоритм розрахунку значень кутів реалізований із застосуванням логічних послідовностей, сформованих із блоків «Logical operator», «Compare to constant», «Multi Switch», «Switch» та математичних операторів, також застосована процедура збереження результату попереднього обчислення, запропонованого при формуванні історії напрямків (за допомогою системи блоків «Data Store Memory»).

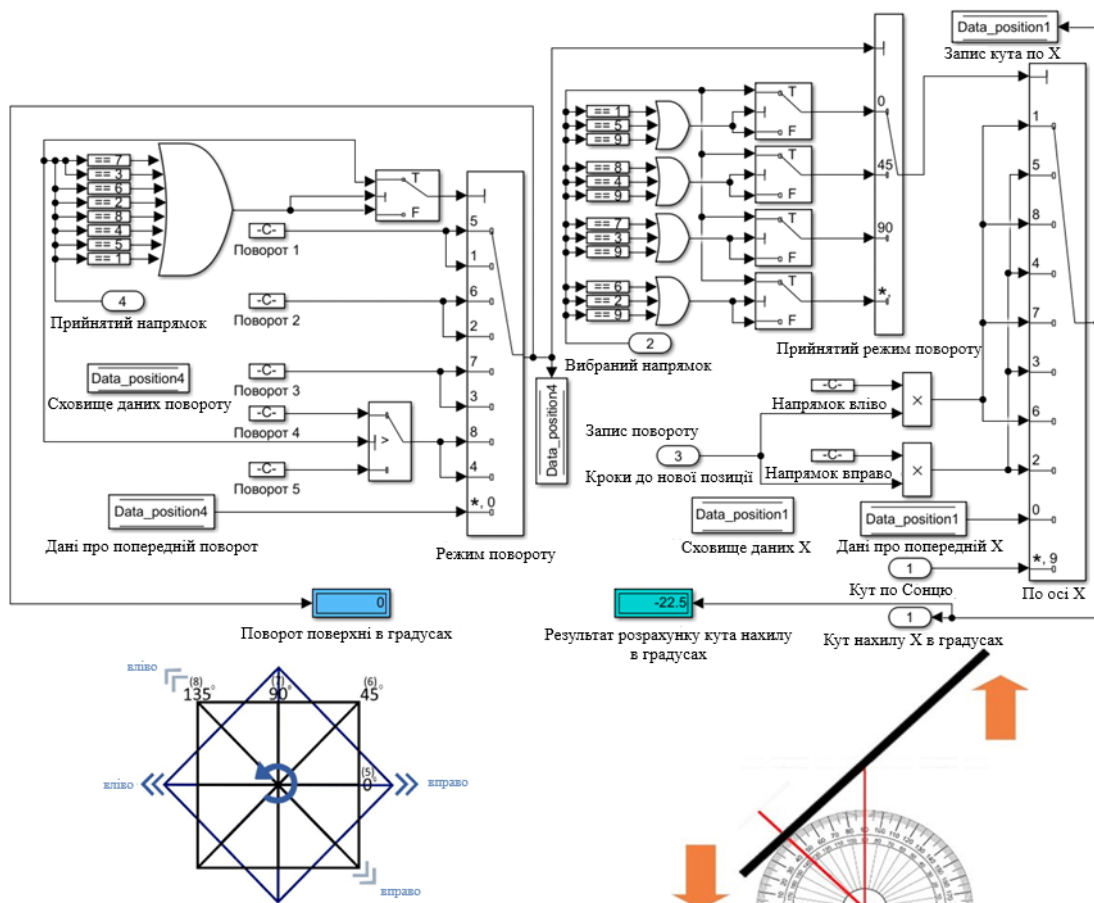


Рисунок 3.16— Імітаційна зміна кута нахилу робочої поверхні колектора, інтегрована з IACU

Для дослідження результатів імітаційного моделювання розроблено допоміжні блоки візуалізації даних, зокрема, модуль розрахунку загального рівня випромінювання від усіх джерел, що підтримує функцію визначення максимального сукупного випромінювання. Дані про зовнішні впливи змодельовані за допомогою блоків «Uniform Random Number», профілі блоків налаштовані для імітування різних типів випромінювань, таких як: пряме випромінювання сонця (максимальна інтенсивність 800 Вт/м^2 , частота зміни по годинах), дифузне випромінювання (максимальна інтенсивність 80 Вт/м^2 , частота від 5 хвилин), відбите випромінювання (випадкове значення від 1 Вт/м^2 до 800 Вт/м^2 з частотою зміни від 1 хвилини).

Запропонована IACU дозволяє підвищити ефективність процесу перетворення тепла і має найбільший потенціал саме для зимового періоду з

коротким сонячним днем, що підвищує доцільність застосування запропонованих рішень при експлуатації актуальних геліосистем у регіонах зі зниженими температурами.

Висновки до розділу:

У розділі запропоновано метод оптимізації процесу перетворення енергії геліосистемою із запропонованою конфігурацією колектора на базі алгоритмів нечіткого логічного виведення.

Мета методу оптимізації – орієнтування центру робочої поверхні в напрямку максимального випромінювання (Вт/м^2) з мінімальною кількістю витрат енергії на переорієнтування (Втгод).

Запропоновано інтелектуальний алгоритм оптимізації положення поверхні вакуумного сонячного колектора, побудований на базі методів м'яких обчислень, що забезпечує синтез значень із прийнятною точністю зі значним скороченням обчислювального навантаження, що дозволяє реалізувати підсистему прогнозу ефективності роботи колектора, який перебуває під впливом випадкових теплових випромінювань.

Алгоритм ІАСУ реалізовано у вигляді моделі в Matlab Simulink. Результати тестів на запропонованій моделі показують, що запропонований інтелектуальний алгоритм дозволяє визначити оптимальний напрямок робочої поверхні вакуумного сонячного колектора, що передбачає максимізацію перетворення енергії від сукупного теплового випромінювання випадкових джерел при прийнятній кількості витрат енергії на переорієнтування.

Таким чином, запропонований алгоритм на базі м'яких обчислень є ефективним рішенням, що входить у метод реалізації системи оптимізації положення робочої поверхні вакуумного колектора.

Запропонована ІАСУ у більшості сценаріїв забезпечує приріст перетвореної енергії відносно стандартного трекера, при цьому з активним модулем оптимізації витрати додаткової енергії на регулювання знаходяться на прийнятному рівні.

ВИСНОВКИ

На основі вивчення кліматичних особливостей регіонів із низькими температурами встановлено, що сонячні технології можуть бути ефективно використані навіть за умов обмеженої інсоляції, за умови застосування сучасних технічних рішень, оптимального розміщення обладнання та автоматизованих систем керування.

У ході аналізу було визначено найбільш доцільний підхід до реалізації системи регулювання робочої поверхні колектора. Розглянуті технічні варіанти дали змогу сформулювати концепцію керування, яка забезпечує максимально ефективне використання сонячної енергії та адаптацію геліосистеми до змін зовнішнього середовища.

Розроблено метод оптимізації положення поверхні сонячного колектора на основі інтелектуальних алгоритмів керування, які дозволяють підвищити ефективність перетворення енергії, забезпечуючи орієнтацію робочої поверхні сонячного колектора у напрямку найбільшого випромінювання з мінімальним додатковим енергоспоживанням для роботи виконавчих механізмів, що коригують його положення.

Розроблена інтелектуальна автоматизована система керування для регулювання положення центру робочої поверхні сонячного колектора у напрямку найбільшого загального випромінювання (прямого, дифузного, відбитого), з урахуванням мінімізації додаткового енергоспоживання завдяки інтегрованим прогностичним та оптимізуючим модулям.

Алгоритми та програмна реалізація моделювання моделі автоматизованої сонячної системи були розроблені в рамках модулів для симуляторів впливу зовнішнього середовища на виробництво енергії, що дозволяє моделювати роботу сонячних систем з різними конфігураціями для аналізу їхньої ефективності.

Запропоновано інтелектуальний алгоритм оптимізації положення поверхні вакуумного сонячного колектора, побудований на базі методів м'яких обчислень,

що забезпечує синтез значень із прийнятною точністю зі значним скороченням обчислювального навантаження, що дозволяє реалізувати підсистему прогнозу ефективності роботи колектора, який перебуває під впливом випадкових теплових випромінювань.

Алгоритм ІАСУ реалізовано у вигляді моделі в Matlab Simulink. Результати тестів на запропонованій моделі показують, що запропонований інтелектуальний алгоритм дозволяє визначити оптимальний напрямок робочої поверхні вакуумного сонячного колектора, що передбачає максимізацію перетворення енергії від сукупного теплового випромінювання випадкових джерел при прийнятній кількості витрат енергії на переорієнтування.

Таким чином, запропонований алгоритм на базі м'яких обчислень є ефективним рішенням, що входить у метод реалізації системи оптимізації положення робочої поверхні вакуумного колектора.

Запропонована ІАСУ у більшості сценаріїв забезпечує приріст перетвореної енергії відносно стандартного трекера, при цьому з активним модулем оптимізації витрати додаткової енергії на регулювання знаходяться на прийнятному рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. John A. D., William A. B., Solar Engineering of Thermal Processes 4th, Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada, 2017.
2. Kalogirou S. A., Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science 30, 2004.
3. Nadia AL-Rousan, Nor Ashidi Mat Isa, Mohd Khairunaz Mat Des, Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system, Journal of King Saud University – Engineering Sciences, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.004>, 2020
4. Alwan N.T., Shcheklein S.E., Ali O.M., Experimental analysis of thermal performance for flat plate solar watercollector in the climate conditions of Yekaterinburg, Russia, Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.263>, 2021
5. Штовба С.Д., Проектирование нечетких систем средствами MATLAB, Горячая линия – Телеком, 2007.
6. Falter C.P., Pitz-Paal R.: A generic solar-thermochemical reactor model with internal heat diffusion for counter-flow solid heat exchange / Solar Energy, 2017.
7. Gorkavyy M.A., Gorkavyy A.I., Solovyev V.A.: Conceptual model of intelligent system supporting situation evaluation, forecast and control at power grid companies. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings, 2017.
8. Abd-Elhady M., Nasreldin M., Elsheikh M.: Improving the performance of evacuated tube heat pipe collectors using oil and foamed metals, Ain Shams Engineering Journal Volume 9, 2018.
9. Iwafune Y., Kanamori J., Sakakibara H., A comparison of the effects of energy management using heat pump water heaters and batteries in photovoltaic - installed houses, Energy Conversion and Management, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.10.001>

10. Dvoretckaiaa, N., Bolshakova, A.D., Mozharova, A.M., Soboleva, M.S., Kirilenkobc, D.A., Baranova, A.I., Mikhailovskii, V.Y., Neplokha, V.V., Morozova, I.A., Fedorova, V.V., Mukhinab, I.S. (2020) «Ganp-based photovoltaic device integrated on si substrate», *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 206, pp. 68-74.

11. Timokhin, V.S., Chugaev, E.A., Chugaev, I.V. (2019), «The use of surfactants in systems hot water supply and heating systems», *Journal of scientific development trends and education*, Vol. 54, pp. 27-34.

12. Ю.Б. Парвулюсов, С.А. Родионов, В.И. Солдатов, А.А. Шехоний, Ю.Г. Якушенков «Проектирование оптико-электронных приборов», учебник изд. 2-е, перераб. и доп., Логос, 2000 – 488 с.

13. Falter, C.P. and Pitz-Paal, R. (2017), "A generic solar- thermochemical reactor model with internal heat diffusion for counter-flow solid heat exchange", *Journal of Solar Energy*, Vol. 144, pp. 569-579.

14. Sukhorukov, S., Soloviev, V., Malysheva, O. (2017), "Research of deicing processes by means of electrodynamic method", *Journal of Advances in Intelligent Systems and Computing*, No. 692, pp.170-176.

15. G. Emmi, A. Zarrella, M. De Carli, « A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collectors: A case study of a multi-source energy system », *Energy Conversion and Management*, 2017.

16. B.Freegah, M. Alhamdo, «Investigative study of thermal performance of thermosyphon solar collector», 2020

17. S. Ozcelika, H. Prakashb , R. Challoo «Two-Axis Solar Tracker Analysis and Control for Maximum Power Generation», 2011

18. B. Khadidja , K. Dris , A. Boubeker , S. Noureddine (следающая система) «Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian region, Example of Ouargla», 2014

19. J. Songa, Y. Zhub, D. Xiab, Y. Yang «A photovoltaic solar tracking

system with bidirectional sliding axle for building integration », The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, pp. 1638

20. A. M. Abdulmalik, B. Freegah, B. S. Khalaf, M. H. Alhamdo « Heat transfer inside building- cladding solar collector», Journal of Engineering and Sustainable, <https://doi.org/10.31272/jeasd.24.4.42020>

21. Anderson B. Solar energy: fundamentals in building design. New York: McGraw-Hill; 1977.

22. Dincer I. Energy and environmental impacts: present and future perspectives. Energy Sources 1998;20(4/5):427–53.

23. Dincer I. Renewable energy, environment and sustainable development. Proceedings of the World Renewable Energy Congress V, Florence, Italy; 1998. p. 2559–62.

24. Johanson TB, Kelly H, Reddy AKN, Williams RH. Renewable fuels and electricity for a growing world economy. In: Johanson TB, Kelly H, Reddy AKN, Williams RH, editors. Renewable energy-sources for fuels and electricity. Washington, DC: Island Press; 1993. p. 1–71.

25. Schweiger H. Optimisation of solar thermal absorber elements with transparent insulation. Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Terrassa, Barcelona, Spain; 1997.

26. Orel ZC, Gunde MK, Hutchins MG. Spectrally selective solar absorbers in different non-black colours. Proceedings of WREC VII, Cologne on CD-ROM; 2002.

27. A. Kaushal, Varun, Solar stills : A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (2010) 446–453, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.011>.

28. N.T. Alwan, S.E. Shcheklein, O.M. Ali, Experimental investigations of single slope solar still integrated with a hollow rotating cylinder, in: IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., Institute of Physics Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012063>.

29. N.T. Alwan, S.E. Shcheklein, O.M. Ali, Productivity of enhanced solar still under various environmental conditions / IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., Institute of Physics Publishing, 2020.

30. N.T. Alwan S.E. Shcheklein O.M. Ali Experimental Investigation of Modified Solar Still Productivity under Variable Climatic Conditions Int. J. Des. Nat. Ecodynamics. 15 2020 57 64

31. Zadeh L.A., Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Computer Science Division, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences and the Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720, U.S.A., 1999. – 9-34 с.

32. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

33. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

34. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

35. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

36. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)