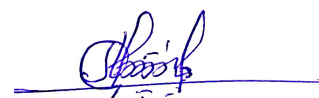


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.С. ОСИМИ**

УДК 621.311.243: 004.89

На правах рукописи



ШАРИФОВ БОХИРДЖОН НАСРУЛЛОЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Душанбе – 2024

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированный электропривод и электрические машины» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими

Научный руководитель: **Диёрзода Рустам Хакимали,**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод и электрические машины» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими

Официальные оппоненты: **Русина Анастасия Георгиевна,**
доктор технических наук, доцент, декан факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета

Джураев Шохин Джураевич,
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика» филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Душанбе.

Ведущая организация: Институт энергетики Таджикистана
р. Кушониён

Защита диссертации состоится «06» мая 2024 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 6Д.КООА-049 при Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, пр. академиков Раджабовых, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и на сайте организации <https://web.ttu.tj>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Султонзода Ш. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. Всего за 1 час земля получает от солнца больше энергии, чем мировое сообщество потребляет за год. Основной проблемой, препятствующей ускоренному внедрению в наземную энергетику солнечных энергетических установок (СЭУ), является относительно низкий коэффициент полезного действия (КПД) фотопреобразователей. В настоящее время средний КПД кремниевых фотоэлектрических модулей (ФЭМ) массового производства составляет около 20%, что значительно ниже потенциала солнечной энергии, поступающей на каждый квадратный метр модуля. Как результат, суммарный КПД кремниевых ФЭУ ограничивается приблизительно 15%. Для повышения КПД ФЭУ возможны следующие варианты решения этой проблемы:

1. Улучшение материалов и структуры фотоэлементов (ФЭ). Разработка новых материалов с более высокой эффективностью преобразования солнечной энергии в электрическую и оптимизация структуры элементов могут значительно повысить КПД ФЭУ.

2. Использование технологий мультикристаллического кремния. Мультикристаллический кремний имеет более высокий КПД, чем обычный кремний, поэтому использование таких материалов может повысить общую эффективность ФЭУ.

3. Включение дополнительных компонентов, таких как солнечные трекеры, концентраторы и охлаждающие системы, может улучшить процесс преобразования солнечной энергии в ФЭУ и повысить их КПД.

4. Улучшение архитектуры установки. Оптимизация размещения ФЭМ, угла наклона и ориентации модулей, а также локальное управление электроникой программируемыми контроллерами могут повысить эффективность генерации энергии.

В целом повышение эффективности генерации энергии в ФЭУ является важной задачей, которая требует исследований и инноваций в области материалов, структур и системных решений. Это поможет увеличить количество генерируемой энергии и внести вклад в развитие возобновляемых источников энергии.

Солнечная энергия, полученная ФЭУ, зависит от различных факторов, таких как температура и солнечная инсоляция (СИ). При изменении этих факторов изменяется и мощность ФЭУ; поэтому очень важно отслеживать точку, в которой полученная мощность максимальна, эта точка называется точкой максимальной мощности (ТММ). Данный алгоритм рассматривается в зарубежной литературе под названием Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Одним из методов повышения эффективности ФЭУ является применение алгоритмов слежения за ТММ. Количество энергии, получаемой от ФЭ, также зависит от фотогальванического напряжения. Чтобы извлечь максимальную мощность из падающей солнечной энергии, очень важно отслеживать максимальную мощность ФЭУ в любых условиях окружающей среды. Отслеживания ТММ ФЭУ производится посредством

преобразователей постоянного тока и интеллектуального регулятора, работающего на основе алгоритмов слежения за ТММ.

В связи с этим важным аспектом разработки современных эффективных ФЭУ является разработка соответствующей системы управления.

Степень разработанности темы.

Текущий тренд в развитии эффективных ФЭУ заключается в переходе к системам управления, которые способны отслеживать ТММ ФЭУ. Работы, выполняемые в этой области, получили широкое признание отечественных и зарубежных исследователей, таких как; Ахмедов Х.М., Каримов Х.С., Кабутов К., Андреев В.М., Белова И.А., Гимазов Р.У., Аржанов К.В., Шиняков Ю.А., Yang H., Piegari L, Rizzo D., Rahman M. W., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M., и др.

Существует множество различных методов, которые можно использовать при слежении за ТММ ФЭУ. Среди них можно выделить несколько наиболее распространённых методов: метод возмущения и наблюдения (P&O), метод возрастающей проводимости (InC), метод токовой развертки, метод постоянного напряжения и тд. После анализа степени исследованности проблемы поиска алгоритмов слежения за ТММ, можно сделать вывод о том, что, эти алгоритмы, несмотря на их значимость и эффективность в определении ТММ, сталкиваются с определенными недостатками. Во-первых, они обычно имеют медленную сходимость к этой точке, что значительно замедляет и усложняет процесс. Кроме того, существуют ограничения в точности работы этих алгоритмов, что ограничивает их способность достичь высоких уровней точности.

В настоящее время приоритетным направлением для множества исследователей является исследование возможностей интеллектуальных систем управления в различных областях и их активное применение. Вопросы применения интеллектуальных систем управления рассматриваются в работах таких авторов, как Мартинович М.В., Степанова Д.А., Лунева Е.А., Гладышев А.И. и других.

Поскольку использование традиционных алгоритмов в системах слежения за ТММ ФЭУ часто не способны полностью удовлетворить требования, относительно точности и скорости отслеживания. Это открывает новые перспективы для внедрения методов интеллектуального управления, включая алгоритмы нечеткой логики, которые уже доказали свою эффективность при решении аналогичных задач в других областях техники.

Таким образом, исследование высокоэффективных ФЭУ и разработка новых методов и систем для улучшения эффективности ФЭУ, безусловно, актуальны, а научная и практическая значимость вопросов, связанных с разработкой методик расчета их параметров, не вызывает сомнений.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности процесса преобразования солнечной энергии в ФЭУ путем разработки и исследования интеллектуальных систем управления на основе методов нечеткой логики.

Объект исследования – автономная ФЭУ на базе импульсных преобразователей постоянного тока.

Предмет исследования – математические модели ФЭУ и методы синтеза регуляторов нечеткой логики.

Концепция работы – разработка структурных моделей и оптимизация управления ФЭУ.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать и оценить современные системы управления ФЭУ, выявить их основные проблемы и недостатки. Обосновать необходимость использования интеллектуальной системы управления ФЭУ.

2. Разработать математическую модель ФЭУ и определить выходные зависимости под действием разнообразных факторов окружающей среды. Провести исследования эффективности процессов преобразования солнечной энергии в электрическую с учетом вариации параметров вольтамперных характеристик (ВАХ).

3. Разработать регулятор нечеткой логики (РНЛ) слежения за ТММ ФЭУ для повышения эффективности ФЭУ.

4. Произвести оптимизацию РНЛ с помощью генетического алгоритма.

5. Разработать и исследовать физическую модель ФЭУ с интеллектуальной системой управления.

6. Оценить технико- экономическую эффективность, достигнутую в результате применения интеллектуальной системы управления.

Методология и методы исследования

Проведенные исследования основаны на фундаментальных научных принципах, включающих в себя анализ солнечной энергетики, изучение физико-технических свойств солнечных элементов, теорий автоматического управления, применение численного моделирования и проведение натурных экспериментов. При исследовании динамических и статических режимов ФЭУ использована интегрированная среда MatLab/Simulink.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Обоснована объективная необходимость использования интеллектуальных систем управления ФЭУ для повышения их эффективности.

2. Разработана комплексная математическая модель ФЭУ, позволяющая проводить исследование выходных характеристик ФЭУ в различных климатических условиях.

3. Разработана база правил синтеза РНЛ слежения за ТММ, обеспечивающего повышение эффективности ФЭУ.

4. Разработано программное обеспечение интеллектуальной системы управления ФЭУ, позволяющее оптимизировать РНЛ слежения за ТММ на базе программного комплекса MATLAB/Simulink.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Анализ и оценка современных систем управления ФЭУ, обоснование целесообразности использования интеллектуальной системы управления для повышения их эффективности.

2. Разработанная математическая модель ФЭУ с последующей ее верификацией, результаты исследования эффективности процессов

преобразования солнечной энергии в электрическую с учетом вариации параметров вольтампер-ной характеристики (ВАХ).

3. Методика синтеза РНЛ на основе предложенной базы правил с результатами исследования переходных процессов в ФЭУ.

4. Предложенные метод и алгоритм оптимизации РНЛ слежения за ТММ ФЭУ.

5. Результаты экспериментальных исследований характеристик ФЭУ на физической модели.

6. Оценка технико - экономической эффективности применения интеллектуальной системы управления ФЭУ.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается применением строгих математических методов, отличной сходимостью численных расчетов и моделирования с экспериментальными данными, полученными на физической модели ФЭУ.

Практическая ценность результатов работы состоит в следующем:

1. Разработанные математические модели могут быть использованы при проектировании и оптимизации выдачи электрической мощности ФЭУ.

2. Обоснованные рекомендации по выбору структуры, алгоритма синтеза РНЛ, а также предложенная методика их настройки с помощью генетических алгоритмов можно применять при проектировании систем электроснабжения с высокоэффективными ФЭУ.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматизированный электропривод и электрические машины» Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими при изучении дисциплин «Моделирование электромеханических систем» и «Теория автоматического управления» (Акт внедрения от 21.11. 2023).

4. Разработанная компьютерная программа «Программный компонент для оптимизации регулятора нечеткой логики фотоэлектрической установки» зарегистрирована Министерством культуры Республики Таджикистан (Свидетельство №181 от 30.12.2023).

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в общей постановке цели и задач исследования, разработке математических моделей ФЭУ, проведении экспериментальных исследований по определению ее основных показателей, участии в обработке, анализе, обобщении полученных результатов, подготовке материалов к публикации, а также составлении основных выводов, сделанных автором совместно с научным руководителем.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности **05.14.01 – Энергетические системы и комплексы** по следующим пунктам:

3.1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом

и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования;

3.2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии;

3.4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок.

3.10. Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, контроля, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии.

3.11. Теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы, энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера.

3.13. Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем, комплексов и установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях и научных семинарах:

- Международная научно-практическая конференция «Энергетика: состояние и перспективы развития», Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе, 20 декабря 2023
- XI Всероссийская научно-практическая конференция. –Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». –2021.
- 2018, Международной научно-практической конференции «World science: problems and innovations».
- IEEE Conference Publication / IEEE Explore Published in: 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC).
- Международная научно-практическая конференция «Перспектива

развития науки и образования», Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе, 28 ноября 2019.

- 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020.

- 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2016, pp 17-21 (IEEE Conference Publications).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 16 статьях, 8 из которых в журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и ВАК при Минобрнауки России, а также 8 работ в прочих научных изданиях.

Получено свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников, приложений. Работа изложена на 201 страницах машинописного текста, содержит 109 рисунка, 18 таблиц и формул. Список использованных источников включает 107.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен аналитический обзор научно-технической литературы, касающейся вопросов отслеживания точки максимальной мощности. Рассмотрены классические алгоритмы отслеживания точки максимальной мощности ФЭМ, такие как: возмущение и наблюдение (P&O), возрастающей проводимости (InC), постоянного напряжения и их адаптивные модификации. Далее проведено исследование интеллектуальных алгоритмов отслеживания, таких как искусственные нейронные сети и нечеткая логика. Определено место алгоритмов нечеткой логики в системе управления преобразователем постоянного тока. Также в данной главе проводится краткое сравнение с учетом трех основных критериев: сложность алгоритма, точность и требования к реализации. Из-за простоты реализации очень долгое время наиболее предпочтительными были классические методы поиска точки оптимума. Но, несмотря на их очевидную простоту, при динамическом изменении условий окружающей среды классические алгоритмы с трудом справляются с отслеживанием. Эти проблемы открыли возможности для применения методов интеллектуального управления, включая алгоритмы нечеткой логики, которые имеют преимущества в точности и корректной работе при быстро меняющихся условиях окружающей среды.

Во второй главе разработана комплексная математическая ФЭУ, позволяющая проводить исследование выходных характеристик ФЭМ в различных климатических условиях (рис.1.). Математическая модель построена с использованием различных подходов, таких как дифференциальные уравнения, логическое программирование и т.д. Ключевым фактором в математической модели является определение связанных переменных и уравнений, которые описывают взаимодействие между компонентами ФЭУ. Разработка математических моделей для каждого компонента ФЭУ с входными и

выходными переменными, связанными с другими компонентами системы, позволит построить полную имитационную модель ФЭУ. Построение такой модели является важным этапом в анализе и проектировании ФЭУ. Она позволяет смоделировать и изучить поведение каждого компонента ФЭУ и их взаимосвязи при различных условиях и воздействиях. Имитационная модель ФЭУ на основе таких математических моделей может быть использована для проведения различных аналитических исследований.

Используя математическую модель смоделирован приход уровня СИ на горизонтальную поверхность в климатических условиях Республики Таджикистан (г. Душанбе). Рассмотрено влияние уровня СИ и температуры окружающей среды на эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. Проведенные исследования позволили выявить закономерности влияния внешних факторов окружающей среды на характеристики ФЭМ, которые приведены на уравнении математической модели ФЭМ (1). Отличительной особенностью математической модели заключается в том, что модель оптимизирована генетическим алгоритмом и работает с высокой точностью на низких диапазонах солнечной инсоляции.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_c = I_{ph} - I_o \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c}(U_c + I_c R_c) \right]} - 1 \right\} \\ U_c = \frac{AkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_c + I_o}{I_o} \right) - I_c R_c \\ C_{SU} = 1 + \beta_T \alpha_S (S_x - S_C) + k_{SU} \\ C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_C} (S_x - S_C) + k_{SI} \\ C_{TU} = 1 + \beta_T (T_C - T_x) \\ C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_C} (T_x - T_C) \\ \alpha_S = \frac{T_x - T_C}{S_x - S_C} \\ U_{Cx} = C_{SU} C_{TU} U_c \\ I_{phx} = C_{TI} C_{SI} I_c \\ P_{Cx} = U_{Cx} I_{phx} \end{array} \right. \quad (1)$$

Расчет и выбор коэффициентов k_{SU} , k_{SI} произведен по методу генетического алгоритма (ГА). Целевой функцией является средняя квадратичная ошибка между экспериментальным и теоретическим данным согласно следующему выражению;

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n-1} (P_i - P_{xi})^2} \rightarrow \min \quad (2)$$

где P_i – экспериментальная выходная мощность ФЭМ;
 P_{xi} – теоретическая выходная мощность ФЭМ.

Важным этапом при разработке моделей явилось экспериментальное подтверждение полученных результатов. Для этого были проведены измерения и сравнение полученных данных с результатами расчета по разработанной модели. Это позволило оценить точность моделей и внести необходимые корректировки для ее улучшения.

Полученные результаты имеют практическое значение и могут быть использованы при проектировании, эксплуатации и оптимизации ФЭУ.

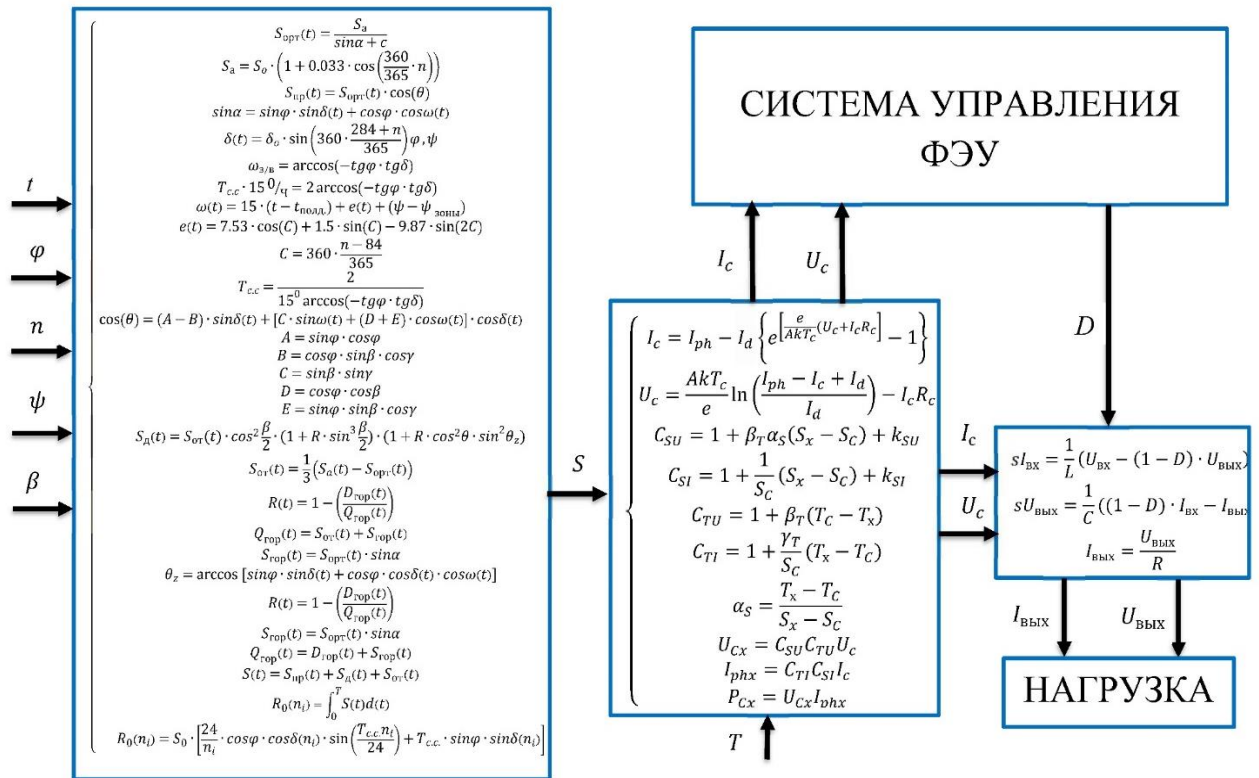


Рисунок 1 – Комплексная математическая модель

В третьей главе приведены основные положения теории нечетких множеств, необходимые для синтеза системы управления на их основе. Дана классификация нечетких регуляторов и описываются основные принципы их построения. Рассмотрена универсальная функциональная схема блока нечеткой логики (БНЛ) (рис.2), на базе которой строится РНЛ слежения за ТММ.

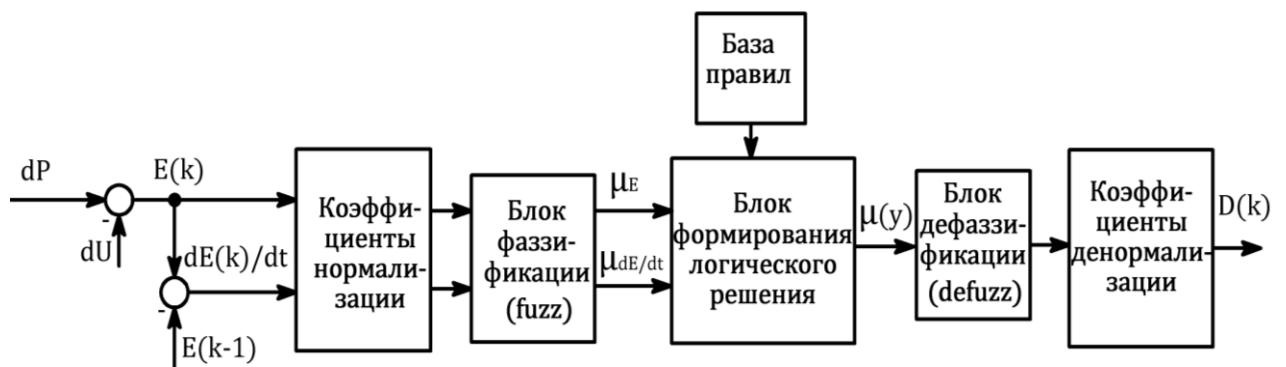


Рисунок 2 – Упрощенная функциональная схема РНЛ

Обеспечение ТММ в вольт ваттной характеристике (ВВХ) (рис. 3) ФЭУ достигается введением двух входных переменных – ошибки $E(k)$ и скорости изменения ошибки $C_E(k)$, рассчитывающихся по формуле (3). Фактическое значение напряжения (U) и тока (I) ФЭУ можно измерять непрерывно и рассчитывать мощность ($P=U \times I$). Выходная мощность ФЭУ проверяется регулятором на основе нечеткой логики в каждой выборке (k), а затем определяется изменение мощности в зависимости от изменения напряжения $\frac{dP}{dU}$. Если это значение $\frac{dP}{dU}$ больше нуля, регулятор изменяет рабочий цикл широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразователя, чтобы увеличивать напряжение до тех пор, пока мощность не станет максимальной или до значения $\frac{dP}{dU} = 0$, если это значение ниже нуля, регулятор изменяет рабочий цикл ШИМ, чтобы снизить напряжение до тех пор, пока мощность не станет максимальной и так далее процесс повторяется при изменении климатических факторов (уровень солнечной инсоляции, температура окружающей среды и т.п.)

$$\begin{cases} E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \\ C_E(k) = E(k) - E(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

где $P(k)$ и $U(k)$ — мощность и напряжения ФЭУ, соответственно.

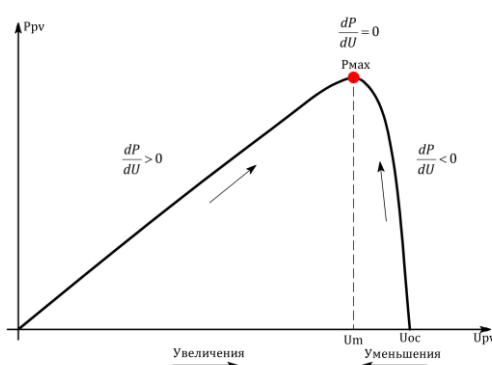


Рисунок 3 – Принцип построения нечеткого алгоритма

Исходя из случая, показанного на рисунке 3, для правильного выбора нечетких множеств для « C_E » и « E » кривую ВВХ следует разделить на несколько зон в целях своевременного изменения интенсивности возмущения согласно следующему принципу:

- 1) рабочая точка перемещается быстро, когда она находится далеко от реального ТММ;
- 2) рабочая точка перемещается медленно, когда находится рядом с реальной ТММ.

На рисунке 4 кривая демонстрирует относительную линейность в диапазоне $Vprv \in (0,18)$. Наклон кривой ВВХ нелинейно уменьшается к нулю в диапазоне $Vprv \in (18,23)$ и отклоняется от нуля в сторону 78 в диапазоне $Vprv \in (23,27,03)$. Основываясь на вышеперечисленных особенностях, кривую ВВХ можно намеренно разделить на зоны, как показано на рисунке 4.

- PB - «Положительно большая»;
- PS - «Положительный маленькая»;
- ZE - «Нулевая»;
- NS - «Отрицательная маленькая»;
- NS - «Отрицательная большая».

В зоне «PB» угол наклона относительно постоянный, поскольку точки на ВВХ в этой зоне удалены от ТММ. Поэтому предполагается увеличение интенсивности возмущения для быстрого перехода из этой зоны в зону ТММ. В зоне «PS» очевидно, что значение угол наклона постепенно приближается к нулю, но до ТММ все еще остается небольшое расстояние. Таким образом, интенсивность возмущений, безусловно, необходимо уменьшать, но не полностью устранять. Если рабочая точка смещается к зоне «ZE», где точки на кривой ВВХ внутри этой зоны «чрезвычайно близки» к ТММ, интенсивность возмущения должна быть очень слабой, чтобы последующие колебания были как можно меньшими.

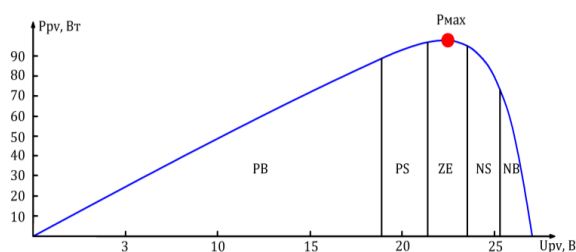


Рисунок 4 – Принцип работы РНЛ на ВВХ

Учитывая, что повышающий преобразователь требует на своем входе точного управляющего сигнала D , необходимо предусмотреть преобразование этой нечеткой информации в детерминированную информацию, такое преобразование называется дефаззификацией. Дефаззификация обычно может выполняться с помощью двух методов: метод центра тяжести (МЦТ) и метода максимального критерия (ММК). Наиболее часто используемый метод дефаззификации — это МЦТ окончательного комбинированного нечеткого множества. Окончательный объединенный нечеткий набор определяется объединением всех выходных нечетких наборов правил.

$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j) \cdot \Delta D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j)} \quad (2)$$

Как только выходной сигнал РНЛ, который представляет собой изменение коэффициента заполнения (k), дефаззифицируется с помощью (2) и масштабируется с помощью коэффициента усиления $S_{\Delta D}$ преобразуется в фактический коэффициент заполнения D (k) по формуле:

$$D(k) = D(k - 1) + S_{\Delta D} \cdot \Delta D(k) \quad (3)$$

Таким образом, алгоритм, реализуемый для построения нечеткого регулятора, приведен на рисунке 5.

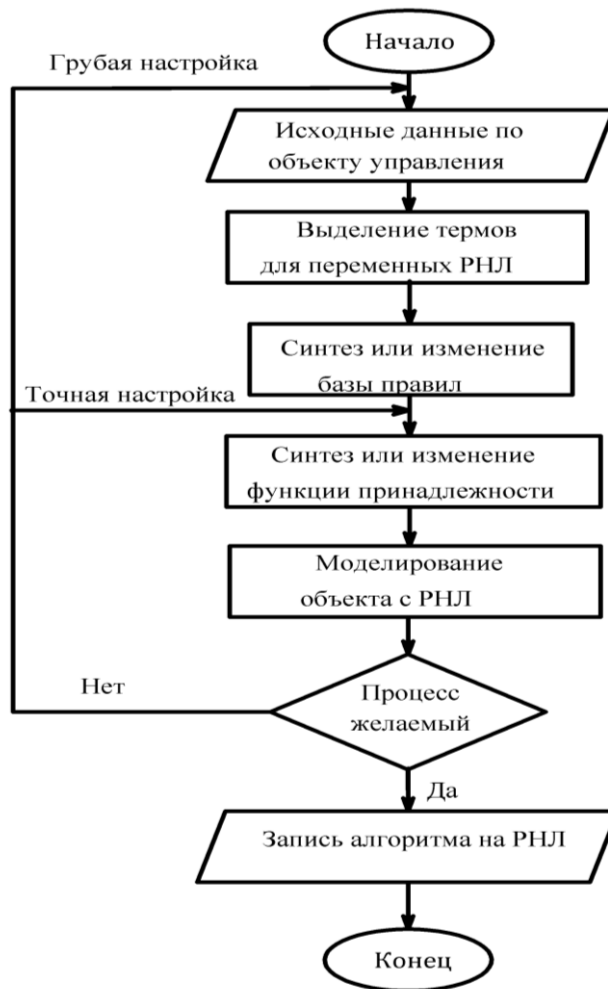


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма реализации РНЛ

Исходя из вышеизложенного, строится алгоритм синтеза РНЛ и определяются функции принадлежности каждой нечеткой переменной (рис.6).

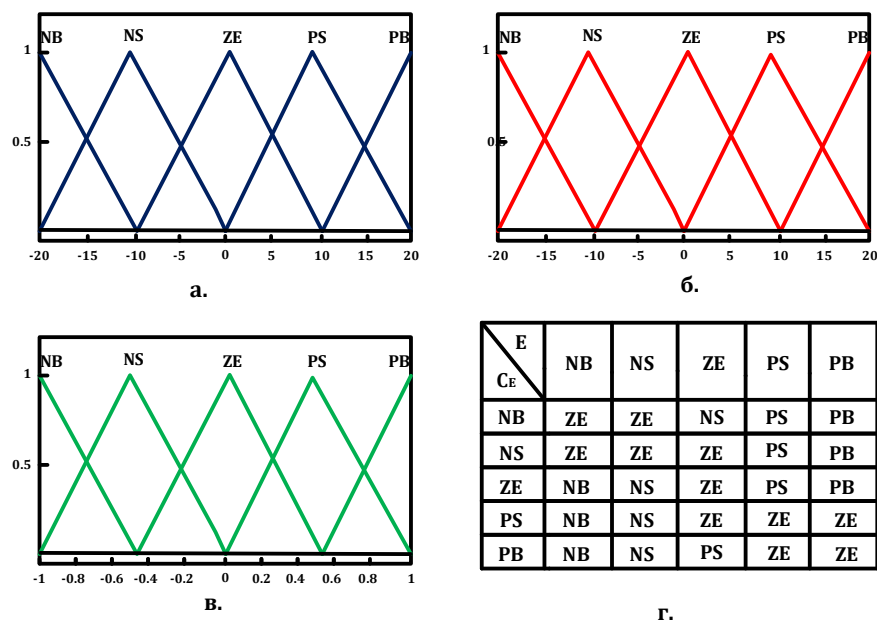


Рисунок 6 – Функция принадлежности а) - ошибки $E(k)$, б) - скорость изменения ошибки $C_E(k)$, в) - логического выхода, г) - база нечетких правил

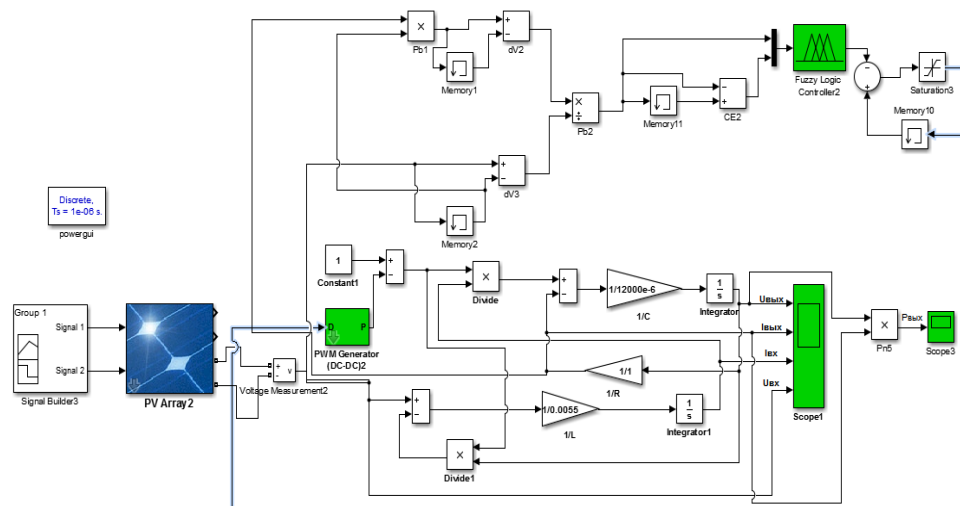


Рисунок 7 – Имитационная модель ФЭУ с РНЛ

Имитационная модель ФЭУ на базе РНЛ, приведенная на рисунке 7, состоит из следующих основных частей:

- датчик уровня СИ и температуры (**signal builder 3**)
- фотоэлектрический модуль мощностью 100 кВт (**PV array 2**)
- повышающий DC-DC преобразователь
- система управления ФЭУ на основе РНЛ

Переходные процессы изменения параметров ФЭУ при различных условиях окружающей среды (уровня СИ и рабочей температуры) приведены на рисунке 8.

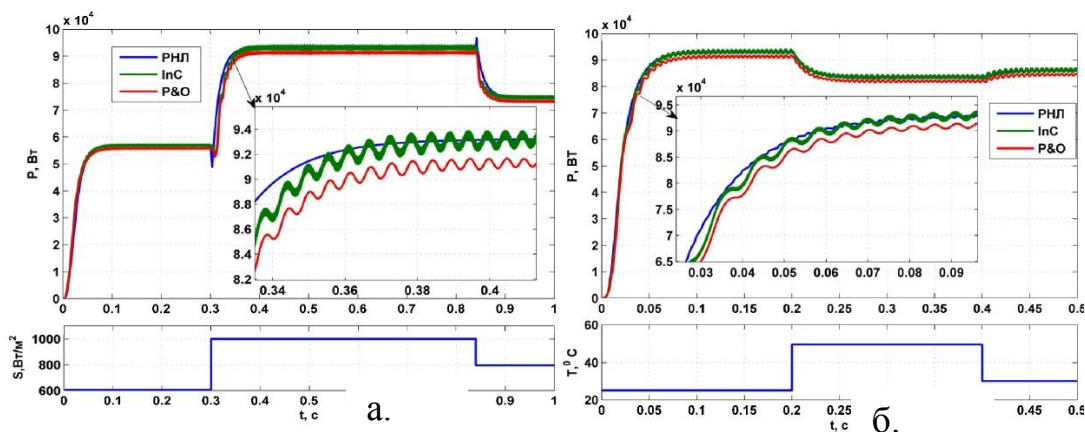


Рисунок 8 – Переходные процессы изменения выходной мощности ФЭУ, а) - при изменении уровня СИ, б) - при изменении температуры

Переходные процессы были смоделированы при использовании алгоритмов Р&О, InС и РНЛ. Анализ рисунка 8 показывает, что отработка максимальной мощности ФЭУ при изменении уровня СИ и температуры окружающей среды РНЛ происходит с меньшим колебанием и высоким быстродействием по сравнению с классическими алгоритмами (InС и Р&О).

Необходимо отметить, что эффективность преобразования солнечной энергии ФЭУ на основе РНЛ, настроенного классическим путем проб и ошибок,

отличается от классических регуляторов на 0.5-0.7% в положительную сторону. Более высокую эффективность преобразования солнечной энергии можно достичь путем оптимизации РНЛ. Оптимизация РНЛ с использованием интеллектуальных алгоритмов является процессом настройки его параметров для достижения оптимальной производительности ФЭУ. Нечеткая логика базируется на использовании нечетких правил, которые описывают поведение системы. Оптимизация регулятора направлена на определение наилучших значений для параметров нечетких правил.

Один из наиболее широко используемых интеллектуальных алгоритмов для оптимизации РНЛ — это генетический алгоритм (ГА). ГА является эволюционным методом, который имитирует процесс естественного отбора и генетической мутации, чтобы создать оптимальное решение. Использование ГА для оптимизации РНЛ позволяет автоматизировать процесс настройки всех параметров, исключая необходимость вручную настраивать каждый из них. Это позволяет достичь более высокой производительности системы управления и упростить процесс настройки регулятора.

Основная идея использования ГА для оптимизации РНЛ, заключается в конструктивных характеристиках этого контроллера. Различные параметры и переменные, необходимые для хорошего функционирования РНЛ, не представляют общих правил, что делает роль оператора существенной в анализе и определении этих условий. Несмотря на знания специалиста, полученные РНЛ методом проб и ошибок может работать не оптимально. ГА, в данном случае, может функционировать как интеллектуальная поисковая система для получения различных возможных архитектур РНЛ. В этом случае необходимо превратить позицию каждой функции принадлежности (ФП) в переменные алгоритма оптимизации.

Разработанная программа позволяет максимизировать выработку мощности ФЭУ путем настройки параметров регулятора слежения за ТММ ФЭУ на основе нечеткой логики. Оптимизация РНЛ может быть выполнена с помощью двух вариантов:

1. Оптимизация входных переменных РНЛ, предусматривающая изменение рабочего диапазона входных переменных.
2. Оптимизация структуры РНЛ, предусматривающая изменение его структуры, т.е. вид и количество функций принадлежности и т.п.

Второй вариант является более трудоемким и требует большой вычислительной мощности, поэтому выбирается первый вариант. Для оптимизации методом ГА структура РНЛ представлена пятью областями: $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ (рис.9).

- $x(1)$ – область изменения функции принадлежности «NB»
- $x(2)$ – область изменения функции принадлежности «NS»
- $x(3)$ – область изменения функции принадлежности «ZE»
- $x(4)$ – область изменения функции принадлежности «PS»
- $x(5)$ – область изменения функции принадлежности «PB»

Автоматизированная программа с помощью ГА оптимизирует параметры $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ с целью максимизации выработки мощности ФЭУ. Из

набора параметров, выбранных ФП, предлагается, что позиции этих функций являются переменными $x(i)$ в задаче оптимизации.

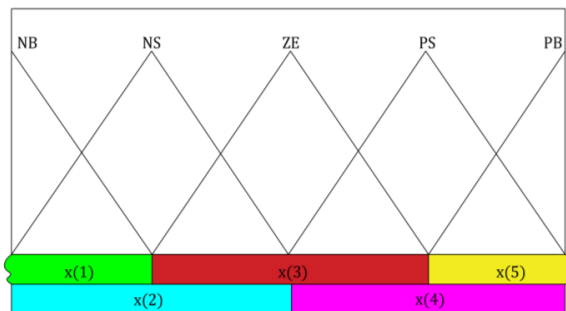


Рисунок 9– Структура оптимизации РНЛ

Блок-схема программы оптимизации параметров РНЛ представлена на рисунке 10 и работает следующим образом. Сначала вводятся параметры РЛНС: функции принадлежности и предел изменений входных переменных. После этого задаются пределы изменения параметров РНЛ: $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$. Далее запускается имитационная модель ФЭУ на программе Matlab/Simulink. После запуска модели ГА производит расчет целевой функции.



Рисунок 10 – Блок – схема оптимизации РНЛ ГА

Целевой функцией ГА является суммарная средняя квадратичная ошибка оптимизации по выходной мощности ФЭУ согласно методу наименьших квадратов.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n-1} (P_{max} - P_{ВЫХ})^2} \rightarrow \min \quad (4)$$

Где, P_{max} - максимальная мощность фотоэлектрической установки на ВВХ
 $P_{ВЫХ}$ -выходная мощность фотоэлектрической установки

$i = 1 \dots n$ -точки переходного процесса

N -количество обучающей пары P_{max} и $P_{ВЫХ}$

Для синтеза параметров РНЛ методом ГА разработано программное обеспечение на базе Matlab/Simulink.

В данной задаче критерием останова выполнения ГА является время выполнения алгоритма и достижение минимума целевой функции.

После минимизации целевой функции ГА выводит оптимизируемые параметры РНЛ $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$.

Модельное исследование РНЛ с оптимизированными параметрами проводится на имитационной модели (рис.7) в программе MatLab. На рисунке 11 приведены база правил оптимизированного РНЛ (РНЛО), функции принадлежности ошибки E , скорости изменения ошибки C_E и логического выхода, оптимизированные ГА.

Анализ влияния РНЛО на эффективность системы рассмотрим при изменении условий окружающей среды (температуры t и уровень СИ $S(t)$)

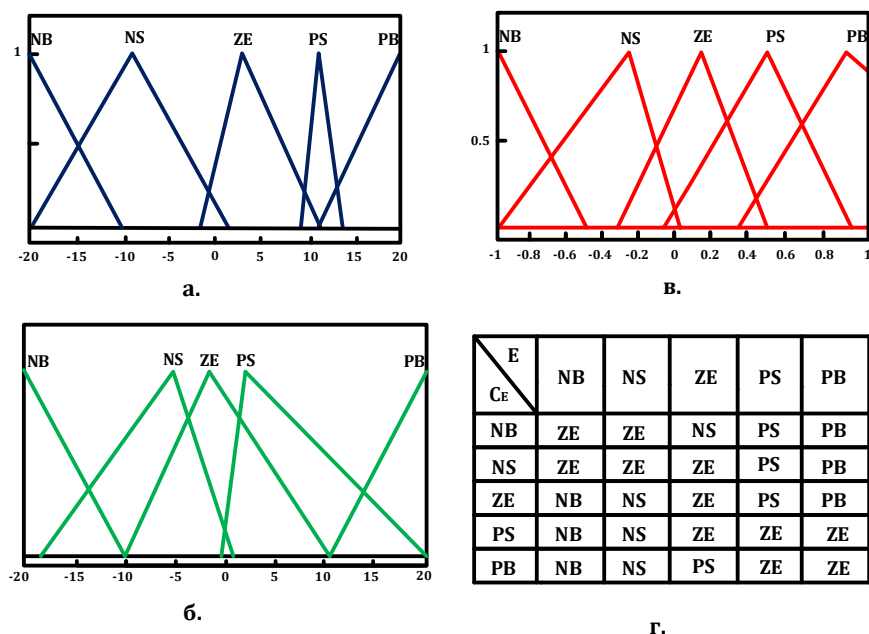


Рисунок 11 – Функции принадлежности а) - ошибки $E(k)$, б)- скорости изменения ошибки $C_E(k)$, в) - логического выхода, г) - база нечетких правил

На рисунке 12 а. приводятся переходные процессы выходной мощности фотоэлектрической установки при изменении уровня СИ. На данном рисунке

приводятся переходные процессы алгоритмов P&O, InC, РНЛ и оптимизированного нечеткого регулятора генетическим алгоритмом РНЛО. Анализ рисунка показывает, что при уровнях СИ 800 Вт/м^2 поиск и отработка ТММ РНЛО производится быстрее относительно других регуляторов. Кроме того, РНЛО имеет низкое колебание выходной мощности и относительно высокую эффективность по сравнению с классическими регуляторами. При увеличении уровня солнечной инсоляции от 800 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 отчетливо видно, что оптимизированный регулятор РНЛО имеет преимущество по быстродействию на 0.05 с , по колебанию выходной мощности $\pm 10 \text{ Вт}$ в то время как другие регуляторы колеблется в пределах $\pm 50 \div 70 \text{ Вт}$ (рис.11 а.) и по эффективности слежения ТММ $1-1.5\%$.

Необходимо отметить, что температура окружающей среды является не мало важным фактором, влияющим на выходные характеристики ФЭУ. Поэтому на рисунке 12 б. представлена временная диаграмма изменения мощности ФЭУ

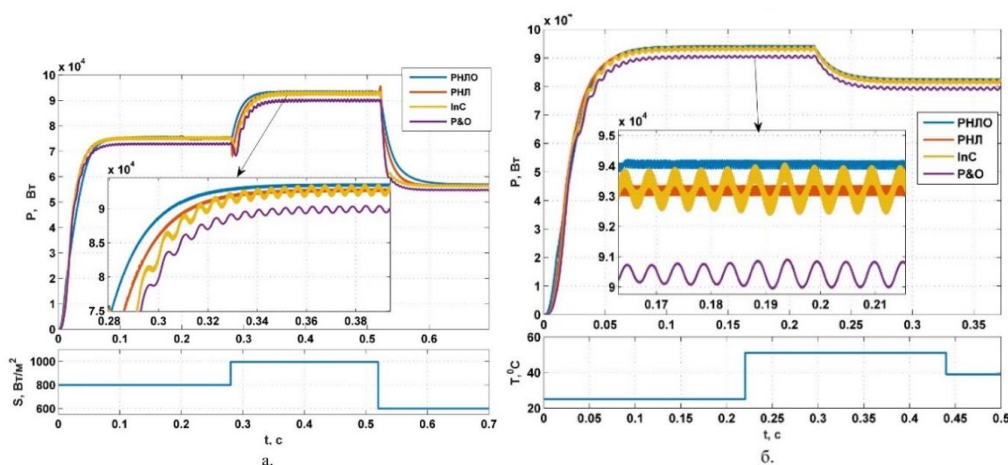


Рисунок 12 – Переходные процессы изменения выходной мощности ФЭУ, а)- при изменении уровня СИ, б)- при изменении температуры

при различных значениях рабочей температуры. Оценка временной диаграммы изменения мощности ФЭУ показывает, что при изменении уровня температуры окружающей среды в пределах $25^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}$ РНЛО имеет высокую эффективность и низкое колебание мощности. Важно отметить, что при работе алгоритмов P&O и InC на рисунке 12 б. можно увидеть волнообразные колебания мощности при скачкообразном изменении температуры. Это наглядное подтверждение того, что во время работы классических алгоритмов поиска точки максимальной мощности система практически никогда не оказывается в точке оптимума. Всегда будет существовать ошибка равная, как минимум шагу счета алгоритма. Колебания вокруг ТММ обычно рассматриваются как нежелательный побочный эффект классических алгоритмов слежения за ТММ, поскольку колебания, очевидно, снижают эффективность слежения. Однако без таких колебаний алгоритм не может обнаружить изменения кривых ВВХ из-за изменений условий окружающей среды. В данном контексте разработанный РНЛ на основе ГА позволяет поддерживать колебание рабочей точки вокруг ТММ с крайне малым отклонением при переходе рабочей точки в зоны «ZE».

Анализ рисунка 13 показывает, что максимум эффективности РНЛО достигается при значениях уровня СИ 500 Вт/м^2 . По мере роста солнечной инсоляции эффективность падает, это объясняется тем, что шаг поиска ТММ в регуляторе устанавливается в низких значениях выходной мощности и при увеличении мощности время слежения ТММ увеличивается, что приводит к уменьшению эффективности систем. Если настраивать алгоритм на высоких значениях СИ, необходимо увеличивать шаг поиска ТММ с целью увеличения быстродействия системы, то в данном случае на низком диапазоне мощностей алгоритм начинает поиск ТММ с большим шагом, что опять приведет к уменьшению эффективности ФЭУ. В данном случае оптимальным решением является настройка алгоритма на низком диапазоне и разделение ВВХ на несколько участков.

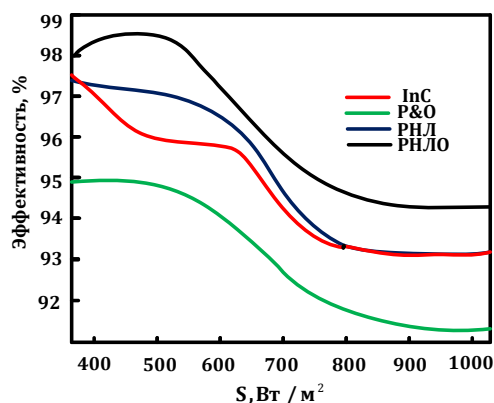


Рисунок 13 – Эффективность работы различных алгоритмов

Моделирование подтвердило, что использование ФЭУ с повышающим преобразователем, в систему управления которой включен регулятор нечеткой логики, является одним из самых перспективных направлений преобразования солнечной энергии в электрическую. Эта инновационная система эффективно решает целый ряд проблем, включая надежность, точность и скорость работы.

В четвертой главе представлена реализация в реальном времени системы отслеживания ТММ ФЭУ на основе РНЛО. С этой целью создана физическая модель ФЭУ для исследования работоспособности разработанного регулятора.

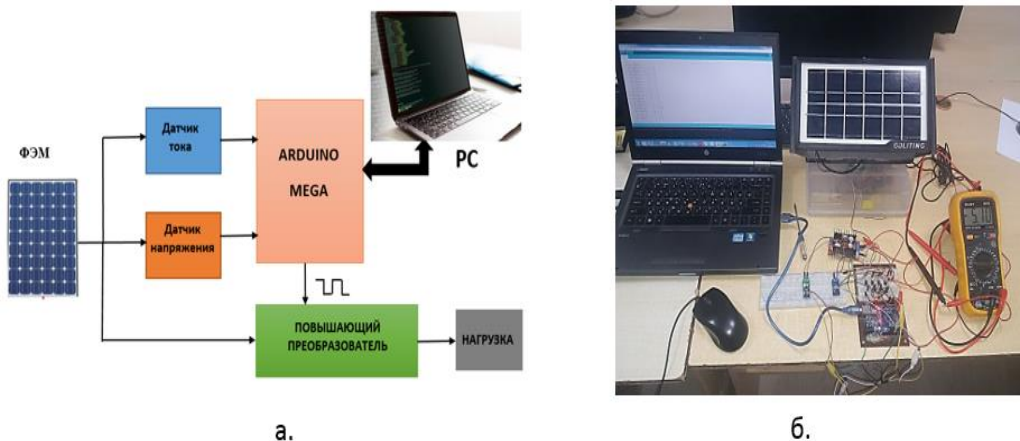


Рисунок 14 – Функциональная схема (а) и общий вид физической модели исследования (б).

Функциональная схема физической модели представлена на рисунке 14 которая состоит из следующих основных частей.

1. Фотоэлектрический модуль
2. Программируемый логический контроллер ARDUINO
3. Датчики тока и напряжения
4. Импульсный повышающий преобразователь
5. Персональный компьютер или ноутбук
6. Нагрузка.

Принцип работы физической модели начинается с подачи выходной мощности ФЭП на нагрузку с помощью повышающего преобразователя. В качестве регулятора применяется запрограммированный **ARDUINO**, который будет действовать как регулятор отслеживания ТММ на РНЛО. Управление работой модели осуществляется персональным компьютером, в котором установлен программный комплекс Arduino 1.8.16. Процесс обмена данными между компьютером и контроллером осуществляется с помощью специального кабеля. Чтобы измерять ток и напряжение на выходе ФЭП используется датчики тока и напряжения. Сигналы от датчиков передаются контроллеру и после обработки контроллер отправит сигнал на выходной интерфейс программы Arduino 1.8.16 для слежения и учета. Управление импульсным повышающим преобразователем осуществляется посредством выходного ШИМ канала контроллера. В программируемый контроллер записывается сначала классический алгоритм «Возрастающей проводимости» InC и производится учет производительности ФЭУ. Далее в контроллер загружается оптимизированный алгоритм на основе нечеткой логики и производится сравнение производительности фотоэлектрической установки.

Результаты аппаратной реализации представлены в виде выходной мощности, напряжения и тока ФЭУ, которые были получены в результате анализа работы регуляторов отслеживания ТММ (InC и РНЛО). Полученные значение тока, напряжения и мощности представлены на рисунке 15.

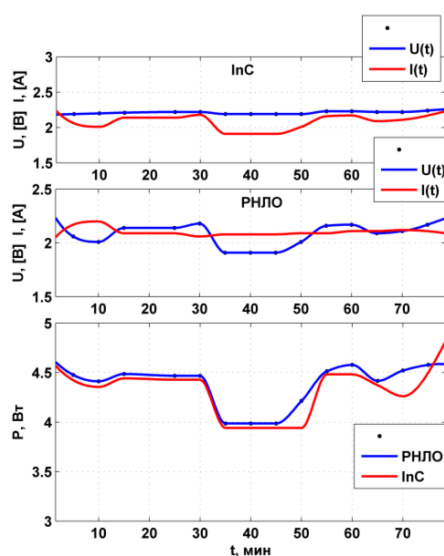


Рисунок 15 – Временная диаграмма изменения мощности $P(t)$, тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ ФЭУ

Результаты проведенных исследований демонстрируют возможность существенного увеличения выработки мощности солнечными установками при введении РНЛО с систему управления. Однако конечное решение целесообразности их внедрения принимается исходя из результатов экономической оценки. Расчет экономической эффективности производится для существующей солнечной электростанции (СЭС) в Мургабском районе с установленной мощностью 220 кВт. Результаты расчета экономического эффекта внедрения РНЛО представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экономические показатели внедрения РНЛО

	Экономические показатели	без РНЛО	с РНЛО
1	Выработка электроэнергии, кВт/час	522500	530337
2	Доход от электроэнергии, сом.	783750	795506
3	Годовая прибыль, сом	11756	
4	Затраты, сом.	6873.1	
5	Срок окупаемости, год	0.6	

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

В приложении к диссертации содержатся материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертации доказана целесообразность разработки и синтезирован регулятор слежения за ТММ ФЭУ на основе нечеткой логики и оптимизации их параметров с помощью генетических алгоритмов, обеспечивающих высокую точность слежения и низкие колебательные процессы при изменении параметров окружающей среды, а также при изменении параметров объекта в процессе эксплуатации.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ и оценка современных систем управления ФЭУ и доказана необходимость применения искусственного интеллекта при проектировании и повышении эффективности этих систем [15-А], [16-А], [17-А].

2. Разработана комплексная математическая модель ФЭУ, позволяющая проводить исследование и оптимизацию выходных характеристик ФЭУ в различных климатических условиях [3-А], [4-А], [5-А], [8-А], [11-А], [12-А], [13-А], [14-А].

3. Разработана имитационная модель ФЭУ с помощью программы Matlab/Simulink. Полученная имитационная модель позволяет провести исследования эффективности процессов преобразования солнечной энергии в электрическую с учетом вариации параметров вольтамперных характеристик (ВАХ), а также обеспечивает возможность моделирования прихода уровня СИ в условиях РТ [3-А], [4-А], [5-А], [6-А], [7-А], [8-А], [11-А], [14-А].

4. Разработана база правил синтеза РНЛ слежения за ТММ, обеспечивающая повышение эффективности ФЭУ [1-А], [9-А], [16-А], [17-А].

5. С помощью генетического алгоритма разработана методика оптимизации РНЛ, существенно снижающая колебания и длительность переходного процесса по сравнению с классической настройкой [1-А], [9-А].

6. Разработана программа оптимизации РНЛ за ТММ ФЭУ генетическим алгоритмом на базе программного комплекса MATLAB/Simulink [1-А], [9-А].

7. Корректность разработанных методик синтеза и настройки коэффициентов РНЛ подтверждена хорошей сходимостью расчётных данных и результатов эксперимента. Как показали результаты эксперимента, отслеживание ТММ регулятором нечеткой логики, оптимизированным с помощью генетического алгоритма, производится с эффективностью 96%. Следовательно, полученные результаты свидетельствуют об эффективности разработанного метода регулирования [1-А], [9-А], [16-А], [17-А].

8. Разработана физическая модель ФЭУ с интеллектуальной системой управления, на базе которой проведены экспериментальные исследования характеристик ФЭУ с учётом реальных условий эксплуатации [1-А], [9-А].

9. Произведены расчеты экономической эффективности внедрения интеллектуальной системы управления в ФЭУ. Оценка экономической эффективности внедрения РНЛО на солнечной электростанции Мургабского района показывает, что срок окупаемости составляет около 0.6 лет со среднегодовой прибылью 11756 сом.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Президенте РТ и ВАК РФ

[1-А]. **Шарифов Б.Н.** Построение системы управления фотоэлектрической установки на основе методов нечеткой логики / Б.Н. Шарифов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023. №4 (64) – С. 18-23. ISSN: 2520-2227.

[2-А]. **Шарифов Б.Н.** Управление электромагнитными переходными процессами в системе регулирования выходными параметрами солнечной электростанции в условиях Республики Таджикистан / Б.Н. Шарифов, Р.Х. Диёров, О.М. Сайфуллоева, У.У. Косимов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2022. №3 (59) – С. 11-20. ISSN: 2520-2227.

[3-А]. **Шарифов Б.Н.** Моделирование прихода солнечной инсоляции для климатических условий Республики Таджикистан / Б.Н. Шарифов, Ш.М. Султонов М.И. Сафаров., Р.Х. Диёрзода, Дж.Х. Каримзода // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2022. №2 (58) – С. 38-47. ISSN: 2520-2227

[4-А]. **Шарифов Б.Н.** Электромагнитные переходные процессы в системе управления выходными параметрами солнечной электростанции / Б.Н. Шарифов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2019. №4 (48) – С. 25-31. ISSN: 2520-2227.

[5-A]. **Шарифов Б.Н.** Моделирование солнечной панели в программе Matlab/Simulink / Б.Н. Шарифов, Т.Р. Терегулов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2015 №4, с 77-83.

[6-A]. **Шарифов Б.Н.** Анализ эффективности применения солнечных фотоэлектрических модулей в климатических условиях Российской Федерации / Ф.Р. Исмагилов, Б.М. Гайсин, Б.Н. Шарифов, Л.Р. Загитова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2018. Т. 22, № 2 (80). С. 73–81.

[7-A]. **Шарифов Б.Н.** Исследование эффективности работы солнечных фотоэлектрических установок в климатических условиях Республики Башкортостан / Ф.Р. Исмагилов, Б.Н. Шарифов, Б.М. Гайсин, Т.Р. Терегулов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2016 №2, с 111-116.

[8-A]. **Шарифов Б.Н.** Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью / Ф.Р. Исмагилов, Б.Н. Шарифов, Б.М. Гайсин, Т.Р. Терегулов, Н. Л. Бабкина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2016 – №4(74), – С 71–79.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

[9-A]. **Шарифов Б.Н.** Программный компонент для оптимизации регулятора нечеткой логики фотоэлектрической установки / Б.Н. Шарифов, Ф.К. Донаев, О.М. Сайфуллоева, Ш.С. Махмадов, Ф.К. Шарипов, Ш.М. Султонзода, Р.Х. Диёрзода / Внесен в Государственный реестр информационных ресурсов Республики Таджикистан 30.12.2023.

Публикации, индексируемые в БД Scopus и Web of Science

[10-A]. **Sharifov B.N.** Electromagnetic transients in the control system of output parameters of a solar power plant in Tajikistan Central Asia region / B.N. Sharifov , M. Kh. Safaraliev , V.Z. Manusov , S.E. Kokin , S.A. Dmitriev , A.S. Tavlintsev , J.S. Ahyoev , K.H. Gulyamov. // International Journal of Hydrogen Energy Volume 47, Issue 9, 29 January 2022, Pages 5757-5765. ISJAEE, pp. 356–358.

[11-A]. **Sharifov B.N.** The mathematical model of pulse width modulation frequency converter / B.N. Sharifov, R. Yunusov, K. Kh. Gulyamov, S. Dovudov, M. Safaraliev // IEEE Conference Publication / IEEE Explore Published in: 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC).

[12-A]. **Sharifov B.N.** Increase in Power of DC/DC Converters with Increased Number of Conversion Channels / K. Gulyamov, R. Yunusov, S. Dovudov, B.N. Sharifov, A. Ghulomzoda, M. Safaraliev // IEEE Conference Publication / IEEE Explore Published in: 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC) pp 59-62.

[13-A]. **Sharifov B.N.** Research of a bi-directional DC-DC converter integrated in electric car power installation / K. H. Gulyamov, B. N. Sharifov, A. H. Ghulomzoda, M. Kh. Safaraliev, R. M. Yunusov // 15th International Conference on Industrial

[14-A]. **Sharifov B.N.** Simplified solar panel modeling in MATLAB/Simulink considering Bashkortostan Republic (Russia) environment characteristics / B.N. Sharifov, T.R. Teregulov, R.A. Valeev. // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2016, pp 17-21 (IEEE Conference Publications).

Статьи в материалах конференций

[15-A]. **Шарифов Б.Н.** Исследование энергетических характеристик фотоэлектрических установок / Б.Н Шарифов, А.А. Давлатов, О.М. Сайфуллоева // Международная научно –практическая конференция «Энергетика: Состояние и Перспективы Развития». – Душанбе ЦИ и П ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023 г. С 211 – 217. ISBN 978-99985-852-1-8.

[16-A]. **Шарифов Б.Н.** Интеллектуальная система управления фотоэлектрической установкой / Б.Н. Шарифов, А.А. Давлатов, Э.А. Чалолзода // Международная научно –практическая конференция «Энергетика: Состояние и Перспективы Развития». – Душанбе ЦИ и П ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023 г. С 547 – 550. ISBN 978-99985-852-1-8.

[17-A]. **Шарифов Б.Н.** Анализ современных систем управления отслеживанием максимальной мощности фотоэлектрических установок / Б.Н. Шарифов, Н.Д. Шарипов, А.А. Давлатов // Международная научно –практическая конференция «Энергетика: Состояние и Перспективы Развития». – Душанбе ЦИ и П ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023 г. С 543 – 547. ISBN 978-99985-852-1-8.


[18-A]. **Шарифов Б.Н.** Автономный инвертор напряжения в системе электроснабжения солнечной электростанции / Б.Н. Шарифов, К.Х. Гулямов, А.Х. Бабаева, М.И. Сафаров // Материалы международной научно-практической конференции “Перспектива развития науки и образования”, Часть 1. – Душанбе, 2019, -С. 44-47.

[19-A]. **Шарифов Б.Н.** Переходные процессы в сетях с солнечными электростанциями / Б.Н. Шарифов, Л.Д. Мустафин // Сборник докладов участников VIII Слета молодых энергетиков Башкортостана. Уфа. Инфореклама 2018 С 126 –130.

ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
ДОНИШГОҶИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН
БА НОМИ АКАДЕМИК М.С. ОСИМӢ

УДК 621.311.243: 004.89

Бо ҳуқуқи дастнавис



ШАРИФОВ БОХИРҶОН НАСРУЛЛОЕВИЧ

КОРКАРДИ СИСТЕМАИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИИ
ИДОРАКУНИИ ДАСТГОҶИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т И

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии
номзади илмҳои техникӣ аз рӯи ихтисоси
05.14.01 – Системаҳо ва мучтамаъҳои энергетикӣ

Душанбе – 2024

Диссертатсия дар кафедраи “Ҳаракатдиҳандаҳои автоматикунонидашудаи электрикӣ ва мошинҳои электрикӣ” – и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ иҷро шудааст.

Роҳбари илмӣ:

Диёрзода Рустам Ҳакимали,
Номзади илмҳои техникӣ, дотсенти
кафедраи “ҲАЭ ва МЭ” – и Донишгоҳи
техникии Тоҷикистон ба номи академик
М.С.осимӣ.

Муқарризони расмӣ:

Русина Анастасия Георгиевна,
доктори илмҳои техникӣ, дотсент, декани
факултети Энергетикӣ Донишгоҳи
давлатӣ техникийи Новосибирск.

Чураев Шохин Чураевич, номзади
илмҳои техникӣ, муаллими калони
кафедраи «Электроэнергетика»-и
филиали Донишгоҳи миллии тадқиқоти
«Донишкадаи энергетикӣ Москва» дар
ш. Душанбе.

Муассисаи пешбар:

Донишкадаи энергетикӣ Тоҷикистон
н. Кушониён.

Ҳимояи диссертатсия санаи «б» майи соли 2024, соати 12:00 дар ҷаласаи Шӯрои диссертатсионии 6D.KOA-049 дар назди Донишгоҳи техникийи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, дар суроғай: 734042, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10 баргузор мегардад.

Бо диссертатсия метавонед дар китобхонаи илмӣ ва сомонаи расмӣ Донишгоҳи техникийи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ: <https://www.ttu.tj> шиносои пайдо кунед.

Автореферат санаи «_____» _____ соли 2024 ирсол шудааст.

Котиби илмӣ
Шӯрои диссертатсионӣ,
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент



Султонзода Ш. М.

ТАВСИФИ УМУМИИ КОР

Мубрамияти мавзӯи таҳқиқот. Ҳамагӣ дар 1 соат замин аз офтоб энергияро мегирад, ки ин миқдор энергияро ҷомеаи ҷаҳонӣ дар як сол истеъмол мекунад. Мушкilotи асосие, ки аз татбиқи босуръати дастгоҳҳои барқи офтобӣ ба бахши энергетикӣ заминӣ пешгирӣ мекунад, ин омили нисбатан пасти самаранокии табдилдиҳандаҳои фотоэлектрикӣ мебошад. Дар айни замон, коэффитсиенти кори фойданоки (ККФ) миёнаи модулҳои фотоэлектрикӣ (МФЭ) дар асоси силитсий сохта шуда, тақрибан 20% -ро ташкил медиҳад, ки аз потенциали энергияи офтобии ба ҳар як метри мураббаъи модул афтарда хеле паст аст. Дар натиҷа, ККФ натиҷавии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ (ДФЭ) тақрибан ба 15% баробар аст. Барои баланд бардоштани самаранокии ДФЭ самтҳои зерини кор имконпазир аст:

1. Такмили мавод ва сохтори фотоэлементҳо (ФЭ). Коркарди материалҳои нави дорои самарани баландтарини ба энергияи электрикӣ табдил додани энергияи офтобӣ ва оптимизатсия сохтори элементҳо имкон медиҳад, ки ККФ ДФЭ зиёд карда шавад.

2. Истифодаи технологияҳои бисёркристаллии силитсийдор. Силитсийи бисёркристаллӣ нисбат ба силитсийи муқаррарӣ самаранокии баландтар дорад, бинобар ин истифодаи чунин маводҳо метавонад ККФ умумии ДФЭ-ро беҳтар созад.

3. Воридкунии ҷузъҳо ва системаҳои иловагӣ. Дохил кардани ҷузъҳои иловагӣ ба монанди трекерҳои офтобӣ, концентраторҳо ва системаҳои хунуккунӣ метавонад кори ДФЭ-ро беҳтар кунад ва самаранокии онҳоро афзоиш диҳад.

4. Такмили меъмурии дастгоҳ. Оптимизатсияи ҷойгиркунии МФЭ, кунҷи майл ва самти модулҳо, инчунин назорати маҳаллии электроника аз ҷониби контроллерҳои барномарезишаванда метавонад самаранокии тавлиди энергияро афзоиш диҳад.

Умуман, баланд бардоштани самаранокии тавлиди энергия дар ДФЭ вазифаи муҳимест, ки таҳқиқот ва навоварино дар соҳаи мавод, конструкцияҳо ва ҳалли системаҳои идоракунӣ талаб мекунад. Ин имкон медиҳад, ки ҳаҷми энергияи тавлидшуда афзоиш ёбад ва ба рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия мусоидат намояд.

Энергияи электрикӣ, ки аз ҷониби ДФЭ истехсол мешавад, аз омилҳои гуногун ба монанди ҳарорат ва нурафкании офтобӣ (НО) вобаста аст. Ҳангоми тағйирёбии ин омилҳо иқтидори ДФЭ низ тағйир меёбад. Аз ин рӯ, хеле муҳим аст нуктае, ки дар он ДФЭ иқтидори максималӣ дорад, пайгирӣ карда шавад. Ин гуна нукта, нуктаи иқтидори максималӣ (НИМ) номида мешавад. Раванди пайгирии НИМ дар ДФЭ назоратчии пайгирӣ ё алгоритми пайгирӣ ба амал меорад. Ин алгоритм дар адабиёти хориҷӣ бо номи Maximum Power Point Tracking (MPPT) ёдовар мешавад.

Яке аз усулҳои баланд бардоштани самаранокии ДФЭ истифодаи алгоритмҳои пайгирии НИМ мебошад. Миқдори энергияе, ки аз ФЭ гирифта мешавад, инчунин аз шиддати фотоэлектрикӣ низ вобаста аст. Барои ба даст

овардани иқтидори максмалӣ аз энергияи офтобӣ, назорат кардани НИМ дар хама шароити муҳити зист хеле муҳим аст. Пайгирии НИМ-и ДФЭ бо истифода аз табдилдиҳандаҳои ҷараёни доимӣ ва назоратчиҳои интеллектуалӣ, ки дар асоси алгоритмҳои пайгирии ТММ кор мекунанд, ба амал оварда мешавад.

Дар ин бобат ҷузъи муҳими рушди самараноки ДФЭ муосир таҳияи системаи мувофиқи назоратӣ мебошад.

Дарачаи коркарди мавзӯ. Тамоюли ҳозираи рушди ДФЭ гузаштан ба системаҳои идоракунии мебошад, ки қодир ба пайгирии НИМ-ро доранд. Корҳои дар ин самт анҷомдодашуда аз ҷониби муҳаққиқони ватанӣ ва хориҷӣ эътирофи васеъ пайдо кардаанд, аз қабилӣ; Аҳмедов Х.М., Каримов Х.С., Кабутов К., Андреев В.М., Белова И.А., Гимазов Р.У., Аржанов К.В., Шиняков Ю.А., Янг Н., Пиегари Л., Риззо Д., Петроне Г., Спагнуоло Г., Вителли М. ва дигарон.

Айни замон равишҳо ва усулҳои гуногуни пайгирии НИМ мавҷуд аст. Дар байни онҳо якҷанд усулҳои муосирро метавон муайян кард: усули “ғалаён ва мушоҳида” (P&O), усули “нокилияти афзоянда” (InC), усули “мушоҳидаи ҷараён”, усули “шиддати доимӣ” ва ғайра. Пас аз таҳлили дараҷаи тадқиқот дар масъалаи ҷустуҷуи алгоритмҳои пайгирии НИМ, мо метавонем хулоса барорем, ки алгоритмҳои дар боло зикршуда на ҳамеша варианти беҳтарини ҳалли масъалаи пайгирии НИМ ДФЭ мебошанд. Ин алгоритмҳо, сарфи назар аз аҳамият ва самаранокии худ дар муайян кардани НИМ, бо камбудии муайян дучор меоянд. Аввалан, онҳо одатан суръати наздикшавии паст ба ин нуқта доранд, ки ин раванди пайгириро ба таври назаррас суст менамояд. Илова бар ин, дар дақиқии ин алгоритмҳо маҳдудиятҳо мавҷуданд, ки қобилияти онҳоро барои ноил шудан ба ҳадафҳо гузогташуда маҳдуд мекунанд.

Дар айни замон, барои аксари тадқиқотчиён омӯзиши имкониятҳои системаҳои идоракунии интеллектуалӣ дар соҳаҳои гуногун ва татбиқи ғайроҳои онҳо афзалият дорад. Масъалаҳои истифодаи системаҳои идоракунии интеллектуалӣ дар корҳои муаллифон ба монанди Мартинович М.В., Степанова Д.А., Лунева Е.А. ва Гладишев баррасӣ шудаанд.

Азбаски истифодаи алгоритмҳои анъанавӣ дар системаҳои пайгирии НИМ ДФЭ аксар вақт наметавонанд талаботро ба ин гуна дастгоҳҳо пурра қонеъ гардонанд. Ин барои татбиқи усулҳои идоракунии интеллектуалӣ, аз ҷумла алгоритмҳои мантиқи норавшан, ки аллақай самаранокии худро дар ҳалли ҳама гуна масъалаҳо дар соҳаҳои дигари технология собит кардаанд, пешомадҳои нав мекушояд.

Ҳамин тариқ, омӯзиши ДФЭ сермаҳсул ва коркарди усулу системаҳои нав барои баланд бардоштани самаранокии ин дастгоҳҳо масъалаи мубрам буда, аҳамияти илмию амалии масъалаҳое, ки ба коркарди системаи идоракунии алокаманданд, бешубҳа мебошад.

Мақсади кори диссертатсионӣ – баланд бардоштани самаранокии раванди табдилдиҳии энергияи офтобии ДФЭ тавассути таҳия ва тадқиқоти системаҳои идоракунии интеллектуалӣ дар асоси усулҳои мантиқи номуайян.

Объекти таҳқиқот – ДФЭ автономӣ дар асоси табдилдиҳандаҳои импульсии ҷараёни доимӣ.

Мавзӯи (предмет) таҳқиқот – моделҳои математикии ДФЭ ва усулҳои синтези назоратчиҳои мантиқи норавшан.

Концепсияи кор - таҳияи моделҳои математикӣ ва оптимизатсияи идоракунии ДФЭ.

Ҳадафҳои асосии тадқиқот. Барои ноил шудан ба мақсад дар кор вазифаҳои зерин гузошта шуданд:

1. Таҳлил ва баҳодиҳии системаҳои муосири идоракунии ДФЭ, муайян кардани мушкилот ва камбудии асосии онҳо. Асоснок намудани зарурати истифодаи системаи интеллектуалии идоракунии ДФЭ.

2. Таҳияи модели математикии ДФЭ. Муайянкунии вобастагҳои баромади ДФЭ аз таъсири омилҳои гуногуни муҳити зист. Гузаронидани тадқиқот оиди самаранокии равандҳои ба энергияи электрикӣ табдил додани энергияи офтоби бо назардошти тағйироти бузургҳои тавсифи шиддату чараён (ТШЧ).

3. Таҳияи танзими мантиқи норавшан (ТМН) барои пайгирии НИМ бо мақсади беҳтар кардани самаранокии ДФЭ.

4. Оптимизатсияи ТМН тавассути алгоритми генетикӣ (АГ).

5. Таҳияи модели физикии ДФЭ бо системаи идоракунии интеллектуалӣ ва тадқиқоти он.

6. Баҳодиҳии самаранокии техникӣ ва иқтисодӣ, ки дар натиҷаи истифодаи системаи интеллектуалии идоракунии ба даст омадааст.

Усулҳои таҳқиқот: Тадқиқоти гузаронидашуда дар асоси принципҳои илмӣ, аз ҷумла таҳлили энергияи офтобӣ, омӯختани хосиятҳои физикии техникии ФЭ, назарияи идоракунии автоматӣ, истифодаи моделсозии рақамӣ ва гузарондани таҷрибаҳои мукамал асоснок карда шудааст. Ҳангоми омӯзиши речаҳои динамикӣ ва статикӣ ДФЭ муҳити интегралӣ MatLab/Simulink истифода шудааст.

Навовариҳои илмӣ кор:

1. Зарурати воқеии истифодаи системаҳои идоракунии интеллектуалии ДФЭ асоснок карда шудааст.

2. Модели комплекси математикии ДФЭ таҳия карда шудааст. Модели мазкур имкон медиҳад, тавсифҳои баромади ДФЭ-ро дар шароити гуногуни иқлим омӯхта, оптимизатсия карда шавад.

3. Қоидаҳои асосии синтези ТМН-и пайгирии НИМ таҳия карда шуд, ки он афзоиши самаранокии ДФЭ-ро таъмин менамояд.

4. Барномаи компютери системаи идоракунии интеллектуалии ДФЭ таҳия шудааст, ки имкони оптимизатсияи ТМН-и пайгирии НИМ-ро дар асоси бастаи MATLAB/Simulink медиҳад.

Мазмуни ба ҳимоя пешниҳод шаванда:

1. Таҳлил ва арзёбии системаҳои муосири идоракунии ДФЭ, асосноккунии имконпазирии истифодаи системаи идоракунии интеллектуалӣ барои баланд бардоштани самаранокии онҳо.

2. Модели математикии ДФЭ бо тафтиши минбаъдаи он, натиҷаҳои тадқиқи самарани равандҳои ба энергияи электрикӣ табдил додани энергияи офтобӣ бо назардошти тағйири бузургҳои ТШЧ

3. Методологияи синтези ТМН дар асоси қоидаҳои пешниҳодшуда бо натиҷаҳои тадқиқи равандҳои гузаранда дар ДФЭ.

4. Усули пешниҳодшуда ва алгоритми оптимизатсияи ТМН-и пайгирии НИМ ДФЭ.

5. Натиҷаҳои тадқиқоти таҷрибавии тавсифҳои ДФЭ дар модели физики.

6. Арзёбии самаранокии техникӣ ва иқтисодии истифодаи системаи интеллектуалии идоракунии ДФЭ.

Эътимоднокии натиҷаҳо ва хулосаҳои бадастомада бо истифодаи усулҳои дақиқи математикӣ, дақиқияти баланди ҳисобҳои ададӣ ва моделсозӣ бо маълумоти таҷрибавӣ, ки дар модели физикии ДФЭ ба даст оварда шудаанд, инчунин тафтиши натиҷаҳо, ки дар усулҳои гуногун ба даст оварда шудаанд, тасдиқ карда мешаванд. Инчунин санчиши натиҷаҳои ба даст овардашуда дар нашрияҳои илмӣ, ки ҳам дар Комиссияҳои олии аттестатсионии ватанӣ ва ҳам дар маҷаллаҳои хориҷӣ, ки ба пойгоҳи Scopus дохил карда шудаанд, аз назар гузаронида шудаанд. Илова бар ин, натиҷаҳои ин тадқиқот дар конференсиҳои илмӣ минтақавӣ ва байналмилалӣ бомуваффақият муаррифӣ гардиданд.

Аҳамияти амалӣ ва татбиқи кор:

1. Моделҳои математикии таҳияшударо дар тарҳрезӣ ва оптимизатсияи истеҳсоли энергияи электрикии ДФЭ истифода бурдан мумкин аст.

2. Тавсияҳои асоснок оид ба интиҳоби сохтор, алгоритми синтези ТМН, инчунин методологияи пешниҳодшуда оиди истифодаи АГ барои оптимизатсияи идоракунии ДФЭ дар лоиҳаҳои системаҳои электротабминкунии ДФЭ самаранок истифода бурдан мумкин аст.

3. Натиҷаи кори рисолаи диссертатсионӣ дар раванди таълимии кафедраи «Ҳаракатдиҳандаҳои автоматикунонидашудаи электрикӣ ва мошинҳои электрикӣ»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ хангоми омӯзиши фанҳои «Моделсозии системаҳои электромеханикӣ» ва «Назарияи идоракунии автоматӣ» ворид карда шуд. (Санади татбиқ аз 21 ноябри соли 2023).

4. Барномаи компютери таҳияшуда «Қузъи барномавӣ барои оптимизатсияи танзимаҳои мантиқи норавшани дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ» аз ҷониби Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон ба қайд гирифта шудааст (Шаҳодатномаи №181 аз 30 декабри соли 2023).

Мутобиқати кори диссертатсионӣ бо шиносномаи ихтисос. Кори диссертатсионӣ ба шиносномаи ихтисоси **05.14.01 – Системаҳо ва мучтамаъҳои энергетикӣ** мутобиқи бандҳои зерин мумовиқат мекунад:

3.1. Коркарди асосҳои (муносибатҳои) илмӣ омузиши хосиятҳо ва принципҳои умумии кор, усулҳои ҳисоб, алгоритму программаҳои интиҳоб ва оптимизатсияи параметрҳо, нишондиҳандаҳои сифат ва речаҳои кори системаҳои энергетикӣ, мучтамаъҳо, таҷҳизотҳои энергетикӣ, ки дар асоси сузишвории органикӣ, алтернативӣ ва умуман навҳои барқароршавандаи энергия кор мекунанд, инчунин таҷҳизоти асосӣ ва ёрирасони онҳо;

3.2. Моделсозии математикӣ, тадқиқоти ададӣ ва ҳақиқии равандҳои физикию-химиявӣ ва корӣ, ки дар системаҳо ва таҷҳизотҳои энергетикӣ дар асоси сузишвории органикӣ, алтернативӣ ва навҳои барқароршавандаи

энергия, дар таҷҳизоти асосӣ ва ёрирасони онҳо ва дар даври умумии технологияи истеҳсоли энергияи электрикӣ ва гармӣ, ба амал меоянд;

3.4. Таҳияи равишҳои илмӣ, усулҳо, алгоритмҳо, технологияҳои лоиҳакашӣ ва конструкторӣ, назорат ва ташхис, баҳодихии эътимоднокии таҷҳизоти асосӣ ва ёрирасони системаҳои энергетикӣ, стансияҳо, муҷтамаъҳои энергетикӣ ва стансияҳои электрикии таркибии онҳо.

3.10. Таҳияи усулҳои истифодаи технологияҳо ва системаҳои иттилоотии телекоммуникатсионӣ, зехни сунӣ дар соҳаи энергетика, аз ҷумла масъалаҳои таҳия ва истифодаи системаҳои иттилоотӣ-ченкунӣ, геомаълумотӣ ва идоракунии мониторинги оперативӣ ва ретроспективӣ, назорат, таҳлил, пешгӯӣ ва идоракунии истеъмоли қувваи барқ ва речаҳо, эътимоднокӣ, дараҷаи талафоти энергия ва сифати қувваи электрикӣ.

3.11. Таҳлили назариявӣ, тадқиқоти таҷрибавӣ, моделсозии физикӣ-математикӣ, тарҳрезии нерӯгоҳҳо, нерӯгоҳҳо ва комплексҳои энергетикӣ, ки дар асоси табдил додани навҳои барқароршавандаи энергия (энергияи чараёни об, энергияи офтоб, энергияи бод, энергияи биомасса, энергияи гармии замин ва дигар намудҳои энергияи барқароршаванда) бо мақсади омӯхтан ва оптимизатсия кардани параметрҳо, речаҳои кори онҳо, сарфаи сӯзишвории истихроҷшаванда ва ҳалли мушкилоти экологӣ ва иҷтимоӣ-иқтисодӣ;

3.12. Омӯзиши таъсири қарорҳои техникӣ, ки ҳангоми бунёд ва истифодаи системаҳои энергетикӣ, комплексҳо ва иншоотҳо ба нишондиҳандаҳои молиявӣ иқтисодӣ ва сармоягузорию онҳо, иқтисодиёти минтақавӣ ва муҳити зист қабул карда мешаванд.

3.13. Омӯзиши таъсири қарорҳои техникӣ, ки ҳангоми бунёд ва истифодабарии системаҳои энергетикӣ, муҷтамаъҳо ва иншоотҳо ба нишондиҳандаҳои молиявӣ иқтисодӣ ва сармоягузорию онҳо, иқтисодиёти минтақавӣ ва иқтисодиёти экологӣ қабул карда мешаванд.

Санҷиш ва тасдиқ намудани кор. Мазмуни асосии кори диссертатсионӣ дар конференсияҳои байналмилалӣ ва семинарҳои илмӣ маъруза ва муҳокима шудааст:

- Конференсияи байналмилалии илмию амалии «ЭНЕРГЕТИКА: ҲОЛАТ ВА ДУРНАМОИ РУШД», Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик. БОНУ. Осимӣ, Душанбе, 20 декабри соли 2023.

- Конференсияи XI умумироссиягии илмӣ-амалӣ. – Пенза:Матбуоти “Илм ва маърифат”. – 2021.

- Чамъомади VIII энергетикҳои чавони Бошқирдистон. Уфа. Рекламаи иттилоотӣ 2018.

- 2021 Конференсияи энергетикӣ интеллектуалии Урал-Сибир (USSEC). Екатеринбург – 2021

- Конференсияи байналмилалии илмию амалӣ «Дурнамои рушди илм ва маориф», Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик. М.С. Осимӣ, Душанбе, 28 ноябри соли 2019.

- 15-умин Конференсияи байналмилалӣ оид ба истеҳсоли саноат ва металлургия. Силсила: Илми мавод ва муҳандисӣ 2020.

• Конференсияи 2-юми байналмилалӣ оид ба муҳандисии саноатӣ, барномаҳо ва истеҳсолот (ICIEAM) 2016. (Интишороти конфронси IEEE).

Саҳми шахсии муаллиф дар кори диссертатсионӣ дар иштироки бевоситаи ӯ дар таҳияи умумии ҳадафҳо ва вазифаҳои тадқиқот, таҳия ва татбиқи моделҳои математикии ДФЭ, гузаронидани тадқиқотҳои таҷрибавӣ оид ба муайян кардани нишондиҳандаҳои асосии ДФЭ, таҳия, таҳлил ва ҷамбасти натиҷаҳои ба даст овардашуда, ба ҷоп тайёр кардани маводҳо, инчунин тартиб додани хулосаҳои асосӣ мебошад.

Нашрияҳо. Аз натиҷаҳои кори диссертатсионӣ 19 кори ҷопӣ, аз ҷумла 8 кор дар нашрияҳои тақризӣ аз ҷониби Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Комиссияи олии аттестатсионии Россия барои наشري натиҷаҳои таҳқиқоти диссертатсионӣ тавсияшуда ба нашр расонида шудааст. Шаҳодатнома аз қайди давлатии захираҳои иттилоотӣ гирифта шуда, инчунин 10 кор дар нашрияҳои гуногун ҷоп шудааст.

Сохтор ва ҳаҷми кор. Кори диссертатсионӣ аз муқаддима, ҷор боб, хулоса, номгӯи ибораҳои кӯтоҳшуда, номгӯи адабиёт иборат аз 107 номгӯӣ ва 4 замима иборат аст. Ҳаҷми умумии кор аз 201 саҳифа иборат буда, 18 ҷадвал ва 109 расмро дар бар мегирад.

МАЗМУНИ АСОСИИ ДИССЕРТАТСИЯ

Боби якум аз тафсири таҳлилии адабиёти илмӣ ва техникӣ, ки ба масъалаҳои пайгирии НИМ алоқаманданд, иборат аст. Дар ин боб алгоритмҳои классикии пайгирии НИМ ДФЭ аз қабилӣ “ғалаён ва мушоҳида” (P&O), “афзоиши ноқилият” (InC) ва “шиддати доимӣ” баррасӣ мешаванд. Баъдан, омӯзиши алгоритмҳои пайгирии интеллектуалӣ, ба монанди шабакаҳои нейронии сунъӣ ва мантиқи норавшан гузаронида шуд. Ҷойгоҳи алгоритмҳои мантиқи норавшан дар системаи идоракунии табдилдаҳандаҳои ҷараёни доимӣ муайян карда шудааст. Дар ин боб инчунин дар асоси се меъёри асосӣ муқоисаи муҳтасари алгоритмҳо оварда шудааст: мураккабии алгоритм, дақиқӣ ва талаботи татбиқ. Аз сабаби осонии татбиқ, дар муддати хеле тӯлонӣ усулҳои классикии ҷустуҷӯи НИМ бештар афзалият доштанд. Аммо сарфи назар аз соддагии онҳо, вақте ки шароити муҳити зист ба таври динамикӣ тағйир меёбад, алгоритмҳои классикӣ барои пайгирӣ кардан бо мушкили дучор мешаванд. Ин мушкилот барои татбиқи усулҳои интеллектуалии идоракунӣ, аз ҷумла алгоритмҳои мантиқи норавшан, ки дар дақиқ ва дуруст кор кардан дар шароити зудтағйирёбандаи муҳити зист бартарӣ доранд, имконият фароҳам оварданд.

Дар боби дуюм модели муқамали математикии ДФЭ таҳия кард шудааст, ки он имкони тадқиқи тавсифҳои баромади дастгоҳи мазкурро дар шароити гуногуни иқлим медиҳад (расми 1.). Модели математикӣ бо истифода аз равишҳои гуногун, аз қабилӣ муодилаҳои дифференциалӣ, барномасозии мантиқӣ ва ғайра сохта шудааст. Омили асосии модели математикӣ тағйирёбандаҳо ва муодилаҳои алоқаманд аст, ки таъсири мутақобилаи ҷузъҳои ДФЭ-ро тавсиф медиҳад. Таҳияи моделҳои математикӣ барои ҳар як ҷузъи ДФЭ бо тағйирёбандаҳои воридотӣ ва баромади бо ҷузъҳои дигари система алоқаманд

имкон медихад, ки модели мукаммали ДФЭ сохта шавад. Таҳияи чунин модел дар таҳлил ва лоихакашии ДФЭ марҳилаи муҳим мебошад. Он ба мо имкон медихад, ки рафтори ҳар як ҷузъи ДФЭ ва муносибатҳои онҳоро дар шароит ва таъсири гуногун тадқиқ намоем. Модели иммиатсионии ДФЭ, ки дар асоси модели математикӣ сохта мешавад, метавонад барои гузаронидани тадқиқотҳои гуногуни таҳлилий истифода шавад.

Бо истифода аз модели математикӣ омадани НО-ро ба сатҳи уфуқӣ дар шароити иқлимии Ҷумҳурии Тоҷикистон (ш.Душанбе) гузаронида шуд. Инчунин таъсири НО ва ҳарорати муҳити атроф ба самаранокии табдил додани энергияи офтобӣ ба энергияи электрикӣ дар ДФЭ баррасӣ карда шуд. Тадқиқотҳои гузаронидашуда имкон доданд, ки вобастагҳои таъсири омилҳои муҳити беруна ба хусусиятҳои ДФЭ таҳия карда шаванд, ки дар муодилаи модели математикӣ МФЭ (1) нишон дода шудаанд. Хусусияти фарқкунандаи модели математикӣ дар он аст, ки модел аз рӯи алгоритми генетикӣ оптимизатсия карда шудааст ва дар арзишҳои пасти НО бо дақиқияти баланд кор мекунад.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_c = I_{ph} - I_o \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c}(U_c + I_c R_c) \right]} - 1 \right\} \\ U_c = \frac{AkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_c + I_o}{I_o} \right) - I_c R_c \\ C_{SU} = 1 + \beta_T \alpha_S (S_x - S_C) + k_{SU} \\ C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_C} (S_x - S_C) + k_{SI} \\ C_{TU} = 1 + \beta_T (T_C - T_x) \\ C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_C} (T_x - T_C) \\ \alpha_S = \frac{T_x - T_C}{S_x - S_C} \\ U_{Cx} = C_{SU} C_{TU} U_c \\ I_{phx} = C_{TI} C_{SI} I_c \\ P_{Cx} = U_{Cx} I_{phx} \end{array} \right. \quad (1)$$

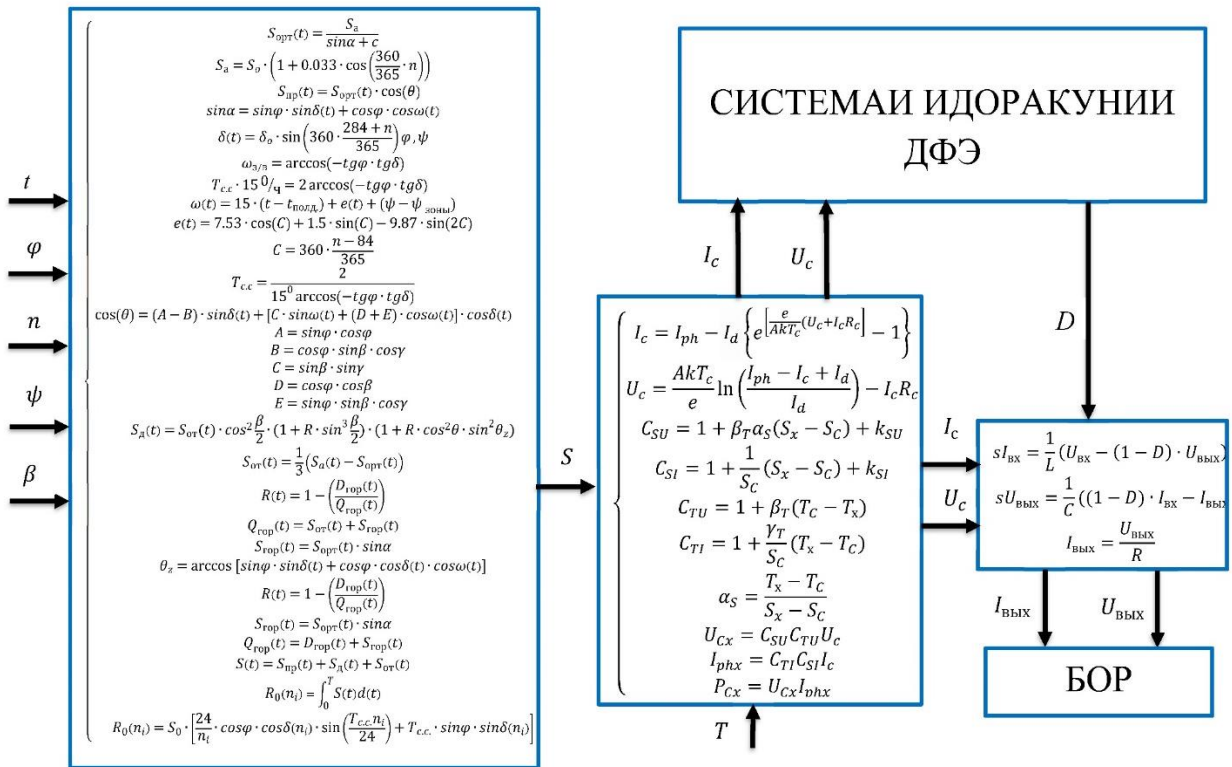
Ҳисоб ва интиҳоби коэффисиентҳои k_{SU} , k_{SI} бо усули алгоритми генетикӣ (АГ) анҷом дода шуданд. Функцияи воқеӣ ҳаттои миёнаи квадрати байни маълумоти таҷрибавӣ ва назариявӣ аз рӯи ифодаи зерин мебошад;

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n-1} (P_i - P_{xi})^2} \rightarrow \min \quad (2)$$

где P_i – иқтидори баромади таҷрибавии МФЭ;

P_{xi} – иқтидори баромади назариявии МФЭ.

Қадами муҳим дар таҳияи моделҳо тасдиқи таҷрибавии натиҷаҳои бадастомада мебошад. Бо ин мақсад ченакҳо дар моделҳои физикӣ гузаронида

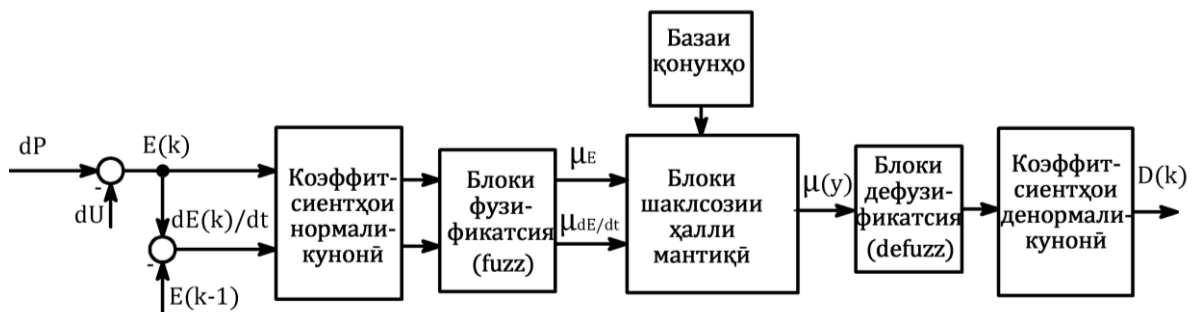


Расми 1 – Модели мукаммали ДФЭ

шуда, маълумоти гирифташуда бо арзишҳои модел муқоиса карда шуданд. Ин имконият дод, ки ба дурустии моделҳо баҳо дода, барои тақмил додани он ислоҳоти зарурӣ дароварда шавад.

Натиҷаҳои бадастомада аҳамияти амалӣ доранд ва онҳоро барои оптимизатсия, тарҳрезӣ ва тадқиқи ДФЭ истифода бурдан мумкин аст.

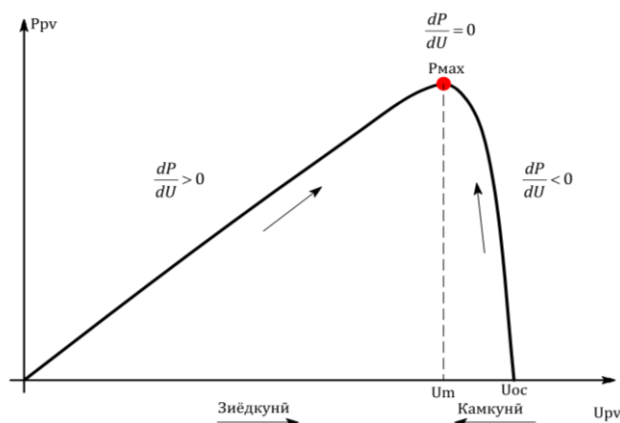
Дар боби сеюм усулҳои асосии назарияи мантиқи норавшан, ки барои синтези системаи идоракунии ДФЭ заруранд, оварда шудаанд. Инчунин таснифи ТМН дода шуда, усулҳои асосии сохтани онҳо тавсиф карда шудаанд. Дар боби мазкур схемаи функционалии блоки мантиқи норавшан (БМН) баррасӣ карда мешавад (расми 2), ки дар асоси он ТМН барои пайгирии НИМ ДФЭ сохта шудааст.



Расми 2 – Схемаи функционалии БМН

Таъмини НИМ дар тавсифи шиддати иқтисодӣ (ТШИ) (расми 3) ДФЭ бо роҳи ворид кардани ду тағйирёбандаи воридшавада - хатои $E(k)$ ва суръати тағйирёбии хатои $S_E(k)$, ба даст оварда мешавад (3). Шиддати воқеӣ (U) ва ҷараёни (I) ДФЭ пайваستا чен карда, иқтисодӣ онро муайян намудан мумкин аст

($P=U \times I$). Иқтидори баромади ДФЭ аз ҷониби ТМН дар ҳар як вақти ҷенкунӣ (k) тағйир карда, сипас тағйирёбии иқтидор ҳамчун функсияи шиддат dP/dU муайян карда мешавад (dP/dU). Агар арзиши dP/dU аз сифр зиёд бошад ($dP/dU > 0$), ТМН давраи кори модулятсияи паҳнои импульсро (МПИ) тағйир медихад, то шиддатро то ба ҳадди ниҳии иқтидор расидан зиёд намояд ($dP/dU = 0$) (расми 3).



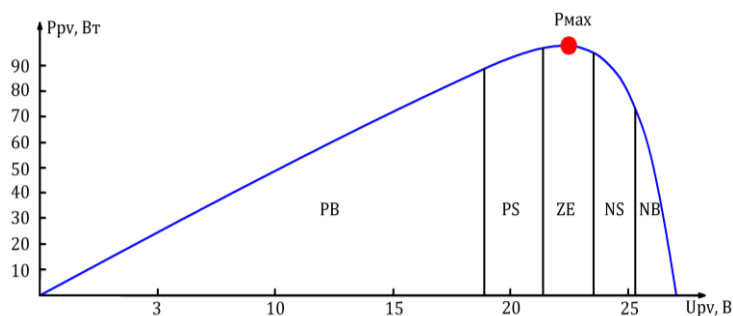
Расми 3 – Усули сохтани агорими мантиқи норавшан

Агар ин арзиш аз сифр камтар бошад ($dP/dU < 0$), он гоҳ ТМН давраи кори МПИ-ро барои кам намудани шиддат то расидан ба ҳадди ниҳии иқтидор тағйир медихад ва ғайра. Ин раванд ҳангоми тағйирёбии омилҳои иқлимӣ (НО ва ҳарорати муҳити атроф) такрор мешавад.

$$\begin{cases} E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \\ C_E(k) = E(k) - E(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

дар ин ҷо $P(k)$ и $U(k)$ — иқтидор ва шиддати ДФЭ.

Дар асоси ҳолате, ки дар расми 3 нишон дода шудааст, барои дуруст интиҳоб кардани маҷмӯаҳои норавшан барои $C_E(k)$ ва $E(k)$ ТШИ бояд ба якҷанд минтақаҳо тақсим карда шавад, то шиддатнокии ғалаён мувофиқи усули зерин сари вақт тағйир дода шавад.



Расми 4 – Тарзи кори ТМН дар ТШИ

- 1) нуқтаи корӣ зуд ҳаракат мекунад, вақте ки он аз НИМ воқеъ дур аст;
- 2) нуқтаи корӣ суст ҳаракат мекунад, вақте ки он ба НИМ воқеъ наздик аст.

Дар асоси хусусиятҳои дар боло зикршуда, қачии ТШИ-ро ба қисмҳои зерин тақсим карда мумкин аст (расми 4).

PB - "Мубати калон";

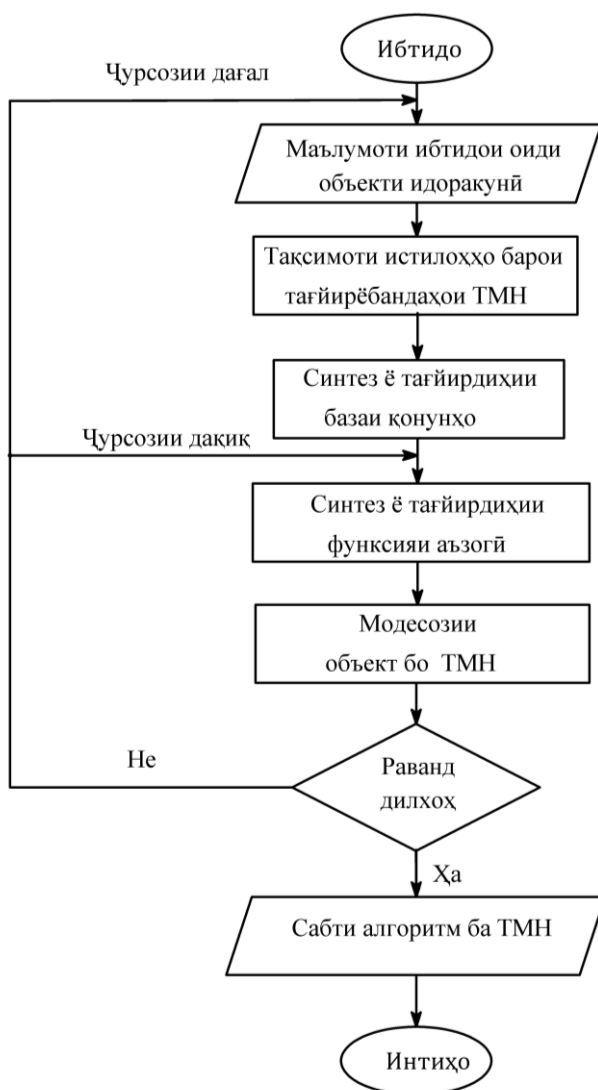
PS - "Мусбат хурд";

ZE - "Сифр";

NS - "Манфии хурд";

NS - "Манфии калон".

Дар минтакаи « PB » нишебӣ нисбатан доимист, зеро нуқтаҳои ин минтака аз НИМ дуранд. Аз ин рӯ, тахмин карда мешавад, ки шиддатнокии ғалаён барои гузариши босуръат аз ин минтака ба минтакаи НИМ афзоиш хоҳад ёфт. Дар минтакаи « PS » маълум аст, ки арзиши нишебӣ тадричан ба сифр наздик мешавад, вале то ба НИМ то ҳол масофаи кӯтоҳ мавҷуд аст. Ҳамин тариқ, шиддатнокии ғалаён бояд кам карда, аммо на пурра бартараф карда мешавад. Агар нуқтаи қорӣ дар минтакаи "ZE" ҳаракат кунад, ки дар он нуқтаҳои дохили ин минтака ба НИМ "ниҳоят наздик" ҳастанд, шиддатнокии ғалаён бояд хеле заиф бошад, то лапишҳои минбаъд дар НИМ то ҳадди имкон камтар мушоҳида шаванд.



Расми 5 – Блок-схемаи алгоритм барои татбиқи танзимаи норавшан

Бо назардошти он, ки табдилдиҳандаи ҷараёни доимӣ дар вуруди худ сигнали идоракунии дақиқи D -ро талаб мекунад, табдил додани ин иттилооти норавшанро ба информатсияи детерминистӣ таъмин кардан лозим аст. Чунин табдилдиҳӣ дефузификатсия номида мешавад. Дефузификатсияро одатан бо истифода аз ду алгоритм анҷом додан мумкин аст: Маркази вазнинӣ (СОА) ва Усули меъёрҳои максималӣ (МСМ).

Усули аз ҳама бештар истифодашавандаи дефузификатсия ин муайян кардани маркази вазнинии (СОА) маҷмӯи ниҳоии омехтаи норавшан мебошад. Маҷмӯи ниҳоии омехтаи норавшан тавассути омезиши ҳамаи маҷмӯи қоидаҳои норавшани баромад муайян карда мешавад.

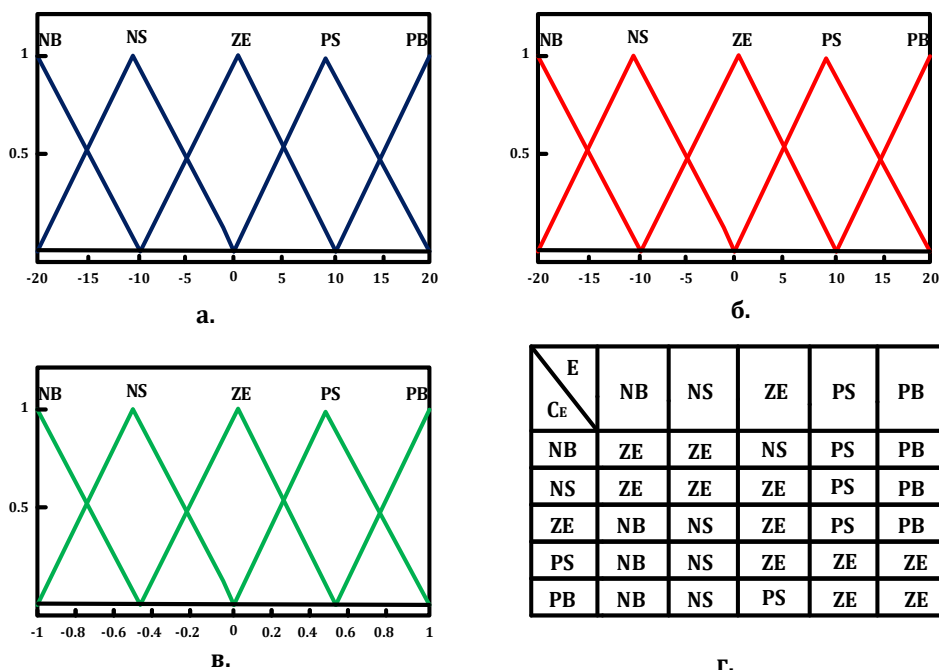
$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j) \cdot \Delta D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j)} \quad (2)$$

Пас аз он ки сигнали баромади ТМН, ки дар худ тағйирёбии коэффитсиенти пуркунӣ (D)-ро таъмин менамояд, бо истифода аз (2) дефузификатсия шуда, тавассути $S_{\Delta D}$ микёс карда мешавад. Коэффитсиенти воқеии $D(k)$ тавассути формула зерин ҳосил мешавад.

$$D(k) = D(k - 1) + S_{\Delta D} \cdot \Delta D(k) \quad (3)$$

Ҳамин тариқ, блок – схемаи алгоритм барои соختани ТМН дар расми 5 нишон дода шудааст.

Дар асоси мулоҳизаҳои боло алгоритми синтези ТМН сохта шуда, фунсияҳои аъзогӣ ҳар як тағйирёбандаи норавшан муайян карда мешаванд (расми 6).

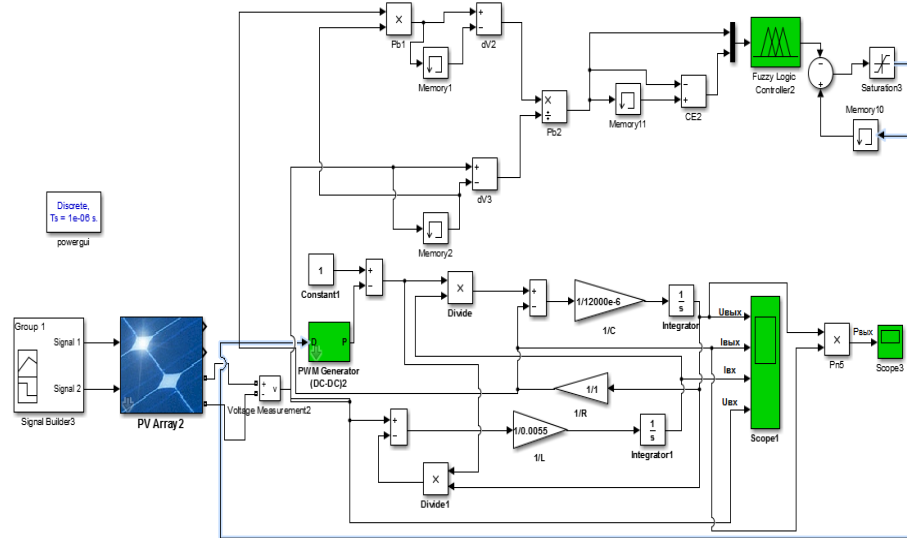


Расми 6 – Фунсияҳои аъзогӣ а). хатоғӣ $E(k)$, б). суръати тағйирёбии хатоғӣ $C_E(k)$, в) баромади мантиқӣ, г) заминаи қоидаҳои норавшан

Моделҳои иммитатсионии ДФЭ бо ТМН дар расми 7 нишон дода шудааст. Моделҳои пешниҳодшуда аз қисмҳои асосии зерин иборат аст;

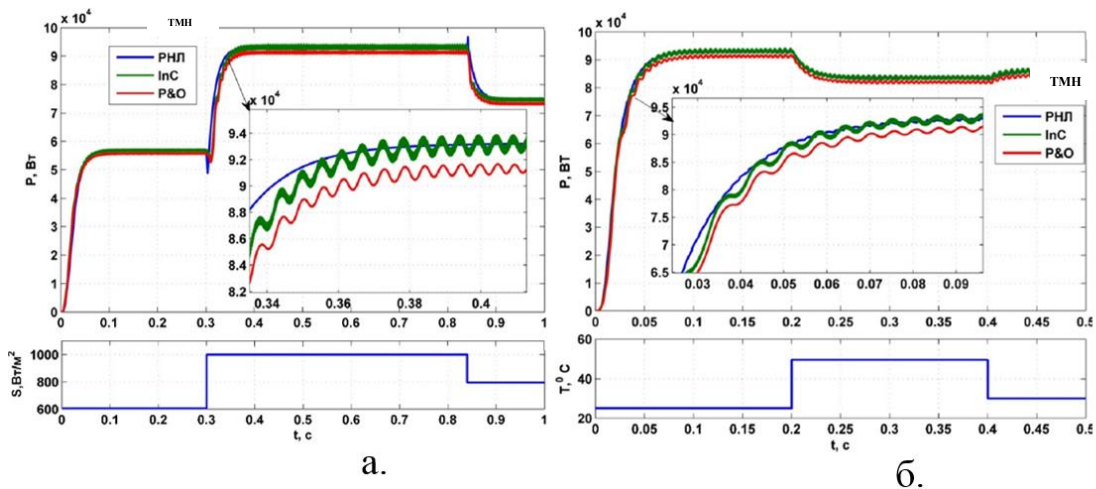
- супоришдиҳаки НО ва ҳарорат (**signal builder 3**);

- МФЭ бо иқтидори 100 кВт (**PV array 2**);
- DC-DC табдилдиҳандаи баландкунанда;
- системаи идоракунии ДФЭ дар асоси ТМН;



Расми 7 – Модели имитатсионии ДФЭ бо ТМН

Равандҳои гузарандаи тағйирёбии бузургиҳои ДФЭ дар шароити гуногуни муҳити атроф дар расми 8 нишон дода шудаанд.



Расми 8 – Равандҳои гузарандаи тағйирёбии бузургиҳои ДФЭ, а). ҳангоми тағйирёбии НО, б). ҳангоми тағйирёби ҳарорат.

Равандҳои гузаранда бо истифода аз алгоритмҳои P&O, InC ва ТМН дар расми 8 оварда шуданд. Таҳлили расм нишон медиҳад, ки пайгирии НИМ ДФЭ ҳангоми тағйирёбии НО ва ҳарорати муҳити атроф тавассути ТМН бо лапиши камтар ва зудкорию балан дар муқоиса бо алгоритмҳои классикӣ (InC ва P&O) рух медиҳад.

Бояд қайд кард, ки самаранокии табдилдиҳии ДФЭ дар асоси ТМН аз танзимгарҳои классикӣ (InC ва P&O) 0,5-0,7% бо самти мусбат фарқ мекунад. Самаранокии баландтари табдили энергия офтобиро дар ДФЭ тавассути

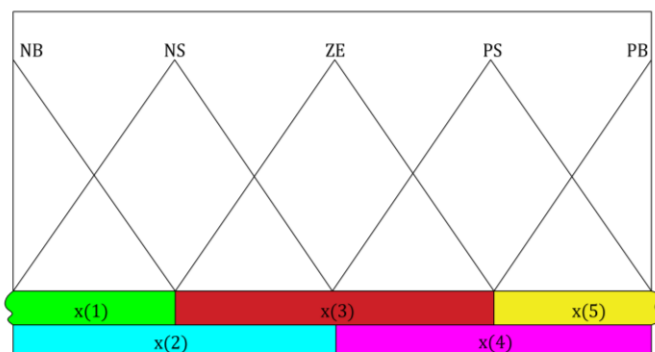
оптимизатсияи ТМН ба даст овардан мумкин аст. Оптимизатсияи ТМН бо истифода аз алгоритмҳои интеллектуалӣ раванди беҳтар намудани арзишҳои танзима барои ноил шудан ба самаранокии баланди ДФЭ мебошад. Мантиқи норавшан ба истифодаи қоидаҳои норавшан, ки рафтори системаро тавсиф мекунанд, асос ёфтааст. Раванди оптимизатсияи танзима ба муайян кардани арзишҳои беҳтарини бузургиҳои ТМН нигаронида шудааст.

Яке аз алгоритмҳои интеллектуалии васеъ истифодашаванда барои оптимизатсияи ТМН ин алгоритми генетикӣ (АГ) мебошад. ГА – усули эволюционист, ки раванди интихоби табиӣ ва мутатсияи генетикиро барои эҷоди ҳалли оптималӣ тақлид мекунад. Истифодаи АГ барои оптимизатсияи ТМН имкон медиҳад, ки бузургиҳоро бо таври автоматӣ танзим кунем. Ин ба мо имкон медиҳад, ки кори системаи идоракуниро беҳтар намоем ва раванди танзимро содда намоем.

Идеяи асосии истифодаи АГ барои оптимизатсияи ТМН дар хусусиятҳои тарроҳии ин танзима ҷойгир аст. Бузургиҳо ва тағйирёбандаҳои мухталифе, ки барои фаъолияти ҳуҷраи ТМН лозиманд, қоидаҳои умумиро ифода намеkunанд. Аз ин лиҳоз нақши операторро дар таҳлил ва муайян кардани ин шартҳо муҳим мегардонад. Сарфи назар аз дониши мутахассис, ТМН, ки тавассути “озмоиш ва ҳатоғӣ” ба даст омадааст, метавонад ба таври беҳтарин кор накунад. АГ, дар ин ҳолат, метавонад ҳамчун системаи ҷустуҷӯи оқилона барои ба даст овардани меъмории гуногуни имконпазирӣ ТМН кор кунад. Дар ин ҳолат, зарур аст, ки мавқеи ҳар як функсияи мансубият ба тағйирёбандаҳои оптимизатсияи алгоритм табдил дода шавад.

Барномаи таҳияшуда имкон медиҳад, ки тавлиди энергияи ДФЭ-ро тавассути оптимизатсияи ТМН ба ҳадди аксар афзоиш диҳем. Барои оптимизатсияи ТМН яке аз ду вариантҳои имконпазирро интихоб кардан лозим аст.

1. Оптимизатсияи тағйирёбандаҳои вурудии ТМН. Тағйир додани ҳудуди амалиёти тағйирёбандаҳои воридотӣ дар назар дошта шудааст.
2. Оптимизатсияи сохтори ТМН. Тағйир додани сохтори ТМН, яъне навъи функсияи аъзогӣ (ФА), шумораи ФА ва ғ.



Расми 9 – Сохтори оптимизатсияи бузургиҳои ТМН

Варианти дуюм бештар меҳнатталаб аст ва иқтисодии баланди ҳисоббарориро талаб мекунад, бинобар ин варианти якум интихоб карда

мешавад. Барои оптимизатсия тавассути АГ ТМН ба 5 минтақа тақсим карда мешавад (расми 9): $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$.

$x(1)$ - майдони тағйирёбии функсияи аъзогӣ "НБ"

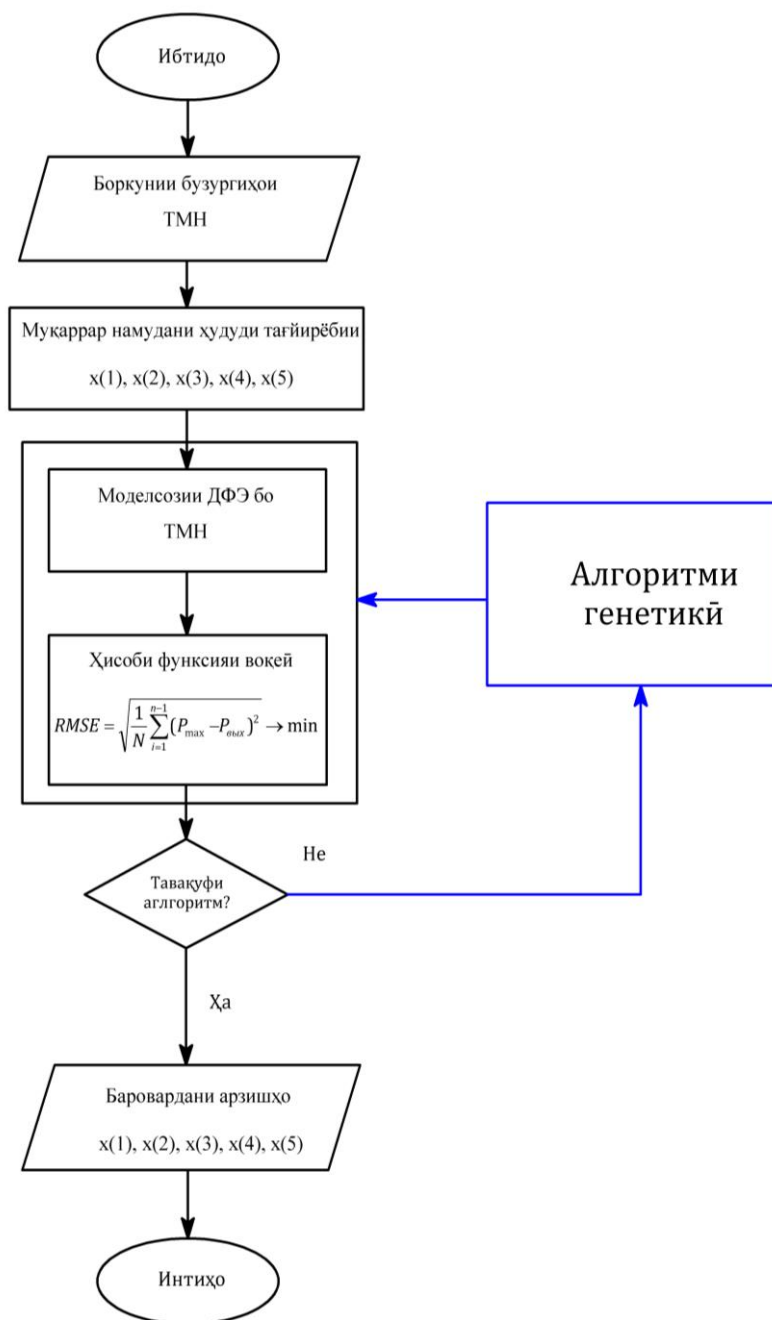
$x(2)$ - майдони тағйирёбии функсияи аъзогӣ "NS"

$x(3)$ - майдони тағйирёбии функсияи аъзогӣ "ZE"

$x(4)$ - майдони тағйирёбии функсияи аъзогӣ "PS"

$x(5)$ - майдони тағйирёбии функсияи аъзогӣ "PB"

Барномаи автоматикунонидашуда бо истифода аз АГ арзиши $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ -ро тағйир дода ТМН-ро оптимизатсия мекунад, то тавлиди энергияи электрикиро аз ДФЭ ба ҳадди аксар расонад. Аз маҷмӯи бузургҳои интихобкардаи ФА, мавқеъҳои ин функсияҳо $x(i)$ - масъалаи оптимизатсия мебошад.



Расми 10 – Блок – схемаи оптимизитсияи ТМА бо АГ

Блок-схемаи барномаи оптимизатсияи ТМН дар расми 10 оварда шудааст. Блок-схемаи дар расми 10 нишондодашуда ба таври зерин кор мекунад. Аввалан, бузургиҳои ТМН ва арзишҳои он ворид карда мешаванд (функсияҳои аъзогӣ ва маҳдудияти тағйирёбии тағйирёбандаҳои воридотӣ). Пас аз ин, сарҳадҳои тағйирдиҳии бузургиҳои ТМН $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ муқаррар карда мешавад. Сипас модели ДФЭ бо истифода аз барномаи Matlab/Simulink ба кор андохта мешавад. Пас аз оғози кори модел, АГ функсияи воқеиро ҳисоб мекунад.

Функсияи воқеии АГ ин хатой миёнаи квадрати оптимизатсия барои иқтидори баромади ДФЭ мебошад.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n-1} (P_{max} - P_{ВЫХ})^2} \rightarrow \min \quad (4)$$

Дар ин ҷо, P_{max} -иқтидори максималии ДФЭ дар ТШИ

$P_{ВЫХ}$ -иқтидори баромади ДФЭ

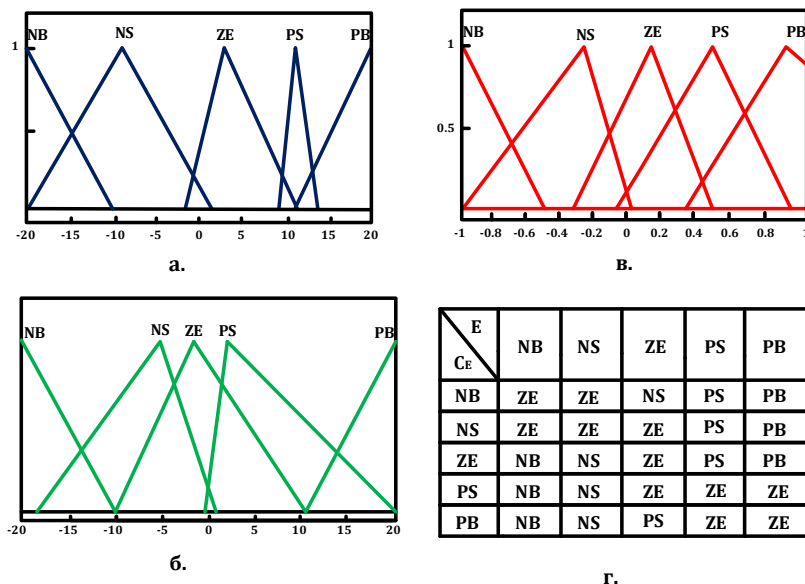
$i = 1 \dots n$ нуктаҳои ҳисоби алгоритм

N -шумораи ҷуфтҳои омӯзиши P_{max} и $P_{ВЫХ}$

Барои синтези бузургиҳои ТМН бо истифода аз усули АГ, барномаи компютерӣ дар асоси Matlab/Simulink таҳия шудааст (Шаҳодатномаи №181 аз 30.12.2023)

Дар ин масъала меъёри қатъ кардани АГ ноил шудан ба минимуми функсияи воқеӣ мебошад.

Пас аз минимизатсия намудани функсияи воқеӣ, АГ бузургиҳои оптимизатсияшудаи ТМН $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ мебарорад.



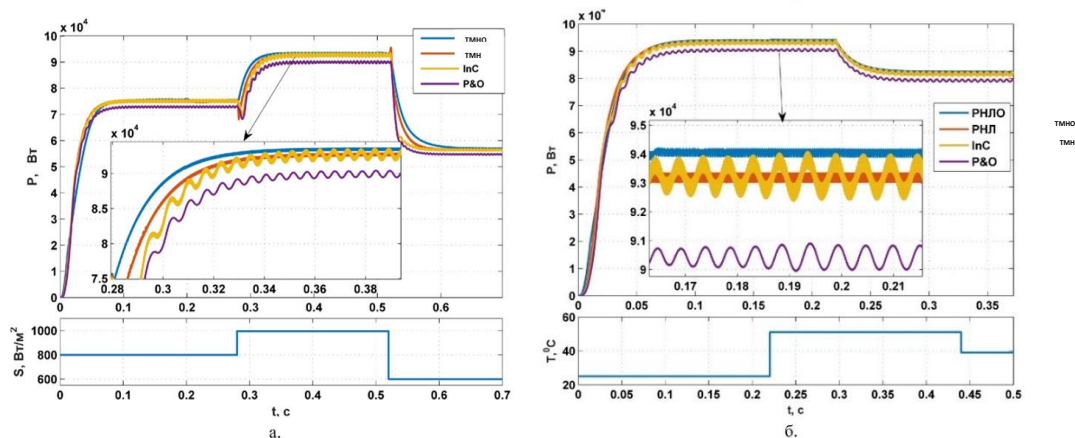
Расми 11 – Функсияҳои аъзогӣ а). хатогӣ $E(k)$, б). суръати тағйирёбии хатогӣ $C_E(k)$, в) баромади мантиқӣ, г) заминаи қоидаҳои норавшан

Тадқиқи ТМН бо бузургиҳои оптимизатсияшуда тавассути модели имитатсионӣ (расми 7) дар барномаи MatLab гузаронида мешавад. Дар расми 11 заминаи қоидаҳо барои ТМН оптимизатсияшуда (ТМНО), функсияҳои аъзогӣ ба

хатогии E , суръати тағйирёбии хатои C_E ва баромади мантиқӣ нишон дода шудаанд.

Таҳлили таъсири ТМНО-ро ба самаранокии ДФЭ ҳангоми тағйирёбии шароити муҳити зист (ҳарорат T ва НО $S(t)$) баррасӣ хоҳем кард.

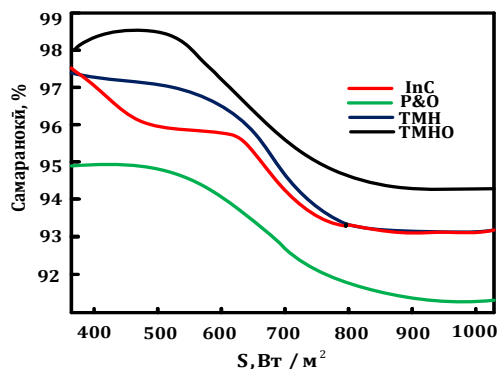
Дар расми 12 а. равандҳои гузарандаи иқтидори баромади ДФЭ ҳангоми тағйирёбии НО оварда шудаанд. Равандҳои гузурандаи ДФЭ дар мавриди истифодаи алгоритмҳои P&O, InC ва ТМНО дар системаи идоракунӣ нишон медиҳад. Таҳлили расм нишон медиҳад, ки дар сатҳи НО 800 Вт/м^2 пайгирии НИМ тавассути ТМНО нисбат ба дигар танзимгарон тезтар аст. Илова бар ин, ТМНО нисбат ба танзимгарони классикӣ тағйирёбии паст ва самаранокии нисбатан баланд дорад. Вақте ки сатҳи НО аз 800 Вт/м^2 то 1000 Вт/м^2 зиёд мешавад, ба таври равшан намоён мешавад, ки танзимгари оптимизатсияшудаи ТМНО дар суръат $0,05 \text{ с}$, дар тағйирёбии иқтидори баромад $\mp 10 \text{ Вт}$ бартарӣ дорад, дар ҳоле ки танзимгарони классикӣ дар ҳудуди $\mp 50 \div 70 \text{ Вт}$ тағйир меёбад (расми 12 а.). Дар натиҷа самаранокии пайгирии НИМ бо ТМНО $1\text{-}1,5\%$ зиёдтар мебошад нисбат ба алгоритмҳои классикӣ.



Расми 12 – Равандҳои гузарандаи тағйирёбии бузургҳои ДФЭ, а). ҳангоми тағйирёбии НО, б). ҳангоми тағйирёбии ҳарорат

Бояд қайд кард, ки ҳарорати муҳити атроф омили муҳимест, ки ба хусусиятҳои баромади ДФЭ таъсир мерасонад. Бинобар ин, дар расми 12 б. диаграммаи вақтии тағйирёбии иқтидори ДФЭ дар ҳароратҳои гуногуни корӣ оварда шудааст. Арзёбии диаграммаи вақтии тағйирёбии иқтидори ДФЭ нишон медиҳад, ки ҳангоми тағйирёбии сатҳи ҳарорати муҳити зист дар ҳудуди 25°C - 50°C , ТМНО самаранокии баланд ва лапиши паст иқтидор дорад. Бояд қайд кард, ки ҳангоми кор кардани алгоритмҳои P&O ва InC дар расми 12 б. мо метавонем лапишҳои баланди иқтидорро ҳангоми тағйирёбии ногаҳонии ҳарорат мушоҳида намоем. Ин далели равшани он аст, ки ҳангоми кори алгоритмҳои классикӣ раванди ҷустуҷӯи НИМ система ҳеҷ гоҳ ба нуқтаи оптималӣ намеорад. Ҳамеша хатогӣ ба ҳадди ақал қадами ҳисобкунии алгоритм баробар хоҳад буд. Лапишҳо дар атрофи НИМ одатан ҳамчун таъсири номатлуби алгоритмҳои пайгирии классикӣ ҳисобида мешаванд, зеро ин гуна гапишҳо баръало самаранокии пайгириро паст мекунанд. Аммо, бидуни чунин лапишҳо, алгоритм тағйиротро дар ТШИ аз сабаби тағйирёбии шароити муҳити зист

муайян карда наметавонад. Дар ин замина, ТМН-и таҳияшуда дар асоси АГ лапиши нуқтаи амалиётиро дар атрофи НИМ бо майли хеле хурд нигоҳ медорад, вақте ки нуқтаи амалиётӣ ба минтақаҳои "ZE" мегузарад.



Расми 13 – Самаранокии кори алгоритмҳои гуногун

Таҳлили расми 13 нишон медиҳад, ки самаранокии максималии ТМНО дар худуди арзишҳои НО 500 Вт/м² ба даст меояд. Бо афзоиши НО, самаранокӣ ДФЭ коҳиш меёбад. Сабаб дар он аст, ки қадами ҷустуҷӯи НИМ дар ТМН бо арзишҳои пасти иқтидори баромад муқаррар карда мешавад ва бо афзоиши иқтидор вақти пайгирии НИМ зиёд мешавад. Зиёдшавии вақти пайгирий боиси камшавии самаранокии ДФЭ мегарда. Агар алгоритмро дар арзишҳои баланди НО танзим намоем, барои баланд бардоштани суръати система қадами пайгирии НИМ-ро зиёд кардан лозим аст, пас дар ин ҳолат, дар доираи иқтидори паст, алгоритм пайгирии НИМ-ро бо қадами калон оғоз мекунад, ки ин боз боиси паст шудани самаранокӣ ДФЭ мегардад. Дар ин ҳолат, ҳалли оптималии масъала танзим кардани алгоритм дар сатҳи пасти НО ва тақсим кардани ТШИ ба якҷанд минтақаҳо мебошад, ки ин гуна пешниҳод боиси бо таври адаптивӣ тағйир ёфтани қадами пайгирий мегардад.

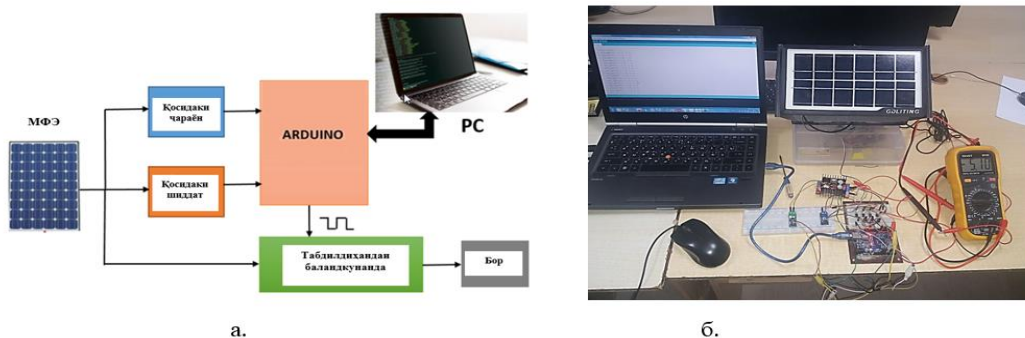
Раванди модесозӣ тасдиқ кард, ки истифодаи ДФЭ бо табдилдиҳандаи чараёни доимӣ, ки дар он ТМН ба системаи идоракунии дохил карда шудааст, яке аз самтҳои ояндадори тадқиқот мебошад. Ин системаи инноватсионӣ як қатор мушкилотро, аз ҷумла эътимоднокӣ, дақиқӣ ва суръатро самаранок ҳал мекунад.

Дар боби чаҳорум татбиқи воқеии системаи пайгирии НИМ ДФЭ дар асоси ТМНО пешниҳод мешавад. Бо ин мақсад модели физикии ДФЭ барои омузиши кори танзимаи таҳияшуда сохта мешавад. Схекаи функционалии модели физикӣ ва худӣ модел дар расми 14 оварда шудааст, ки аз қисмҳои асосии зерин иборат аст

1. Модули фотоэлектрикӣ;
2. Назоратчии барномарезишавандаи мантиқии ARDUINO;
3. Қосидаки шиддат ва чараён;
4. Табдилдиҳандаи баландкунандаи импульсӣ;
5. Ноутбук ё компютери фардӣ;
6. Бор.

Тарзи кори модели физикӣ аз таъмини иқтидори баромади МФЭ ба сарборӣ бо истифода аз табдилдиҳандаи баландкунанда оғоз меёбад. Назоратчии

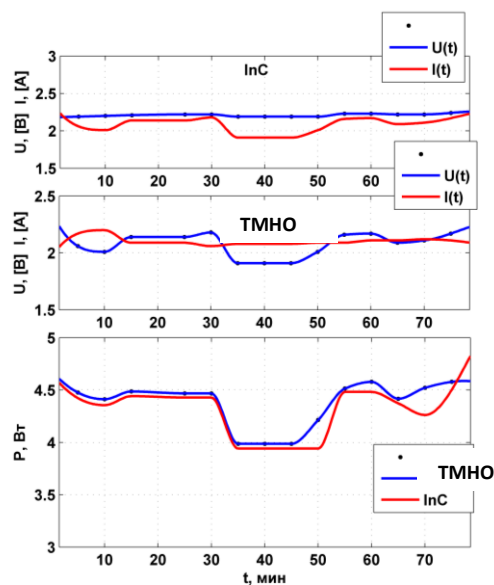
барномарезишавандаи ARDUINO ҳамчун танзимкунанда истифода мешавад, ки дар он ТМН пайгирии НИМ ДФЭ амал мекунад. Фаъолияти моделро компютери фардӣ идора мекунад, ки дар он бастаи Arduino 1.8.16 насб шудааст. Раванди мубодилаи маълумот байни компютер ва назоратчӣ тавассути кабели махсус сурат мегирад. Барои чен кардани ҷараён ва шиддат дар баромади МФЭ қосидакҳои ҷараён ва шиддат истифода мешаванд. Сигналҳо аз қосидакҳо ба назоратчӣ интиқол дода мешаванд ва пас аз коркард назоратчӣ сигналро ба интерфейси баромади барномаи Arduino 1.8.16 барои мониторинг ва баҳисобгирӣ мефиристад.



Расми 14 – а) Схемаи функционалии ДФЭ, б). Намуди умумии модели физикии ДФЭ

Табдилдиҳандаи баландкунанда тавассути канали баромади назоратчӣ идора карда мешавад. Аввалан, кори ДФЭ тавассути алгоритми классикии InC, ки ба назоратчӣ барномарезишаванди сабт шудааст, ба назар гирифта мешавад. Баъдан, алгоритми оптимизатсияшуда дар асоси мантиқи номуайян ба назоратчӣ сабт карда, кори ДФЭ муқоиса карда мешавад.

Натиҷаҳои татбиқи модели физикӣ дар шакли иқтидори баромад, шиддат ва ҷараёни ДФЭ пешниҳод карда мешаванд, ки дар натиҷаи таҳлили кори танзимгари пайгирии НИМ (InC ва ТМНО) ба даст оварда шудаанд. Қиматҳои бадастомадаи ҷараён, шиддат ва иқтидор дар расми 15 оварда шудаанд.



Расми 15 – Диаграммаи вақтии тағйирёбии иқтидор $P(t)$, ҷараён $I(t)$ и напярание $U(t)$ ДФЭ

Натиҷаҳои тадқиқот имконияти зиёд кардани истеҳсоли энергияи ДФЭ-ро бо ҷорӣ намудани ТМНО дар системаи идоракунии нишон медиҳад. Аммо қарори ниҳой дар бораи имконпазирии татбиқи онҳо дар асоси натиҷаҳои баҳодихии иқтисодӣ қабул карда мешавад. Ҳисоби самаранокии иқтисодӣ барои нерӯгоҳи мавҷудаи барқи офтобӣ дар ноҳияи Мурғоб бо иқтидори муқарраршуда 220 кВт гузаронида мешавад. Натиҷаҳои самарани иқтисодии татбиқи ТМНО дар ҷадвали 1 оварда шудаанд.

Ҷадвали 1. Нишондодҳои иқтисодии ТМНО

	Нишондодҳои иқтисодӣ	бидуни ТМНО	бо ТМНО
1	Истеҳсоли электроэнергия, кВт/соат	522500	530337
2	Даромад аз неруи барқ, сом.	783750	795506
3	Ҷоидаи солона, сом	11756	
4	Хароҷот, сом.	6873.1	
5	Муҳлати бароварди харҷ, сол	0.6	

Дар хулоса натиҷаҳои асосии кор дар ҷарғидааст.

Дар замима ба диссертатсия шаходатнома аз қайди давлатии барномаи коркардшуда барои МЭХ ва маводи тасдиқкунандаи дар амал татбиқ кардани кори мазкур оварда шудааст.

НАТИҶАҲОИ АСОСИИ КОРИ ДИССЕРТАТСИОНӢ

Дар диссертатсия ҳалли масъалаи синтези назоратчиҳои пайгирии НИМ ДФЭ дар асоси мантиқи норавшан ва оптимизатсияи бузургиҳои онҳо бо истифода аз алгоритмҳои генетикӣ, ки дақиқии баланди пайгирӣ ва равандҳои пасти лапишро ҳангоми тағйирёбии муҳити зист дарбар мегирад, оварда шудааст.

Натиҷаҳои асосии кор чунинанд:

1. Таҳлил ва арзёбии системаҳои муосири идоракунии ДФЭ гузаронида шуда, зарурати истифодаи зехни сунъӣ дар тарҳрезӣ ва баланд бардоштани самаранокии ин системаҳо нишон дода шудааст [15-А], [16-А], [17-А].

2. Модели комплекси математикии ДФЭ таҳия шудааст. Модели мазкур имкон медиҳад тавсифҳои баромади ДФЭ-ро дар шароити гуногуни иқлим омӯхта, оптимизатсия карда шавад [3-А], [4-А], [5-А], [8-А], [11-А], [12-А], [13-А], [14-А].

3. Модели иммитатсионии ДФЭ бо истифода аз барномаи Matlab/Simulink таҳия карда шуд. Модели иммитатсионии ба даст овардашуда имкон медиҳад, ки самаранокии равандҳои ба энергияи электрикӣ табдил додани энергияи офтобро бо назардошти тағйирёбии бузургиҳои ТШҚ омӯзем. Инчунин модели мазкур имконияти тадқиқи энергияи офтобро дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон медиҳад [3-А], [4-А], [5-А], [6-А], [7-А], [8-А], [11-А], [14-А].

4. Қоидаҳои асосии синтези ТМН пайгирии НИМ таҳия карда шуд, ки афзоиши самаранокии ДФЭ-ро таъмин менамояд [1-А], [9-А], [16-А], [17-А].

5. Бо истифода аз алгоритми генетикӣ усули оптимизатсияи ТМН таҳия

шудааст, ки лапиш ва давомнокии раванди гузаришро нисбат ба алгоритмҳои классикӣ хеле кам мекунад [1-А], [9-А].

6. Барномаи компютери системаи идоракунии интеллектуалии ДФЭ таҳия шудааст, ки имкони оптимизатсияи ТМН пайгирии НИМ-ро дар асоси бастаи MATLAB/Simulink медиҳад [1-А], [9-А].

7. Дурустии усулҳои коркардшудаи синтез ва танзими коэффициентҳои ТМН бо ҳамоҳангии ҳуби маълумотҳои ҳисобшуда ва натиҷаҳои таҷрибавӣ тасдиқ карда мешавад. Тавре ки натиҷаҳои таҷриба нишон доданд, пайгирии НИМ аз ҷониби ТМН бо истифода аз алгоритми генетикӣ оптимизатсияшуда бо самаранокии 96% амалӣ карда мешавад. Дар умум, натиҷаҳои бадастомада самаранокии усули таҳияшудаи танзимро нишон медиҳанд [1-А], [9-А], [16-А], [17-А].

8. Модели физикии ДФЭ бо системаи идоракунии интеллектуалӣ таҳия карда шуд. Дар асоси модели физикӣ бо назардошти шароити воқеии омӯзиши таҷрибавии тавсифҳои ДФЭ гузаронида шуд [1-А], [9-А].

9. Ҳисобкунии самаранокии иқтисодӣ аз татбиқи системаи идоракунии интеллектуалӣ дар ДФЭ гузаронида шуд. Баҳодиҳии самараи иқтисодии татбиқи РНЛО дар станцияи электрикии офтобии райони Мурғоб нишон медиҳад, ки муҳлати бароварди харч қариб 0,6 сол бо фоидаи миёнаи солона 11756 с ташкил медиҳад.

ФЕҲРИСТИ ИНТИШОРОТИ ИЛМӢ АЗ РӢИ МАВЗӢИ ДИССЕРТАТСИЯ

Наирияхо дар маҷаллаҳои илмие, ки Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон эътироф намудааст:

[1-А]. **Шарифов Б.Н.** Построение системы управления фотоэлектрической установки на основе методов нечеткой логики / Б.Н. Шарифов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023. №4 (64) – С. 18-23. ISSN: 2520-2227.

[2-А]. **Шарифов Б.Н.** Управление электромагнитными переходными процессами в системе регулирования выходными параметрами солнечной электростанции в условиях Республики Таджикистан / Б.Н. Шарифов, Р.Х. Диёрв, О.М. Сайфуллоева, У.У. Косимов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2022. №3 (59) – С. 11-20. ISSN: 2520-2227.

[3-А]. **Шарифов Б.Н.** Моделирование прихода солнечной инсоляции для климатических условий Республики Таджикистан / Б.Н. Шарифов, Ш.М. Султонов М.И. Сафаров., Р.Х. Диёрзода, Дж.Х. Каримзода // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2022. №2 (58) – С. 38-47. ISSN: 2520-2227

[4-А]. **Шарифов Б.Н.** Электромагнитные переходные процессы в системе управления выходными параметрами солнечной электростанции / Б.Н. Шарифов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2019. №4 (48) – С. 25-31. ISSN: 2520-2227.

[5-A]. **Шарифов Б.Н.** Моделирование солнечной панели в программе Matlab/Simulink / Б.Н. Шарифов, Т.Р. Терегулов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2015 №4, с 77-83.

[6-A]. **Шарифов Б.Н.** Анализ эффективности применения солнечных фотоэлектрических модулей в климатических условиях Российской Федерации / Ф.Р. Исмагилов, Б.М. Гайсин, Б.Н. Шарифов, Л.Р. Загитова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2018. Т. 22, № 2 (80). С. 73–81.

[7-A]. **Шарифов Б.Н.** Исследование эффективности работы солнечных фотоэлектрических установок в климатических условиях Республики Башкортостан / Ф.Р. Исмагилов, Б.Н. Шарифов, Б.М. Гайсин, Т.Р. Терегулов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2016 №2, с 111-116.

[8-A]. **Шарифов Б.Н.** Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью / Ф.Р. Исмагилов, Б.Н. Шарифов, Б.М. Гайсин, Т.Р. Терегулов, Н. Л. Бабкина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2016 – №4(74), – С 71–79.

Барномаи барои МЭҲ ба қайд гирифташуда

[9-A]. **Шарифов Б.Н.** Программный компонент для оптимизации регулятора нечеткой логики фотоэлектрической установки / Б.Н. Шарифов, Ф.К. Донаев, О.М. Сайфуллоева, Ш.С. Махмадов, Ф.К. Шарипов, Ш.М. Султонзода, Р.Х. Диёрзода / Внесен в Государственный реестр информационных ресурсов Республики Таджикистан 30.12.2023.

Интишорот дар базаи Scopus u Web of Science

[10-A]. **Sharifov B.N.** Electromagnetic transients in the control system of output parameters of a solar power plant in Tajikistan Central Asia region / B.N. Sharifov , M. Kh. Safaraliev , V.Z. Manusov , S.E. Kokin , S.A. Dmitriev , A.S. Tavlintsev , J.S. Ahyoev , K.H. Gulyamov. // International Journal of Hydrogen Energy Volume 47, Issue 9, 29 January 2022, Pages 5757-5765. ISJAEE, pp. 356–358.

[11-A]. **Sharifov B.N.** The mathematical model of pulse width modulation frequency converter / B.N. Sharifov, R. Yunusov, K. Kh. Gulyamov, S. Dovudov, M. Safaraliev // IEEE Conference Publication / IEEE Explore Published in: 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC).

[12-A]. **Sharifov B.N.** Increase in Power of DC/DC Converters with Increased Number of Conversion Channels / K. Gulyamov, R. Yunusov, S. Dovudov, B.N. Sharifov, A. Ghulomzoda, M. Safaraliev // IEEE Conference Publication / IEEE Explore Published in: 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC) pp 59-62.

[13-A]. **Sharifov B.N.** Research of a bi-directional DC-DC converter integrated in electric car power installation / K. H. Gulyamov, B. N. Sharifov, A. H. Ghulomzoda, M. Kh. Safaraliev, R. M Yunusov // 15th International Conference on Industrial

[14-A]. **Sharifov B.N.** Simplified solar panel modeling in MATLAB/Simulink considering Bashkortostan Republic (Russia) environment characteristics / B.N. Sharifov, T.R. Teregulov, R.A. Valeev. // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2016, pp 17-21 (IEEE Conference Publications).

Мақолаҳо дар маводи конференция

[15-A]. **Шарифов Б.Н.** Исследование энергетических характеристик фотоэлектрических установок / Б.Н Шарифов, А.А. Давлатов, О.М. Сайфуллоева // Международная научно –практическая конференция «Энергетика: Состояние и Перспективы Развития». – Душанбе ЦИ и П ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023 г. С 211 – 217. ISBN 978-99985-852-1-8.

[16-A]. **Шарифов Б.Н.** Интеллектуальная система управления фотоэлектрической установкой / Б.Н. Шарифов, А.А. Давлатов, Э.А. Чалолзода // Международная научно –практическая конференция «Энергетика: Состояние и Перспективы Развития». – Душанбе ЦИ и П ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023 г. С 547 – 550. ISBN 978-99985-852-1-8.

[17-A]. **Шарифов Б.Н.** Анализ современных систем управления отслеживанием максимальной мощности фотоэлектрических установок / Б.Н. Шарифов, Н.Д. Шарипов, А.А. Давлатов // Международная научно –практическая конференция «Энергетика: Состояние и Перспективы Развития». – Душанбе ЦИ и П ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023 г. С 543 – 547. ISBN 978-99985-852-1-8.

[18-A]. **Шарифов Б.Н.** Автономный инвертор напряжения в системе электроснабжения солнечной электростанции / Б.Н. Шарифов, К.Х. Гулямов, А.Х. Бабаева, М.И. Сафаров // Материалы международной научно-практической конференции “Перспектива развития науки и образования”, Часть 1. – Душанбе, 2019, -С. 44-47.

[19-A]. **Шарифов Б.Н.** Переходные процессы в сетях с солнечными электростанциями / Б.Н. Шарифов, Л.Д. Мустафин // Сборник докладов участников VIII Слета молодых энергетиков Башкортостана. Уфа. Инфореклама 2018 С 126 –130.

АННОТАТСИЯ

ба диссертатсияи Шарифов Боҳирҷон Насруллоевич дар мавзӯи «**Коркарди системаи интеллектуалии идоракунии дастгоҳи фотоэлектрикӣ**», ки барои дарёфти дараҷаи илмӣ номзади илмҳои техникӣ аз рӯйи ихтисоси 05.14.01 – Системаҳо ва мучтамаъҳои энергетикӣ пешниҳод шудааст.

Калимаҳои калидӣ: дастгоҳи фотоэлектрикии автономӣ, моделсозии математикӣ, нурпошии офтобӣ, танзими мантиқи норавшан, оптимизатсия, алгоритми генетикӣ.

Мубраияти мавзӯи диссертатсия. Азбаски истифодаи алгоритмҳои анъанавӣ дар системаҳои пайгирии нуқтаи иқтидори максималии (НИМ) дастгоҳи фотоэлектрикӣ (ДФЭ) аксар вақт наметавонанд талаботро ба ин гуна дастгоҳҳо пурра қонеъ гардонанд. Ин барои татбиқи усулҳои идоракунии интеллектуалӣ, аз ҷумла алгоритмҳои мантиқи норавшан, ки аллақай самаранокии худро дар ҳалли ҳамин гуна масъалаҳо дар соҳаҳои дигари технология собит кардаанд, пешомадҳои нав мекушояд.

Мақсади кори диссертатсионӣ – баланд бардоштани самаранокии раванди табдилдиҳии энергияи офтобии ДФЭ тавассути таҳия ва тадқиқоти системаҳои идоракунии интеллектуалӣ дар асоси усулҳои мантиқи номуайян.

Усулҳои таҳқиқот. Тадқиқоти гузаронидашуда дар асоси принципҳои илмӣ, аз ҷумла таҳлили энергияи офтоби, омӯхтани хосиятҳои физикию техниकीи фотоэлементҳо, назарияи идоракунии автоматӣ, истифодаи моделсозии рақамӣ ва гузарондани таҷрибаҳои мукамал асоснок карда шудааст. Ҳангоми омӯзиши речаҳои динамикӣ ва статикӣ ДФЭ муҳити интегралӣ MatLab/Simulink истифода шудааст.

Навовариҳои илмӣ кор. Модели комплексии математикии ДФЭ таҳия шудааст. Модели мазкур имкон медиҳад тавсифҳои баромади ДФЭ-ро дар шароити гуногуни иқлим омӯхта, оптимизатсия карда шавад. Инчунин дар диссертатсия ҳалли масъалаи синтези назоратчиҳои пайгирии НИМ ДФЭ дар асоси мантиқи норавшан ва оптимизатсияи онҳо бо истифода аз алгоритмҳои генетикӣ, ки дақиқии баланди пайгирӣ ва равандҳои пасти лапишро ҳангоми тағйирёбии муҳити зист дарбар мегирад, оварда шудааст.

Аҳамияти амалӣ ва татбиқи кор. Моделҳои математикии таҳияшударо дар тарҳрезӣ ва оптимизатсияи истеҳсоли энергияи электрикӣ дар ДФЭ истифода бурдан мумкин аст. Натиҷаи кори рисолаи диссертатсионӣ дар раванди таълимӣ кафедраи «Ҳаракатдиҳандаҳои автоматикунонидашудаи электрикӣ ва мошинҳои электрикӣ»-и Донишгоҳи техникийи Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ ворид карда шуд. Барномаи компютери таҳияшуда барои оптимизатсияи назоратчиҳои мантиқи норавшани дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ аз ҷониби Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон ба қайд гирифта шудааст.

Сохтор ва ҳаҷми кор. Кори диссертатсионӣ аз муқаддима, чор боб, хулоса, номгӯйи ибораҳои кӯтоҳшуда, номгӯйи адабиёт иборат аз 107 номгӯй ва 4 замима иборат аст. Ҳаҷми умумии кор аз 201 саҳифа иборат буда, 18 ҷадвал ва 109 расмро дар бар мегирад.

АННОТАЦИЯ

на диссертацию Шарифова Бохирджона Насруллоевича на тему **«Разработка интеллектуальной системы управления фотоэлектрической установкой»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая установка, математическое моделирование, солнечная инсоляция, регулятор нечеткой логики, оптимизация, генетический алгоритм.

Актуальность темы диссертации. Поскольку использование традиционных алгоритмов в системах слежения за ТММ ФЭУ часто не способны полностью удовлетворить требования, относительно точности и скорости отслеживания. Это открывает новые перспективы для внедрения методов интеллектуального управления, включая алгоритмы нечеткой логики, которые уже доказали свою эффективность при решении аналогичных задач в других областях техники.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности процесса преобразования солнечной энергии в ФЭУ путем разработки и исследования интеллектуальных систем управления на основе методов нечеткой логики.

Методы исследования. Проведенные исследования основаны на фундаментальных научных принципах, включающих в себя анализ солнечной энергетики, изучение физико-технических свойств солнечных элементов, теорий автоматического управления, применение численного моделирования и проведение натурных экспериментов. При исследовании динамических и статических режимов ФЭУ использована интегрированная среда MatLab/Simulink.

Научная новизна работы заключается в следующем: Разработана комплексная математическая модель ФЭУ, позволяющая проводить исследование выходных характеристик ФЭУ в различных климатических условиях. Доказана целесообразность разработки и синтезирован регулятор слежения за ТММ ФЭУ на основе нечеткой логики и оптимизации их параметров с помощью генетических алгоритмов, обеспечивающих высокую точность слежения и низкие колебательные процессы при изменении параметров окружающей среды.

Практическая значимость и реализация работы: Разработанные математические модели могут быть использованы при проектировании и оптимизации выдачи электрической мощности ФЭУ. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматизированный электропривод и электрические машины» Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими. Разработана компьютерная программа для оптимизации регулятора нечеткой логики слежения за ТММ ФЭУ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников, приложений. Работа изложена на 202 страницах машинописного текста, содержит 109 рисунка, 18 таблиц и формул. Список использованных источников включает 107.

ANNOTATION

for the dissertation of **Sharifov Bohirjon Nasrulloevich** on the topic
“**Development of a smart control system for a photovoltaic equipment**”,
submitted for the academic degree of Candidate of Technical Sciences in specialty
05.14.01 – Energy systems and complexes.

Key words: stand-alone photovoltaic equipment, mathematical modeling, solar insolation, fuzzy logic controller, optimization, genetic algorithm.

Relevance of the dissertation topic. Since the use of traditional algorithms in Maximum Power Point Tracking (MPPT), photomultipliers are often not able to fully satisfy the requirements regarding accuracy and speed of tracking. This opens up new prospects for the implementation of intelligent control methods, including fuzzy logic algorithms, which have already proven their effectiveness in solving similar problems in other areas of technology.

The purpose of the dissertation work is to increase the efficiency of the process of converting solar energy into photomultipliers by developing and researching intelligent control systems based on fuzzy logic methods.

Research methods. The research carried out is based on fundamental scientific principles, including the analysis of solar energy, the study of the physical and technical properties of solar cells, theories of automatic control, the use of numerical modeling and conducting full-scale experiments. When studying the dynamic and static modes of photomultipliers, the integrated MatLab/Simulink environment was used.

The scientific novelty of the work is as follows: A complex mathematical model of photomultipliers has been developed, which makes it possible to study the output characteristics of photomultipliers in various climatic conditions. The feasibility of developing and synthesizing a controller for tracking the MPPT of a photomultiplier is based on fuzzy logic and optimizing their parameters using genetic algorithms that provide high tracking accuracy and low oscillatory processes when environmental parameters change.

Practical significance and implementation of the work: The developed mathematical models can be used in the design and optimization of electrical power output of photomultipliers. The results of the dissertation work were introduced into the educational process of the department “Automated electric drive and electrical machines” of the Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi. A computer program has been developed to optimize the fuzzy logic controller for tracking the MPPT of a photomultiplier.

Structure and scope of work. The dissertation consists of an introduction, four chapters, general conclusions, a list of sources used, and applications. The work is presented on 202 pages of typewritten text, contains 109 figures, 18 tables and formulas. The list of sources used includes 107.

Подписано к печати _____.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ТТУ имени акад. М. С. Осими.
г. Душанбе, 734042, пр. акад. Раджабовых, 10а.