

На правах рукописи



Болдырев Владислав Вячеславович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ АВТОНОМНАЯ ГЕЛИОСИСТЕМА
С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ МОДУЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата техниче-
ских наук

Комсомольск-на-Амуре - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский – на – Амуре государственный университет»

Научный руководитель:

Горькавый Михаил Александрович

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Обухов Сергей Геннадьевич, доктор технических наук, доцент,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор;

Шеленок Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», кафедра «Автоматика и системотехника», доцент.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет».

Защита состоится 11.02.2022 г. в 12 час. 00 мин.

на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»

по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ», корпус 3, аудитория 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КНАГУ» и на официальном веб-сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 999.086.03
к.т.н., доцент



Гудим А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Мировые тренды стимулируют исследования в области повышения эффективности солнечных технологий, что приближает раскрытие их потенциала. Но все достижения в части эффективности элементов, непосредственно задействованных в получении излучения, могут быть полностью нивелированы низкокэффективной подсистемой управления положением поглощающих поверхностей. Вакуумные коллекторы пригодны для получения прямого, диффузного и отраженного излучения солнца и для раскрытия потенциала их эффективности, целесообразно применение систем экстремального регулирования. Так как в отличие от детерминированного процесса прихода прямой солнечной радиации, на основе которого построены большинство актуальных следящих систем для солнечных коллекторов, диффузное и отраженное излучение может быть классифицировано как стохастическое внешнее воздействие. В исследованиях John A. Duffie, William A. Beckman доказано, что отсутствие системы оптимизации положения поглощающей поверхности не только снижает показатели номинальной эффективности гелиосистемы, но и накладывает ограничения при реализации задач проектирования массивов солнечных коллекторов, особенно в жилых районах с плотной застройкой и на территориях промышленных предприятий с развитой инженерной инфраструктурой.

Поэтому необходима система экстремального регулирования, способная корректировать положение поглощающей поверхности, включающая вакуумные трубки с поглощающими пластинами (КПД трубок до 80%) относительно наибольшего совокупного излучения, что, в том числе, подтверждается исследованиями Nadia AL-Rousan, Fabio Moacir Hoffmann, Soteris A. Kalogirou и российскими учеными из Уральского федерального университета в лице Щеклеина Сергея Евгеньевича. Реализация такой подсистемы возможна на базе интеллектуальной автоматизированной системы управления (далее ИАСУ), позволяющей прогнозировать и оценивать воздействие на преобразователь всего доступного излучения (включая прямое, диффузное и отраженное излучение солнца) и синтезировать закон управления с учетом соотношения количества поглощаемой энергии к количеству прогнозируемой затраченной энергии при выполнении регулирования.

Дополнительным стимулом при разработке ИАСУ - является возможность улучшить на базе полученных результатов уже существующие и внедренные в эксплуатацию системы регулирования положения рабочей поверхности (солнечные трекеры), что обеспечит снижение срока окупаемости проектов по вводу в эксплуатацию таких систем и повысит их эффективность. Это связано с тем, что существующие промышленные образцы, преимущественно ориентированы на получение прямого солнечного излучения, что не в полной мере раскрывает потенциал эффективности солнечных коллекторов в утренние и вечерние часы.

Таким образом, приоритетной задачей по повышению эффективности современных гелиосистем, является разработка интеллектуальной автоматизированной системы управления, направленной на оптимизацию работы высокоэффективных коллекторов.

Научная проблема. Повышение эффективности использования потенциала современных вакуумных солнечных коллекторов на базе автоматизированных систем регулирования положения их рабочей поверхности.

Цель работы: Разработка интеллектуальной автоматизированной системы управления как модуля автономной автоматизированной гелиосистемы, направленной на оптимизацию положения рабочей поверхности солнечного коллектора для повышения эффективности получения теплового излучения (прямого, диффузного и отраженного).

В диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Идентификация и анализ основных элементов автоматизированной автономной гелиосистемы и их взаимодействия;
2. Разработка процедуры оптимизации процесса получения энергии солнечным коллектором на базе алгоритмов нечеткого логического вывода;
3. Разработка интеллектуального модуля управления положением рабочей поверхности солнечного коллектора на базе имитационной модели процесса получения совокупного солнечного излучения.

Объект исследования – интеллектуальные автоматизированные системы управления положением рабочей поверхностью солнечного коллектора в составе автономной гелиосистемы.

Предмет исследования – принципы, модели, методы и средства управления техническими объектами и процессами современных гелиосистем.

Методы исследования. Основаны на моделировании исследуемых процессов и систем, системном анализе, объектно-ориентированном проектировании, теории нечетких множеств, теории автоматического управления, методах анализа и синтеза сложных систем. Использовались актуальные пакеты прикладного программного обеспечения Matlab: Workspace Simulink, Simscape Electrical, Simscape Fluids, Simscape Special Power Systems, Fuzzy Logic Toolbox.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод оптимизации положения поверхности солнечного коллектора на базе интеллектуальных алгоритмов управления, позволяющих повысить эффективность процесса получения энергии.
2. Разработан интеллектуальный модуль управления положением рабочей поверхностью солнечного коллектора на базе имитационной модели в составе модулей имитаторов влияния внешней среды на процесс получения энергии.

3. Разработаны алгоритмы и программная реализация механизмов функционирования интеллектуальной системы управления автоматизированной гелиосистемой.

Практическая значимость. Предложенный метод и модели служат основой для разработки ИАСУ положением рабочей поверхности солнечного коллектора, с целью повышения эффективности современных гелиосистем. Предложенные решения, были внедрены в качестве рекомендательной основы для подбора конфигурации систем отопления на базе учебно-научного инновационного центра энергосбережения (УНИЦЭ) при ФГБОУ ВО «КнАГУ».

По результатам работы получен 1 патент на изобретение № 2693968 и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020611784.

Работа выполнена при поддержке: Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках гранта № СП-2141.2018.1.

Личный вклад соискателя состоит в следующих работах:

Провел исследования, направленные на идентификацию подсистем технологического процесса по преобразованию энергии в современных гелиосистемах. Сформулировал и описал концепцию интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой регулирования положения рабочей поверхности солнечного коллектора. Произвел защиту прав интеллектуальной собственности на собственное изобретение, которое может входить в подсистему объекта исследования. Разработал алгоритм, включающий процедуры прогнозирования и оптимизации на основе систем нечёткого логического вывода. Разработал имитационную модель, входящую в состав интеллектуальной системы управления, позволяющую реализовать процедуру прогнозирования. Разработал имитационную модель предложенной ИАСУ для синтеза закона управления автоматизированной автономной системой ориентирования рабочих поверхностей солнечных коллекторов в направлении наибольшего совокупного излучения. Разработал алгоритмы реализации предложенной ИАСУ. Реализовал макет предложенной системы ориентирования, интегрированной с предложенной ИАСУ. Провел технико-экономическое обоснование результатов внедрения в технологический процесс предложенных решений.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и конкурсах:

На научно-технических конференциях:

- международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con», г. Владивосток, 2019, 2020;
- international Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Tech.;
- международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» 2019;

– III всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 2020.

На научных конкурсах:

– краевом конкурсе молодых учёных и аспирантов в сфере научных исследований, ФГБОУ ВО «КнАГУ», г. Хабаровск (2019-2021);

– конкурсе совета по грантам Президента Российской Федерации (разработка, была поддержана грантом, в период с 2018 по 2020 годы);

– в рамках программ: Национальной Технологической Инициативы (2018-2019), г. Владивосток, г. Москва и фонда содействия инновациям (2016-2019);

– конкурсе инновационных разработок фонда Сколково (2016-2019), г. Владивосток, г. Хабаровск, г. Якутск, г. Москва.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод оптимизации положения поверхности солнечного коллектора на базе интеллектуальных алгоритмов управления, позволяющих повысить эффективность получения энергии.

2. Интеллектуальный модуль управления на базе имитационной модели автоматизированной гелиосистемой в составе модулей имитаторов влияния внешней среды на процесс преобразования энергии.

3. Алгоритм и программная реализация механизмов функционирования интеллектуальной системы управления автоматизированной гелиосистемой.

Достоверность полученных результатов исследования подтверждается адекватностью полученных математических моделей; сопоставлением расчетных данных, полученных аналитическим путем с аналогичными данными статистики.

Публикации. Основные результаты работы изложены в 15 печатных работах: в изданиях, входящих в перечень ВАК – 2; в изданиях, индексируемых в базах Scopus и/или Web of Science – 3; патент на изобретение – 1, свидетельства о регистрации программы для ЭВМ – 2; РИНЦ – 7.

Соответствие паспорту специальности. Исследования, выполненные в диссертационной работе, соответствуют формуле и пунктам 4, 9, 15, 16 паспорта специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»: **Пункт 4.** Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация. **Пункт 6.** Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления. **Пункт 10.** Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и другое. **Пункт 15.** Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и другое).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, приложений. Текст диссертации изложен на 172 страницах, включая 11 приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность темы исследования. Обоснована применимость гелиосистем на территориях с пониженными температурами.

Практика применения вакуумных коллекторов в России наиболее распространена на территориях с положительными температурами, что в большей степени связано с конфигурациями доступных промышленных образцов. Экономический эффект от применения вакуумных коллекторов наиболее выражен в условиях холодного климата, где вопрос стоимости отопления стоит особенно остро. По данным Global engagement - IEA, количество солнечных часов и уровень солнечной радиации выше на территориях с пониженными температурами. Солнечные коллекторы на базе вакуумных трубок типа «Heat pipe с перьевой пластиной» способны функционировать при пониженных температурах (до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) и обладают КПД до 80%. Для раскрытия потенциала эффективности таких коллекторов необходимо адаптировать технологию к условиям характерным территориям России.

В частности, необходимо реализовать систему экстремального регулирования положения поглощающей поверхности коллектора для ориентирования в направлении наибольшего совокупного излучения, включая прямое, диффузное и отраженное солнечное излучение. На рисунке 1 приведен график (на основе исследований Soteris A. Kalogirou, h-индекс 65 и фундаментального труда: A. Duffie, William A. Beckman «Solar Engineering of Thermal Processes»), отображающий разницу между преобразованием энергии неподвижной рабочей поверхностью и с двусосным трекером.

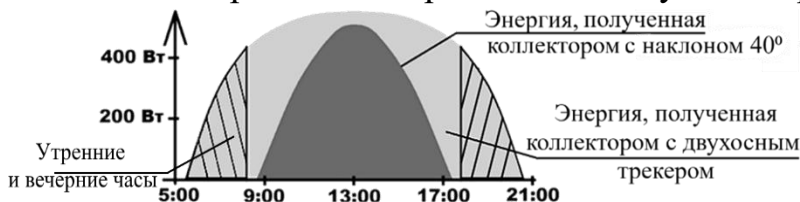


Рисунок 1 – Приход прямого солнечного излучения по часам

При этом, в утренние и вечерние часы (зоны графика со штрихом) трекеры с системами управления, не учитывающими особенности воздействия диффузного и отраженного излучения, не позволяют раскрыть потенциал эффективности солнечных коллекторов с высоким КПД. Если процесс прямого излучения солнца жестко детерминирован и может учитываться следящей системой управления, то для учета диффузного излучения, характеризуемого усредненными значениями, и отраженного излучения, характеризуемого значениями, вычисляемыми для каждого конкретного случая, необходима система, обеспечивающая непрерывное поддержание направления центра рабочей поверхности относительно наибольшего

воздействующего излучения. Поэтому сформулированы требования к конфигурации солнечного коллектора для работы в условиях пониженных температур и короткого дня, с учетом различных распределенных источников излучения (в том числе отражающих поверхностей). Предложенная конфигурация поддерживает ориентирование рабочей поверхности коллектора в девяти направлениях с учетом особенностей структуры вакуумных трубок с перьевой пластиной и жидким теплоносителем. На рисунке 2 представлена схема расположения измерительных устройств (далее ИзУ).

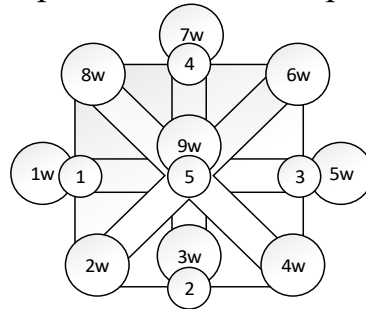


Рисунок 2 – Схема расположения ИзУ на рабочей поверхности коллектора где, 1...5 – наименования ИзУ; 1w-9w наименования направлений излучения

Для раскрытия потенциала нового солнечного коллектора необходима ИАСУ, обеспечивающая экстремальное регулирование рабочей поверхности в направлении наибольшего совокупного излучения (прямого, диффузного, отраженного) при минимальных затратах дополнительной энергии на работу исполнительных механизмов при корректировке её положения. Разработка решений в этой области позволит повысить эффективность современных гелиосистем за счет увеличения общего количества теплоты в системе, как следствия взаимодействия преобразователей с доступным совокупным излучением.

В первой главе произведена идентификация подсистем, входящих в исследуемый технологический процесс с целью формирования подхода к реализации ИАСУ с учетом конфигурации коллектора. Выявлен основной недостаток существующих подсистем оптимизации положения рабочей поверхности коллектора – не учитывается воздействие отраженного и диффузного излучения. Предложены критерии для обоснования применимости гелиосистем в условиях, характерных для территорий Дальнего Востока. По результатам анализа критериев сформирован перечень параметров, взаимодействующих в технологическом процессе объектов. С целью выявления зависимостей, определяющих эффективность преобразования энергии, было принято решение структурировать выявленный перечень параметров объектов. Для решения этой задачи использован объектно-ориентированный подход, одним из ключевых инструментов которого, является разработка информационной модели системы в виде диаграммы классов. Диаграмма, представленная на рисунке 3, выполнена в нотации UML-Class (схожее применение представлено в работах Вайсфельд М.), позволяет отобразить различные взаимосвязи между параметрами объектов системы и записать взаимодействие между ними в виде функций классов.

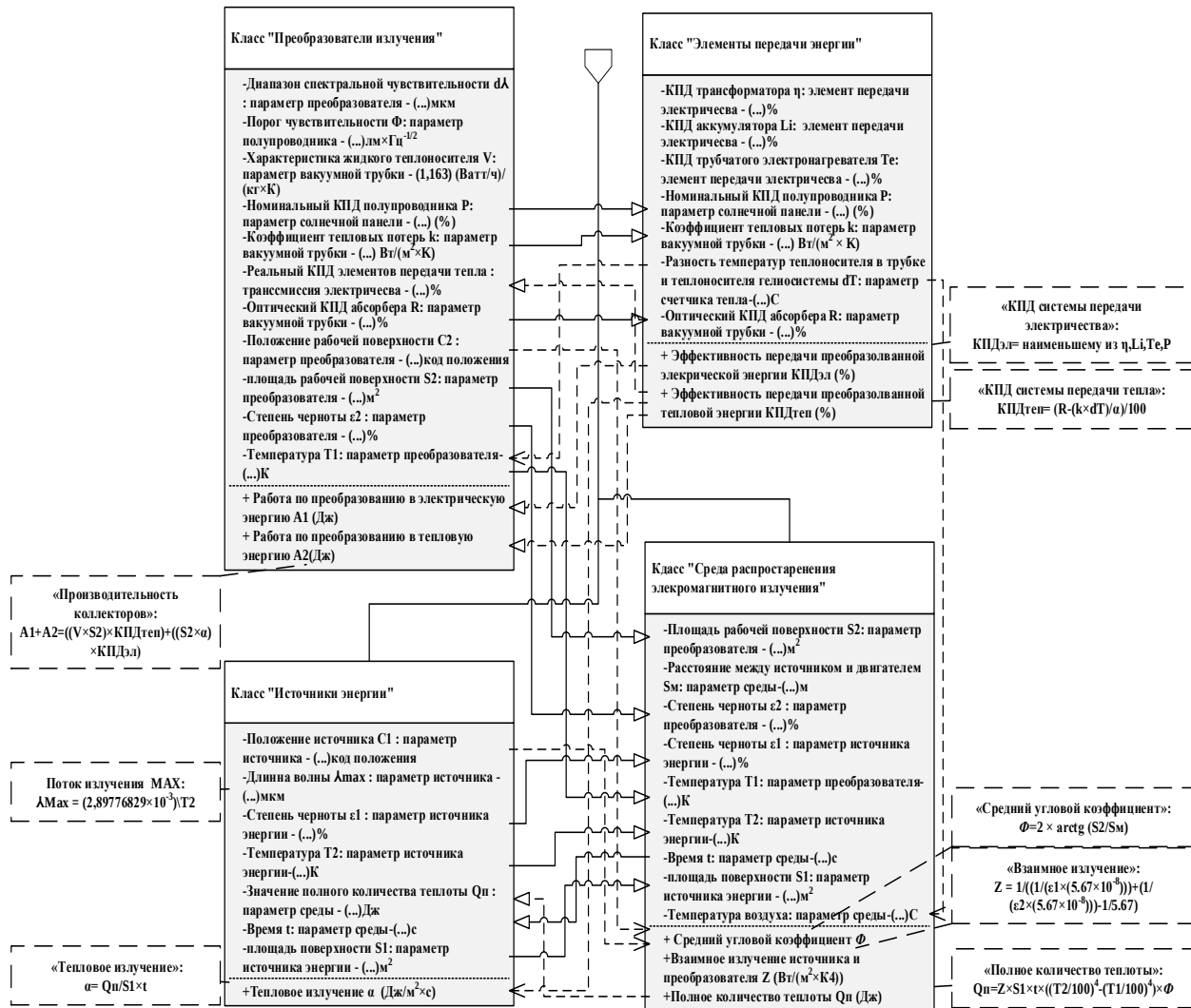


Рисунок 3 – Фрагмент информационной модели в UML-Class

На основе информационной модели реализована имитационная модель автоматизированной гелиосистемы (рисунок 4).

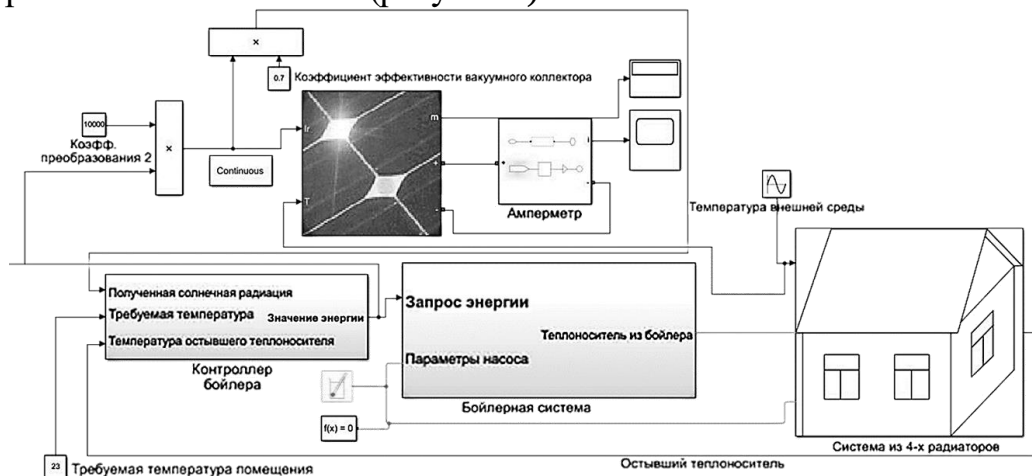


Рисунок 4 - Имитационная модель гелиосистемы Matlab

Предложенная имитационная модель включает в себя блоки библиотек Matlab Simulink (Simscape: Electrical, Fluids, Specialized Power Systems). Функциональная схема автоматизированной гелиосистемы представлена на рисунке 5.

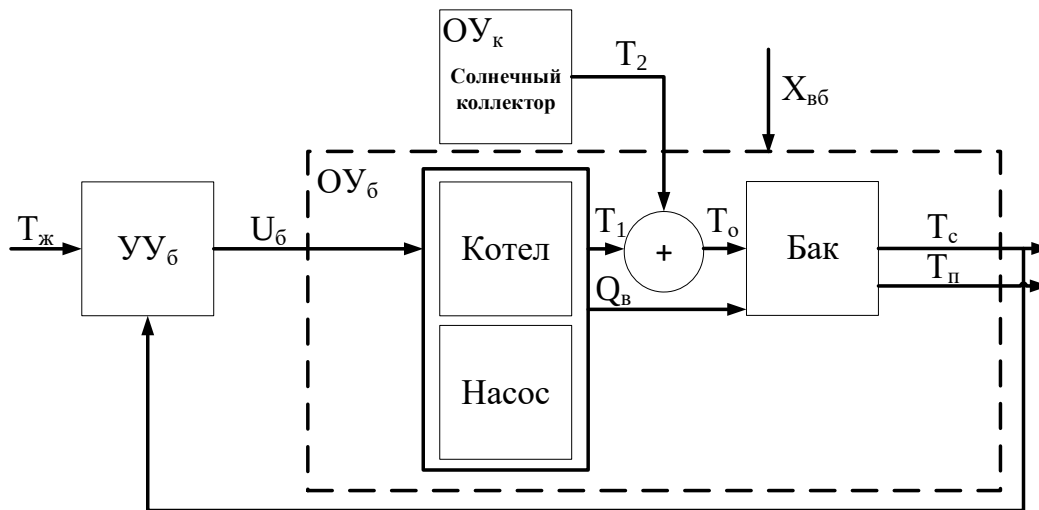


Рисунок 5 – Функциональная схема автоматизированной гелиосистемы
где: $УУ_6$ – устройство управления бойлерной системой; $ОУ_б$ – объект управления бойлерная система; $ОУ_к$ – объект управления коллектор

Параметры: $T_ж$ – температура желаемая ($^{\circ}C$), U_6 – закон управления бойлерной системой отопления; T_1 – температура воды на выходе из котла ($^{\circ}C$); T_2 – температура воды на выходе из коллектора ($^{\circ}C$); T_o – общая температура воды (суммарная) ($^{\circ}C$); T_c – температура воды на выходе из бака ($^{\circ}C$); $T_п$ – температура потребляемой воды (отопление/прямое назначение) ($^{\circ}C$); $Q_в$ – расход воды (кг/с); $X_{вб}$ – возмущающее воздействие на бойлерную систему. В блоках имитационной модели применены рекомендуемые параметры для гелиосистем, способных функционировать на территории ДФО. Функционирование осуществляется следующим образом – модуль «Контроллер бойлера» инициирует подачу топлива в «Бойлерную систему» при сниженном значении «Остывший теплоноситель». Если увеличить длительность непрерывного нагрева теплоносителя между модулями «Бойлерная система» и «Система из 4-радиаторов», то время работы котла будет сокращаться.

Следовательно, чем больше энергии преобразует подключенная подсистема солнечных коллекторов, тем меньше будет затрачено энергии основного источника (котла). На основе анализа результатов экспериментов сформирована концепция ИАСУ.

Во второй главе Сформулирована концепция ИАСУ предложенной конфигурации солнечного коллектора, реализующей основной критерий оптимизации АСУ положением рабочей поверхности преобразователя: ориентирование центра рабочей поверхности в направлении максимального излучения ($Вт/м^2$) с минимальным количеством затрат энергии на переориентирование ($Вт \times ч$).

Функционал качества системы управления, реализующий основной критерий оптимизации:

$$E = \{G_{\text{п}}, G_{\text{о}}, G_{\text{д}}, S_{\text{п}}, \varphi_{\text{а}}, \varphi_{\text{з}}, E_{\text{п}}\} \rightarrow \max, \text{ где}$$

E – полученная энергия (кВт×ч);

$G_{\text{п}}$ – прямое излучение солнца (Вт/м²);

$G_{\text{о}}$ – отраженное излучение (Вт/м²);

$G_{\text{д}}$ – диффузное излучение (Вт/м²);

$S_{\text{п}}$ – площадь активно поглощающей поверхности (м²);

$\varphi_{\text{а}}$ – азимутальный угол наклона поглощающей поверхности (°);

$\varphi_{\text{з}}$ – зенитный угол наклона поглощающей поверхности (°);

$E_{\text{п}}$ – затраты энергии на перемещение рабочей поверхности (Вт×ч).

Процесс передачи тепла излучением характеризуется значением полного количества теплоты:

$$Z \times S \times t_{\text{и}} \times ((T_{\text{и}}/100)^4 - (T_{\text{п}}/100)^4) \times \Phi, \text{ где}$$

Z – совокупное излучение источников (Вт/м²);

S – площадь излучающей поверхности (м²);

$t_{\text{и}}$ – продолжительность излучения (сек.);

$T_{\text{и}}$ – температура источника (°C);

$T_{\text{п}}$ – температура активно поглощающей поверхности (°C);

Φ – угловой коэффициент между источником и коллектором.

Полное количество теплоты зависит от значения углового коэффициента. Для максимизации преобразования энергии, полученной излучением, должно выполняться условие $\Phi \geq 1$. Корректировка значения Φ выполняется регулировкой положения рабочей поверхности преобразователя относительно источника, характеризуемого значениями $\varphi_{\text{а}}$ и $\varphi_{\text{з}}$.

Единственное излучение с достаточной точностью прогноза — это прямая солнечная радиация. Поскольку возникающее отраженное и отраженное рассеянное излучения – это стохастические процессы, целесообразно рассматривать их как совокупность. При этом количество источников (отражающих поверхностей), частота и степень воздействия их излучения – случайные величины и могут быть описаны как множества значений, изменяемых в определенном диапазоне (статистические данные и усреднённые значения приведены в работах John A. Duffie, William A. Beckman). Стохастичность излучения, в том числе подразумевает возникновение отраженных лучей, провоцирующих изменение направления поверхности коллектора в сторону с большим значением G и низким $t_{\text{и}}$. И так как при каждой смене направлений $E_{\text{п}}$ становится отличным от нуля, необходимо исключить переориентирование в направлении излучений с низким G и/или $t_{\text{и}}$.

Новая ИАСУ может быть интегрирована с элементами уже находящейся в эксплуатации гелиосистемы. На рисунке 6 представлена функциональная схема гелиосистемы с интегрированной ИАСУ.

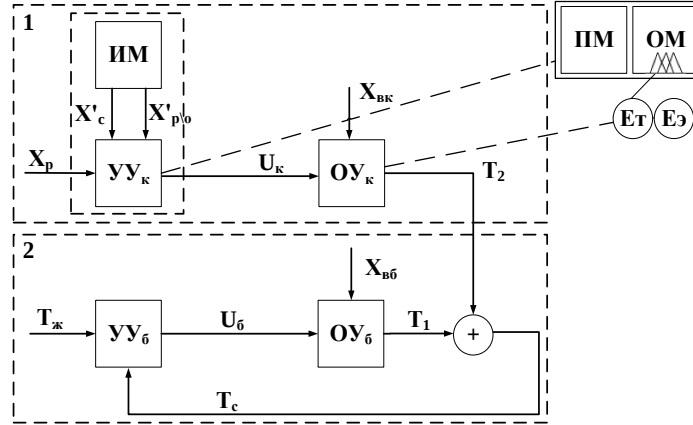


Рисунок 6 – Функциональная схема (1– коллектор с ИАСУ, 2 – бойлерная система), где: ИМ – имитационная модель; УУ_к– устройство управления коллектором; ОУ_к– объект управления - коллектор; ПМ – прогнозирующий модуль; ОМ – оптимизирующий модуль (учитывающий Е_т–полученную и Е_з–затраченную энергию); УУ_б– устройство управления бойлерной системой; ОУ_б– объект управления - бойлерная система.

Модули ИАСУ (УУ_к) не влияют на функционирование стандартного УУ_б и при этом могут использовать синтезируемые им данные, например, для определения необходимости блокировать нагрев теплоносителя коллектором в летней период. УУ_к интегрируется в стандартную гелиосистему (рисунок 5), поддерживающую смены направлений рабочей поверхности солнечного коллектора. На входе УУ_к значения измеренного излучения (X_p) в Вт/м², на основе которых синтезируется закон управления – U_k , обеспечивающий ориентирование центра рабочей поверхности в направлении наибольшего совокупного излучения. Измерение выполняется датчиками, расположенными на гранях прямоугольной рабочей поверхности солнечного коллектора.

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

$\varphi_{na} \varphi_{nz}$ – азимутальный и зенитный угол наклона рабочей поверхности в заданную минуту (1,2...1440) в течение суток, изменяемый шаговым исполнительным механизмом (например, шаговый линейный электропривод с вращаемым штоком).

Важной частью ИАСУ является ИМ, в составе которой модуль расчёта прихода прямой солнечной радиации, на основе которого также реализованы модули, генерирующие значения диффузного и отражённого излучения. Значения диффузного и отраженного излучения (X'_{p0}) измеряемые в Вт/м², смоделированы блоками Matlab Simulink – Uniform Random Number. Модель предназначена для стрессового испытания ИАСУ, поэтому блоки непрерывно генерирует случайные значения в заданном диапазоне. Диапазон значений соответствует математическому описанию диффузного излучения и статистическим данным по экспериментам с отраженным

излучением, приведенных в работах John A. Duffie, William A. Beckman. Энергия рассеянного излучения зависит от прямого излучения и ряда факторов, измеряемых усреднёнными значениями, такими как k_T - среднее излучение на наклонных поверхностях и I_d / I - отношение диффузного излучения к прямому излучению в пределах атмосферы и зависит от состава атмосферы в конкретном месте. А энергия отраженного излучения рассчитывается из умножения текущей интенсивности излучения на ее телесный угол, который должен быть определён в каждом эксперименте и косинуса полярного угла, из чего получаем поток излучения, который будет иметь значения того же порядка что и энергия отраженного луча (энергия отраженного излучения может иметь числовые значения от нуля до бесконечности). Из чего следует, что диффузное и отраженное излучение характеризуются усредненными значениями, которые возможно сгенерировать как случайный сигнал с заданным диапазоном изменения значений.

Для расчета значений прихода прямого излучения ($X's$), измеряемого в $Вт/м^2$ применена методика с наименьшей погрешностью, которая была использована NASA США в 2017 году для формирования «The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set». Разработанная имитационная модель прихода солнечной радиации позволяет вычислить почасовую солнечную радиацию внутри атмосферы Земли в течение года для заданной координаты. Модель реализована в Matlab Simulink и может быть применена для решения задач смежных исследований.

Общая формула для вычисления прихода прямой солнечной радиации имеет вид:

$$G_{cb} = G_{on} \times tb \times \cos Q_z, \text{ где} \quad (2)$$

G_{cb} – прямая солнечная радиация внутри атмосферы ($Вт/м^2$), G_{on} - прямая солнечная радиация за пределами атмосферы ($Вт/м^2$), tb – коэффициент пропускания атмосферы для лучевого излучения, $\cos Q_z$ – косинус зенитного угла склонения солнца относительно заданной координаты (0° - 180°). На рисунке 7 приведен фрагмент интерфейса имитационной модели прихода солнечной радиации по часам за год.

Имитационная модель прихода солнечной радиации

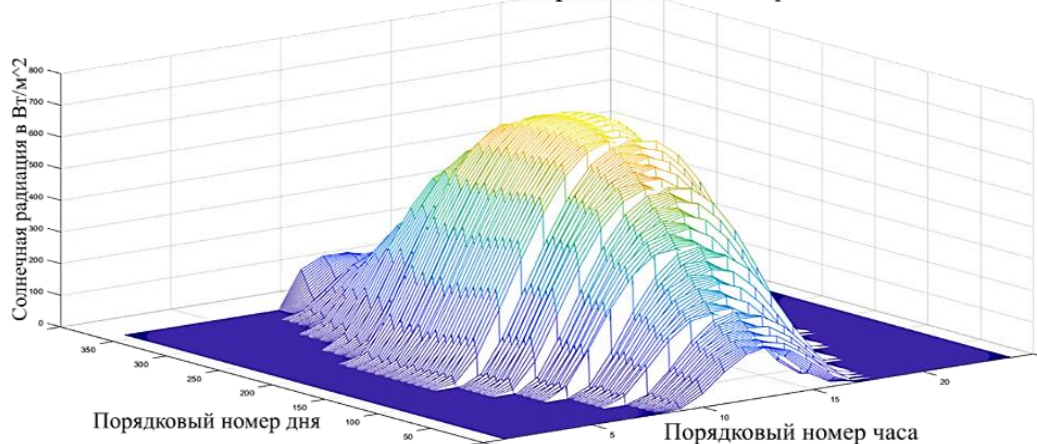


Рисунок 7 – Фрагмент интерфейса имитационной модели

На основе предложенной модели, реализован автоматизированный синтез значений понижающих коэффициентов, имитирующих влияние уровня облачности (в том числе, позволяет имитировать образование тени). Реализована имитационная модель следящей системы по часовому углу склонения солнца на основе расчета прихода прямой солнечной радиации по часам для заданных географических координат. Предложенная реализация, может быть основой для программного регулирования положения рабочей поверхности солнечного коллектора или следящей системы, включающей измерительные устройства. Основное преимущество предложенной реализации в функциональной возможности автоматизированного синтеза почасовых значений прихода солнечной радиации с учетом понижающих коэффициентов, имитирующих влияние облачности/тени, выполняемого для задаваемых географических координат в том числе в режиме реального времени. Структура модели представлена на рисунке 8.

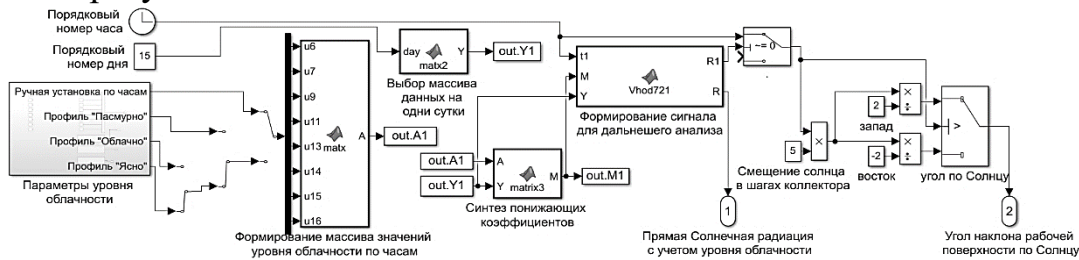


Рисунок 8 – Структура модели следящей системы по часовому углу склонения солнца.

Предложенная имитационная модель является основой для прогнозирующих и оптимизирующих модулей ИАСУ. Дискретизация выполненного расчета позволяет реализовать имитационную модель ИАСУ с суточным циклом на 365 дней в году. Синтезированные в модели значения используются в реализации прогнозирующего и оптимизирующего модуля ИАСУ. Массив значений $X_{p|c|p|o}$ (излучение, принимаемое рабочей поверхностью за час), имеет вид:

$$X_{p|c|p|o} = \begin{bmatrix} X_{11p|c|p|o} & X_{12p|c|p|o} & X_{13p|c|p|o} & X_{14p|c|p|o} & X_{15p|c|p|o} \\ X_{21p|c|p|o} & X_{22p|c|p|o} & X_{23p|c|p|o} & X_{24p|c|p|o} & X_{25p|c|p|o} \\ \dots & & & & \\ X_{tnp|c|p|o} & X_{tnp|c|p|o} & X_{tnp|c|p|o} & X_{tnp|c|p|o} & X_{tnp|c|p|o} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Элементы матрицы — это значения $X_{tnp|c|p|o}$, где:

t - номер часа, n - номер ИзУ (рисунок 2), p – излучение, измеренное ($Вт/м^2$), $'c$ – моделируемое значение излучения солнца ($Вт/м^2$), $'p|o$ - моделируемое значение рассеянного и отраженного излучения ($Вт/м^2$).

В работе рассматривается система, находящаяся под воздействием некоторого количества источников теплового излучения, окружающих рабочую поверхность (для измерения излучения необходимо минимум 5 ИзУ, расположенных на гранях прямоугольной рабочей поверхности).

Далее на рисунке 9 приведена декомпозиция функциональной схемы гелиосистемы с интегрированной ИАСУ.

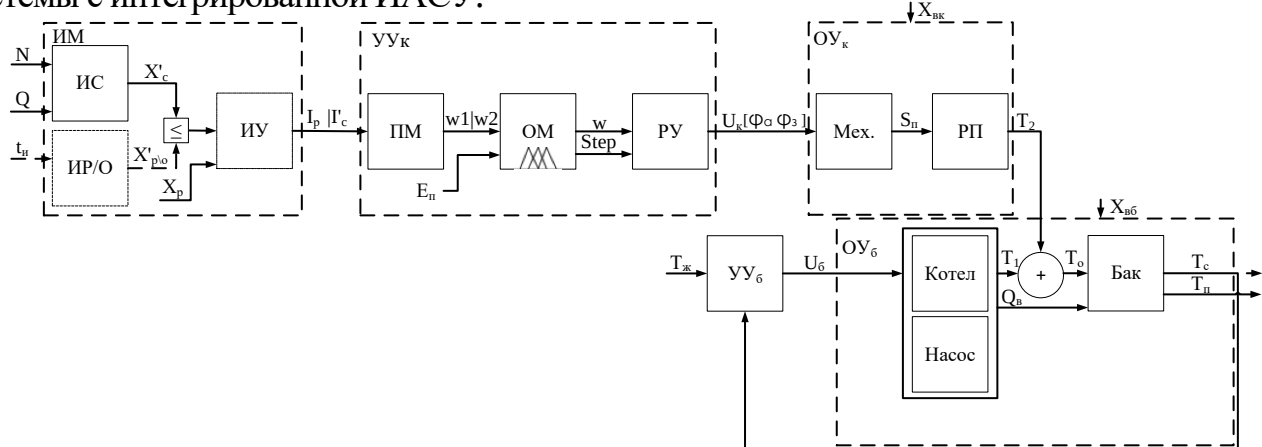


Рисунок 9 – Декомпозиция функциональной схемы гелиосистемы с ИАСУ,

где: ИС – имитационная модель прямого излучения солнца; ИР/О – имитационная модель диффузного/отраженного излучения; ИзУ – измерительные устройства; ПМ – прогнозирующий модуль; ОМ – оптимизирующий модуль; РУ – модуль расчета угла наклона рабочей поверхности коллектора; Мех. – исполнительный механизм; РП – рабочая поверхность; УУ_б – устройство управления бойлерной системой.

Блок ИМ (имитационная модель) включает: ИС – модуль расчета значений прихода прямой солнечной радиации в Вт/м² (N – порядковый номер дня, Q – уровень облачности в определенном часу от 0.1 до 0.9); ИР/О – модуль расчета значений излучения в период времени (t_u – период времени в часах) в Вт/м², используемый только при тестировании и настройке ИАСУ; ИУ – модуль расчета значений силы тока в А, преобразованного в результате воздействия излучения в Вт/м² на измерительное устройство, используемый только при тестировании и настройке ИАСУ. Блок ИМ синтезирует значения силы тока $I_p|I'_c$, пропорциональные значениям X_p (излучение измеренное), определяемые условием $X'_c \leq X'_{p/o}$ – если рассеянное/отраженное излучение больше прямого, то учитывать $X'_{p/o}$ (условие справедливо только для сигнала ИзУ, расположенного на грани рабочей поверхности, направленной вверх).

Блок УУ_к (устройство управления коллектором) включает:

- ПМ – прогнозирующий модуль, выполняющий расчет номеров направлений воздействующего наибольшего излучения ($w1|w2$ – номера направлений излучения);
- ОМ – оптимизирующий модуль, выполняющий расчет количества шагов исполнительного механизма для перемещения в направлении наибольшего излучения относительно текущей позиции и синтезирует решение о смене или игнорировании нового направления ((w – оптимальное направление, $step$ – количество шагов исполнительного механизма по двум координатам, которые необходимо совершить до нового направления, (E_n – энергия, необходимая на перемещение. Учитывается как мощность электрического двигателя исполнительного механизма, умноженного на

время, за которое механизм совершает 1 шаг для корректировки угла наклона рабочей поверхности коллектора на 4.5°);

- РУ – модуль расчет угла наклона рабочей поверхности (U_k – закон управления [$\varphi_a \varphi_z$] – азимутальный и зенитный угол).

Блок ОУ_к (объект управления - коллектор) включает: Мех. – исполнительный механизм прямого хода, поддерживающий вращение штока, за 1 шаг корректирующий азимутальный/зенитный угол на 4.5° ($S_{\text{п}}$ – площадь активно поглощающей поверхности в м^2); РП – рабочая поверхность коллектора (T_2 – температура воды на выходе из коллектора в $^\circ\text{C}$); $X_{\text{вк}}$ – возмущающее воздействие на коллектор (излучение прямое, диффузное, отраженное в $\text{Вт}/\text{м}^2$, температура внешней среды в $^\circ\text{C}$).

Средствами ПМ, ОМ и РУ на базе систем нечеткого логического вывода синтезируется закон управления в результате последовательности операций:

- 1) производится оценка, характеризующая параметры воздействующего излучения;
- 2) производится расчет затрат энергии на переориентирование;
- 3) выполняется расчет угла наклона рабочей поверхности на основании номера направления и количества шагов между позициями, соответствующими текущему направлению и новому направлению.

При положительной оценке прогноза корректировки, выполняется операция по переориентированию рабочей поверхности, при отрицательной - смена направлений игнорируется, и корректировка не производится.

В третьей главе произведена разработка интеллектуального модуля управления на базе имитационной модели процесса получения совокупного излучения. Предложенная ИАСУ предполагает применение системы, состоящей из двух модулей (прогнозирующего и оптимизирующего), включающих системы нечеткого логического вывода. Для обработки массива значений $X_{\text{р|ср|о}}$ с целью классификаций оптимальных направлений $w1|w2$ воздействующего излучения и синтеза значений step на основе которых формируется закон управления U_k [$\varphi_a \varphi_z$].

Данные о воздействующем излучении регистрируются ИзУ (выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора выполнен по методике И.П. Торшина, Ю.Г. Якушенкова). Выбранная модель ИзУ – InGaAs фотодиод, серии IG22, диапазон: 500-2200 нм. Показания датчиков конвертируются в цифровой сигнал, который подается на вход нечеткой системы вывода.

Для обработки входящих от ИзУ сигналов, выполнена настройка пяти аналоговых входов для нечеткой системы логического вывода. Выделено 4 термина характеризующих регистрируемое излучение по интенсивности, где 1 – минимальная интенсивность до $0.9 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 2 - низкая интенсивность до $24 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 3 - средняя интенсивность до $55 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 4 - высокая интенсивность от $50 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Форма функций принадлежности выбрана для указания нормальной интенсивности для каждого из классов.

Всего в систему входит 5 ИзУ с идентичными параметрами, за исключением ИзУ, регистрирующим прямое солнечное излучение.

Система ИзУ сопряжена с модулем ИАСУ, реализованным в Matlab Simulink, который включает две системы нечеткого логического вывода (прогнозирующий и оптимизирующий модуль), синхронизированных между собой. Структура модуля представлена на рисунке 10.

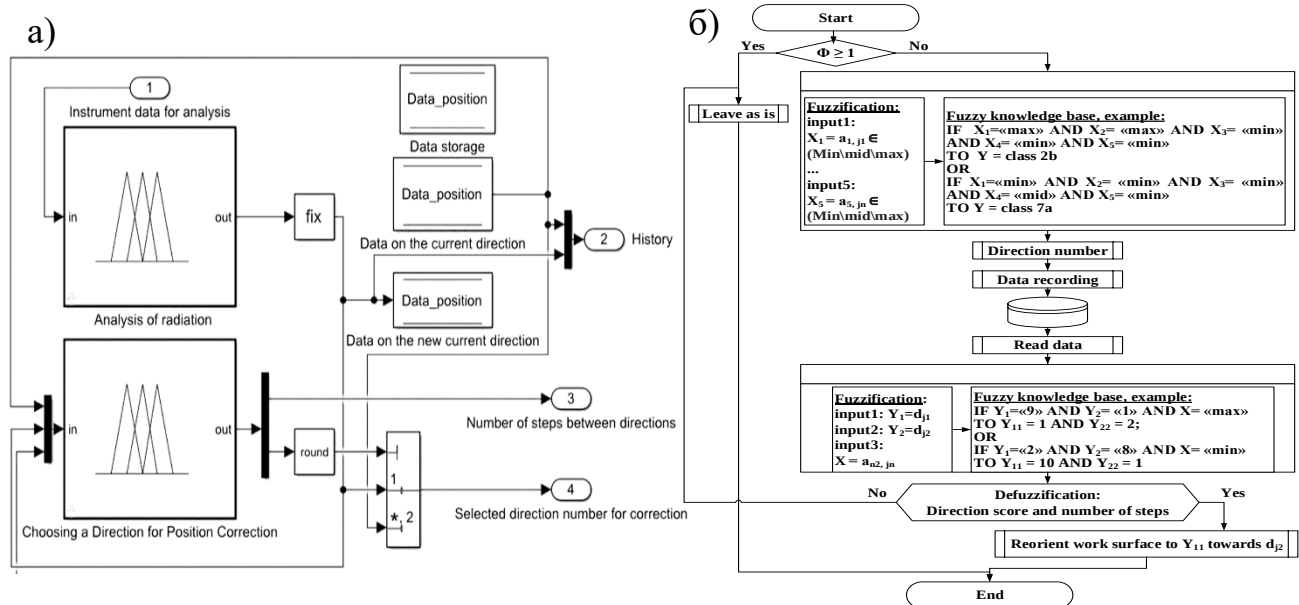


Рисунок 10 – структура ИАСУ

а) Структура в Matlab Simulink; б) Алгоритм синтеза закона управления

Алгоритм инициируется при угловом коэффициенте между принимающей поверхностью (ИзУ) и источником излучения меньше 1 (условие $\Phi \geq 1$ не выполняется). Данные ИзУ фаззифицируются и анализируются базой знаний. На этапе дефаззификации формируются номера направлений наибольшего излучений. Номера направлений (направление предыдущего наибольшего излучения и нового направления) подаются на вход этапа фаззификации следующей нечеткой системы, параллельно подаются данные ИзУ, соответствующие излучению в новом направлении. На этапе дефаззификации вторая нечеткая система синтезирует номер оптимального направления и количество шагов до него. При смене направления производится вычисление угла наклона рабочей поверхности на основе значения количества шагов до оптимального направления.

Модуль (прогнозирующий) первой нечеткой системы «Analysis of radiation» имеет 5 входов в каждом из которых - 4 терма. Синтезирует на выходе значения, соответствующие направлению источника или группы источников с наибольшим излучением. Таким образом, из нечеткого множества данных, полученных в результате воздействия излучения с разными параметрами, формируется значение, соответствующее номеру направления наибольшего воздействующего совокупного излучения

(прямого, диффузного и отраженного). В таблице 2 представлен пример из базы знаний в индексном формате.

Таблица 2 – пример из базы знаний определения направления наибольшего излучения

Пример: Комбинация для направления 9					
Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4	Датчик 5	Вывод
1	1	2	2	4	, 9 (1) : 1

Модуль (оптимизирующий) второй нечеткой системы «Choosing of Direction for Position Correction» позволяет определить оптимальные направления с точки зрения соотношения, прогнозируемого количества энергии в новом направлении к прогнозируемому количеству энергии, необходимому для регулировки текущего направления. Булево множество на пересечении термов в выходе второй нечеткой системы обеспечивает возможность дальнейшей подстройки системы под определенные параметры (потребляемая мощность, время на выполнение шага и другие) сопряженного исполнительного механизма. Предложенный метод оптимизации, позволяет изменять приоритет принятия решения о смене направления при помощи функций округления синтезированных значений. При методе округления «floor» (округление к меньшему) решение чаще будет отрицательным, при «round» (округление к ближайшему целому) - положительным. В таблице 3 представлен пример из базы знаний в индексном формате.

Таблица 3 – пример из базы знаний определения оптимального направления излучения

Принятие решения о смене позиции								
Пример правила					Инструкция			
Позиция 1	Позиция 2	Интенсивность	Кол-во шагов	Решение	Номер позиции	Интенсивность	Кол-во шагов	Решение
6	7	3	4	2	1-9	1, 2, 3, 4	0-10	1(нет), 2(да)

База знаний содержит комбинации, устанавливающие соотношение между количеством энергии от излучения в новом направлении и количеством шагов, которые необходимо совершить для его достижения. На первом выходе синтезируются значения количества шагов до нового направления, на втором выходе синтезируются значения, интерпретируемые системой как: 1 – игнорировать направление, 2 – вычислить угол наклона по шагам до нового направления.

Синхронизация между двумя нечеткими системами позволяет вычислять оптимальные направления для регулировки положения рабочей поверхности, что позволяет реализовать критерий оптимизации – ориентирование в направлении максимального излучения при минимальных затратах энергии на переориентирование. На рисунке 11 представлен результат тестирования системы в составе разработанных модулей прогнозирования и оптимизации.

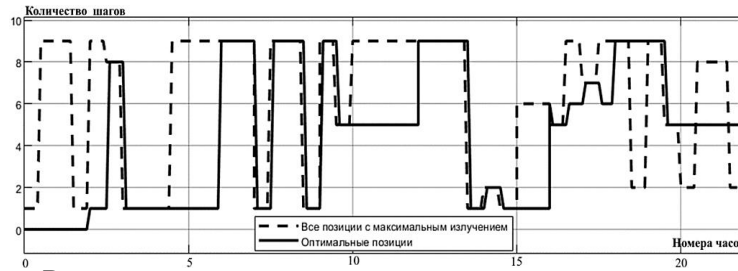


Рисунок 11 – Результат тестирования реализованного интеллектуального модуля

На рисунке 12 представлены результаты тестирования предложенной ИСАУ, отображающие сокращение затрат на переориентирование. В ходе тестирования моделировались случайные воздействия излучения (в течение 22 часов) по девяти направлениям относительно рабочей поверхности коллектора с пятью ИзУ. Тестирование выполнено для ИАСУ с функционирующим оптимизирующим модулем (ОМ) и без модуля оптимизации. Также тестирование проведено для стандартной следящей системы (по часовому углу склонения солнца).

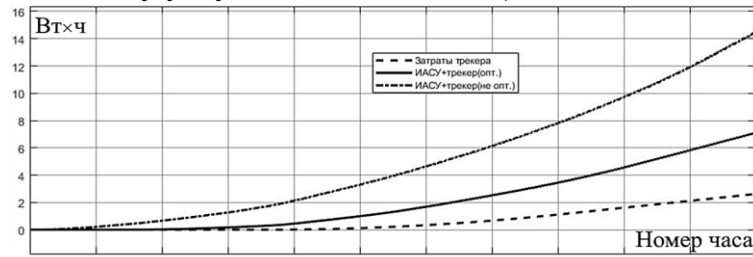


Рисунок 12 – График расхода энергии на переориентирование

По оси X обозначены затраты электрической энергии на выполнение работы линейного привода (напряжение питания двигателя – 12 В; номинальный ток - 23 А); По оси Y обозначены номера часов. На рисунке 13 для того же тестирования представлено сравнение количества полученной энергии массивом коллекторов (120 трубок с общим КДП равным 70%).

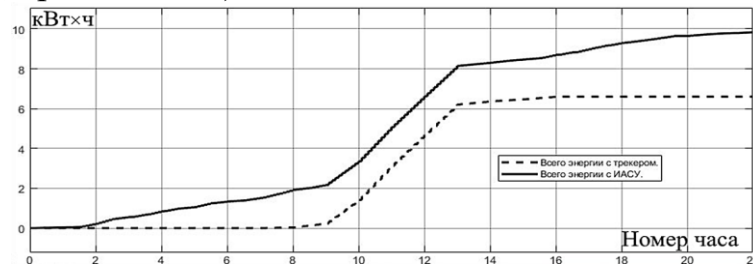


Рисунок 13 – График полученной энергии массивом коллекторов

Для имитации работы исполнительных механизмов по изменению азимутального и зенитного угла наклона рабочей поверхности коллектора, реализована имитационная модель с применением логических последовательностей, сформированных из блоков «Logical operator», «Compare to constant», «Multi Switch», «Switch» и математических операторов. На рисунке 14 представлена реализованная в Matlab Simulink модель.

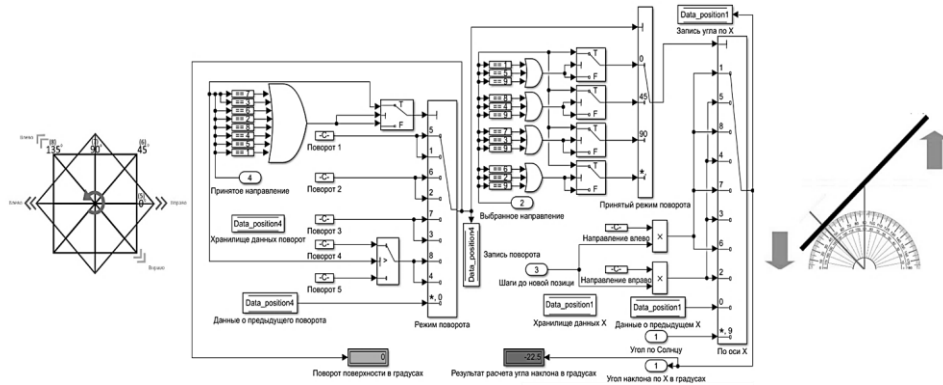


Рисунок 14 – Имитационная модель изменения угла наклона рабочей поверхности коллектора

Для исследования результатов имитационного моделирования разработаны вспомогательные блоки визуализации данных, в том числе модуль расчета общего уровня излучения от всех источников, поддерживающий функцию определения максимального совокупного излучения. Данные о внешних воздействиях смоделированы при помощи блоков «Uniform Random Number». Профили блоков настроены для имитирования различных типов излучений, таких как: прямое излучение солнца (максимальная интенсивность - 800 Вт/м^2 частота изменения по часам), диффузное излучение (максимальная интенсивность - 80 Вт/м^2 , частота от 5 минут), отраженное излучение (случайное значение от 1 Вт/м^2 до 800 Вт/м^2 с частотой изменения от 1 минуты). На рисунке 15 приведены результаты (с расширенной визуализацией) тестирования ИАСУ, интегрированной в разработанную имитационную модель.

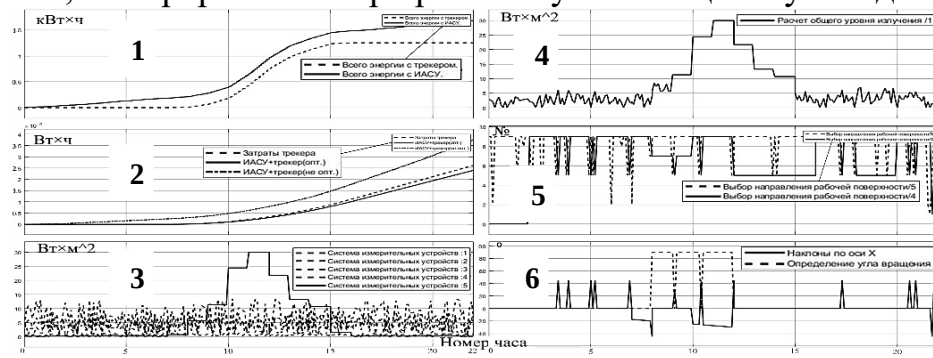


Рисунок 15 – Результаты тестирования ИАСУ на имитационной модели, где

1 - количество энергии, преобразованной солнечным коллектором; 2 - количество энергии, затраченной на регулировку положения рабочей поверхности; 3 - излучение измеренное 5 ИзУ; 4 – максимальное измеренное излучение; 5 – номера направлений, соответствующие максимальному излучению, синтезированные прогнозирующим модулем; 6 – углы наклона рабочей поверхности.

По результатам тестирований было установлено, что в большинстве сценариев воздействия совокупного излучения на поверхность вакуумного солнечного коллектора, большее количество энергии преобразовано коллектором с системой регулирования на базе ИАСУ в сравнении с классической системой солнечного трекинга по часовому углу склонения Солнца.

Например, количество преобразованной энергии вакуумными коллекторами с ИАСУ/трекером: зимний день - $9.834 \text{ кВт} \times \text{ч}$ / $6.598 \text{ кВт} \times \text{ч}$ в сутки; летний день - $52.04 \text{ кВт} \times \text{ч}$ / $51.79 \text{ кВт} \times \text{ч}$ в сутки; зимний пасмурный день - $8.054 \text{ кВт} \times \text{ч}$ / $4.609 \text{ кВт} \times \text{ч}$ в сутки. При затратах энергии на выполнение регулировки положения рабочей поверхности коллектора системой с ИАСУ/трекером: зимний день - $0.07132 \text{ Вт} \times \text{ч}$ / $0.02633 \text{ Вт} \times \text{ч}$ в сутки; летний день - $0.04568 \text{ Вт} \times \text{ч}$ / $0.04809 \text{ Вт} \times \text{ч}$ в сутки; зимний пасмурный день - $0.06938 \text{ Вт} \times \text{ч}$ / $0.02453 \text{ Вт} \times \text{ч}$ в сутки. В ходе анализа экономической эффективности проектов реализации гелиосистем на территории ДФО установлено, что с применением ИАСУ окупаемость проекта составляет 9 лет, с применением солнечного трекера - 13 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке нового решения, повышающего эффективность гелиосистем, включающих системы солнечного треккинга для работы в условиях пониженных температур и короткого дня, с учетом различных распределенных источников излучения (в том числе отражающих поверхностей).

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Концепция о существовании взаимосвязи между потенциалом эффективности управляемых вакуумных солнечных коллекторов и воздействием диффузного и отраженного излучения, получила теоретическое и экспериментальное подтверждение с учетом специфики инсоляции территории Дальнего Востока России. Установлена зависимость эффективности гелиосистемы от площади рабочей поверхности коллектора, активно поглощающей совокупное излучение. В среднем за год коллектор, ориентируемый на максимальное совокупное излучение, эффективнее аналогичного коллектора, ориентируемого на прямое излучение на 9.8%.

2. Установлена зависимость величины энергии E , получаемой солнечным коллектором от его управляемых динамических характеристик. Разработан метод оптимизации положения рабочей поверхности солнечного коллектора (выраженной площадью активно поглощающей поверхности $S_{\text{п}}$) позволяющий сократить количество смен направления нормали центра его рабочей поверхности при затратах энергии на переориентирование $E_{\text{п}}$, превышающих полученную дополнительную энергию от совокупного излучения E .

3. Выявлены условия оптимизации режимов работы ИАСУ, позволяющие снизить затраты энергии $E_{\text{п}}$ на выполнение регулировки угла наклона рабочей поверхности для ориентирования на максимальное воздействующее совокупное излучение E , положенные в основу алгоритма функционирования ИАСУ, реализующего прогноз и анализ параметров воздействия совокупного излучения (прямого солнечного излучения $G_{\text{п}}$, диффузного излучения $G_{\text{д}}$ и отраженного излучения $G_{\text{о}}$).

4. Выявлена целесообразность применения разных вариантов архитектуры автоматизированной автономной гелиосистемы в зависимости от критериев

оптимизации процесса. Разработана имитационная модель прихода прямой солнечной радиации, расширяющая библиотеку программной среды Matlab Simulink и интегрируемая с разработанной ИАСУ. Предложенная модель позволяет проектировать несколько вариантов архитектуры автоматизированной автономной гелиосистемы (рекомендуемая разработанная архитектура представлена в патенте на изобретение № 2693968) для выбора оптимальной конфигурации с целью максимизации получаемой энергии совокупного излучения E .

5. Установлено влияние углов наклона $\varphi_{\text{на}}$ $\varphi_{\text{нз}}$ рабочей поверхности вакуумного солнечного коллектора, значений затрат энергии $E_{\text{п}}$ при регулировке направления рабочей поверхности и значений энергии, полученной в результате ориентирования, на обеспечение максимального воздействия совокупного излучения, что обеспечило разработку программной реализации ИАСУ (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020611784).

6. Выявлено, что ориентирование нормали центра рабочей поверхности коллектора в направлении максимального излучения с минимальным количеством затрат энергии на переориентирование, позволило сократить срок окупаемости проектов внедрения вакуумных солнечных коллекторов в отопительные системы с 13 до 9 лет. Установлено, что при незначительном удорожании стоимости на 2.3% гелиосистемы (с интеграцией ИАСУ), при типовом периоде расчета индекс прибыльности PI в 1.4 раза больше.

Направлением дальнейших исследований является усовершенствование метода оптимизации положения рабочей поверхности солнечного коллектора, а также развитие алгоритмов функционирования подобных систем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах WoS\Scopus:

1. Boldyrev, V. V. Designing an Adaptive Software and Hardware Complex for Converting Solar Energy / V. V. Boldyrev, M. A. Gorkavyy, D. B. Solovev // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8934085. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934085.

2. Boldyrev, V. V. Intelligent Control Algorithm for an Automated Autonomous Power Supply System / V. V. Boldyrev, M. A. Gorkavyy, D. B. Solovev // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271555. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271555.

3. Boldyrev, V. V. Development of an intelligent control system for an autonomous hybrid solar system / V. V. Boldyrev, M. A. Gorkavyy // Lecture Notes in Networks

and Systems (см. в книгах). – 2021. – Vol. 200. – P. 96-105. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_11.

В рецензируемых журналах ВАК:

4. Болдырев В.В., Горькавый М.А., Разработка имитационной модели прихода солнечной радиации, входящей в структуру интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной гелиосистемы, Научно-технический вестник Поволжья, Издательство: Общество с ограниченной ответственностью «Рашин Сайнс» (Казань), 2020.

5. Болдырев В.В., Горькавый М.А., Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения, Учёные записки КнАГТУ 2020 № II-1(42) Науки о природе и технике, 2020.

Регистрация объектов интеллектуальной собственности:

6. Патент № 2693968 С1 Российская Федерация, МПК F24S 30/00. Адаптируемый к положению естественного источника инфракрасного излучения (Солнца) держатель рабочей поверхности солнечного коллектора: № 2018101835: заявл. 17.01.2018: опубл. 08.07.2019 / В. В. Болдырев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный университет" (ФГБОУ ВО "КнАГУ").

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611784 Российская Федерация. Программа для СППР автоматического ориентирования рабочей поверхности солнечного коллектора на источник электромагнитного излучения: № 2020610971: заявл. 03.02.2020: опубл. 10.02.2020 / В. В. Болдырев.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664545 Российская Федерация. Программа оптимизации комплекса траекторий движения и повышения энергоэффективности промышленного робота, входящего в состав автоматизированного технологического процесса: № 2020617707: заявл. 14.07.2020: опубл. 13.11.2020 / М. А. Горькавый, А. Ю. Ефимов, В. В. Болдырев, В. П. Егорова.

В рецензируемых журналах РИНЦ:

9. Болдырев, В. В. Анализ эффективности алгоритмов нечеткого вывода Sugeno и Mamdani в задачах оптимизации автоматизированных систем слежения / В. В. Болдырев // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 164-167.

10. Болдырев, В. В. Оценка экономической эффективности инновационного проекта по внедрению в эксплуатацию автоматизированной гелиосистемы на северных территориях Дальнего Востока / В. В. Болдырев // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы IV Международной

научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021.

11. Болдырев В.В., Исследование зависимости потенциала солнечной энергии на территориях пониженных температур от типа реализации гелиоустановки, В сборнике: производственные технологии будущего: от создания к внедрению материалы международной научно-практической конференции. 2019.

12. Болдырев В.В., Солнечный коллектор в – 50 °С, в сборнике: Молодые ученые - Хабаровскому краю. материалы XIX краевого конкурса молодых ученых и аспирантов. 2017. С. 160-163.

13. Болдырев В.В., Горькавый М.А., Егорова В.П. Техничко-экономическое обоснование разработки инновационного продукта, направленного на применение возобновляемых источников энергии в местных системах отопления, расположенных на территории хабаровского края, В сборнике: молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. материалы III всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч. Комсомольск-на-амуре, 2020. с. 198-202.

14. Максимов Н.А., Болдырев В.В. К вопросу о реализации системы управления с использованием нечеткой логики, на ориентирование рабочей поверхности вакуумного солнечного коллектора, В сборнике: Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. сборник научных статей по итогам второй международной научной конференции. 2019. С. 116-119.

15. Болдырев, В. В. Техничко-экономическое обоснование разработки инновационного продукта, направленного на применение возобновляемых источников энергии в местных системах отопления, расположенных на территории Хабаровского края / В. В. Болдырев, М. А. Горькавый, В. П. Егорова // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч., Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2020 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2020.