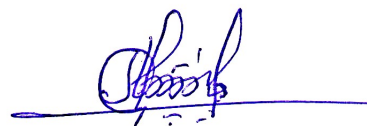


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.С. ОСИМИ**

На правах рукописи



УДК 621.311.243: 004.89

ШАРИФОВ БОХИРДЖОН НАСРУЛЛОЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата

технических наук по специальности

05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Научный руководитель:

к.т.н., доцент Диёрзода Р.Х.

Душанбе - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ФЭУ	16
1.1. Современное состояние и направления развития ФЭУ	16
1.2. Физико-технические основы фотоэлектрической солнечной энергетики.....	23
1.3. Анализ структуры ФЭУ	28
1.4. Основные характеристики ФЭУ	33
1.5. Эффективность ФЭУ	35
1.6. Анализ современных систем управления слежения за ТММ ФЭУ	38
1.6.1. Метод возмущения и наблюдения.....	41
1.6.2. Метод возрастающей проводимости	46
1.6.3. Метод токовой развертки.....	48
1.6.4. Метод постоянного напряжения.....	49
1.6.5. Интеллектуальные методы управления.....	50
Выводы и результаты по первой главе	55
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЭУ	56
2.1. Моделирование элементов ФЭУ	56
2.1.1. Моделирование прихода уровня СИ с последующей верификации с результатами реальных испытаний	61
2.1.2. Математическая модель ФЭМ и верификация выходных характеристик при различных условиях окружающей среды	76
2.2. Моделирование ФЭМ в программе Matlab/Simulink.....	80
2.3. Математическая модель DC/DC преобразователя.....	95
2.3.1. Повышающий преобразователь.....	98
2.3.2. Понижающий преобразователь	101
2.3.3. Модель электрической нагрузки DC-DC преобразователя.....	106
2.4. Модель контроллера поиска ТММ ФЭУ.....	107

Выводы и результаты по второй главе.....	109
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.....	110
3.1. Основные положения теории нечетких множеств.....	110
3.2. Принцип построения РНЛ слежения за ТММ ФЭУ	118
3.3. Разработка РНЛ слежения за ТММ ФЭУ	123
3.4. Модельное исследование переходных процессов в ФЭУ	130
3.5. Оптимизация РНЛ с помощью генетических алгоритмов	136
3.5.1. Алгоритм и программная реализация предложенного метода оптимизации	143
3.6. Моделирование РНЛ с оптимизированными параметрами	146
Выводы и результаты по третьей главе	152
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФЭУ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.....	153
4.1. Постановка задачи.....	153
4.2. Аппаратные компоненты физической модели ФЭУ	154
4.2.1 Фотоэлектрический модуль	154
4.2.2 Программируемый контроллер ARDUINO.....	155
4.2.3 Датчики напряжения и тока	158
4.2.4. Импульсный повышающий преобразователь	161
4.3. Программное обеспечение физической модели ФЭУ	163
4.4. Результаты экспериментального исследования физической модели ФЭУ.....	165
4.5. Расчет экономической эффективности внедрения интеллектуальной системы управления.....	168
4.5.1 Расчет затрат на разработку программного продукта	170
4.5.2. Расчет годовой прибыли внедрения интеллектуальной системы управления.....	171
Выводы и результаты по четвертой главе	173

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	174
ЛИТЕРАТУРА.....	178
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	199
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	200

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- ВАХ – вольтамперная характеристика
- ВИЭ – возобновляемые источники энергии
- ВВХ – вольт ваттная характеристика
- ГА – генетический алгоритм
- ДТ – датчик тока
- ДН – датчик напряжения
- ИНС – искусственная нейронная сеть
- КПД – коэффициент полезного действия
- ОЭС – объединенная энергосистема
- РТ – Республика Таджикистан
- РНЛ – регулятор нечеткой логики
- РНЛО – оптимизированный РНЛ
- СИ – солнечная инсоляция
- СЭУ – солнечная энергетическая установка
- ТММ – точка максимальной мощности
- ТФЭС – тестовая фотоэлектрическая станция
- ФЭМ – фотоэлектрический модуль
- ФЭУ – фотоэлектрическая установка
- ФЭС – фотоэлектрическая станция
- ФЭ – фотоэлемент
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция
- ЭЭС – электроэнергетическая система
- MPPT – maximum power point tracking
- CSP – concentrated solar power
- InC – incremental conductance
- P&O – perturb and observe

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спрос на энергию растет с каждым годом, и уже существующие энергоресурсы, включая тепловые, водные, атомные и газовые, не в состоянии удовлетворить спрос. Кроме того, современная тенденция развития мировой энергетики идет по пути отказа от атомной и углеводородной энергетики к возобновляемой. На данный момент большое внимание уделяется использованию солнечной энергии, которая является возобновляемым источником энергии. Преимущество солнечной энергии заключается в ее возобновляемости. Солнечное излучение является бесконечным и доступным в любых точках Земли, что обеспечивает неограниченный потенциал энергии. В отличие от нефти, угля и газа солнечная энергия неисчерпаема и не загрязняет окружающую среду. Использование солнечной энергии может существенно снизить нагрузку на природные ресурсы, сократить выбросы вредных веществ и обеспечить устойчивое развитие энергетического сектора. Одним из основных методов получения электрической энергии из солнечной является применение фотоэлектрических установок (ФЭУ). ФЭУ позволяют получать электроэнергию из солнечного излучения, что делает их экологически чистыми и особенно полезными в удаленных районах. Снижение стоимости фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и рост цен на традиционные источники энергии способствуют расширению использования ФЭУ. Использование ФЭУ в системах водоснабжения позволяет обеспечивать непрерывное электроснабжение насосов, что важно для эффективного функционирования данной системы. Также ФЭУ позволяют использовать солнечную энергию для работы кондиционированных станций, что способствует снижению затрат на электроэнергию. Благодаря использованию ФЭУ в отдаленных и изолированных районах становится возможным обеспечить доступное и стабильное электроснабжение без необходимости прокладывать дорогостоящие линии электропередач. Это особенно важно для развития инфраструктуры в этих районах, так как обеспечение надежного электроснабжения является ключевым фактором для привлечения инвестиций и

повышения качества жизни населения.

Однако проблемы с низкой эффективностью и несовершенством преобразовательных устройств в этих системах создают определенные трудности. Низкая эффективность ФЭУ может иметь несколько причин:

1. Отражение и рассеяние света: часть солнечного света может отражаться или рассеиваться с поверхности фотоэлемента (ФЭ), что приводит к потере энергии и снижению эффективности работы установки.

2. Тепловые потери: ФЭ могут нагреваться в процессе работы, что ведет к потере энергии в виде тепла. Высокая температура может негативно влиять на эффективность работы ФЭ.

3. Ограниченная ширина спектра поглощаемого света: ФЭ, как правило, работают на определенной длине волны света. При отсутствии поглощения света на других длинах волн ФЭ не может использовать всю доступную солнечную энергию.

4. Потери из-за сопротивления: ФЭ имеют внутреннее сопротивление, которое приводит к потере энергии в виде тепла и снижения эффективности работы установки.

5. Загрязнение поверхности ФЭ: накопление пыли, грязи или других загрязнений на поверхности ФЭ может привести к снижению поглощаемого света и ухудшению эффективности работы установки.

6. Эффекты окружающей среды и климатические условия: факторы, такие как изменение освещенности, погодные условия, загрязнение воздуха и влияние окружающей среды, могут отрицательно влиять на эффективность работы ФЭУ.

Для решения проблемы низкой эффективности проводятся исследования и разработки новых материалов и технологий, направленных на увеличение эффективности ФЭУ. Также ведутся исследования по улучшению характеристик и эффективности уже существующих ФЭУ с внедрением интеллектуальных систем управления.

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 (ФЭП). 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 вольтамперной 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

позволяющая проводить исследование выходных характеристик ФЭУ в различных климатических условиях.

- 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.
- VIII Слет молодых энергетиков Башкортостана. Уфа. Инфореклама 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, 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ФЭУ

1.1. Современное состояние и направления развития ФЭУ

Солнечная энергетика, по многим прогнозам, является одной из самых перспективных отраслей возобновляемой энергетики. Только 0,00000022% солнечной энергии доходит до нашей планеты [1]. Земная атмосфера отражает 36% этой энергии, поглощает 17%, а 47% ($7,5 \cdot 10^{12}$ кВт час/год) поступает на поверхность Земли. В целом солнечная энергия является практически неограниченным источником, мощность которого при достижении поверхности Земли составляет около 20 млрд кВт. Масштабы поступления гелиоэнергии характеризуют следующие цифры: годовой приход солнечной энергии эквивалентен тепловому эффекту при сжигании $1,2 \cdot 10^{14}$ т.у.т. а мировые запасы органического топлива составляют $6 \cdot 10^{12}$ т.у.т. [1].

Развитие солнечной энергетике также связано с масштабными программами поддержки возобновляемой энергетики, реализуемыми в развитых странах Европы, США, Китае и Японии. Работы, связанные с решением проблемы использования солнечной энергии, ведутся во многих странах. Главное внимание уделяется изучению режима работы фотоэлектрических и фотоэнергетических комплексов, созданию и испытанию солнечных электрических станций, повышению коэффициента полезного действия фотоэлектрических преобразователей. Однако несмотря на все крупномасштабные успехи в солнечной энергетике, ее доля не превышает 3% от общемировых выработок электроэнергии [2]. Согласно данным международной ассоциации возобновляемой энергетики, суммарная мощность всех солнечных электростанций в мире в 2022 году достигает 1177 ГВт (рис.1.1) [3-5]. Данный показатель на 26% выше, чем в 2021 году. В настоящее время Китай является самым крупным производителем фотоэлектрических преобразователей в мире. Если в 2007 году суммарная мощность фотоэлектрических преобразователей, производимых Китаем, составила 1080 МВт, то сегодня это цифра достигает 400 ГВт [3-5].

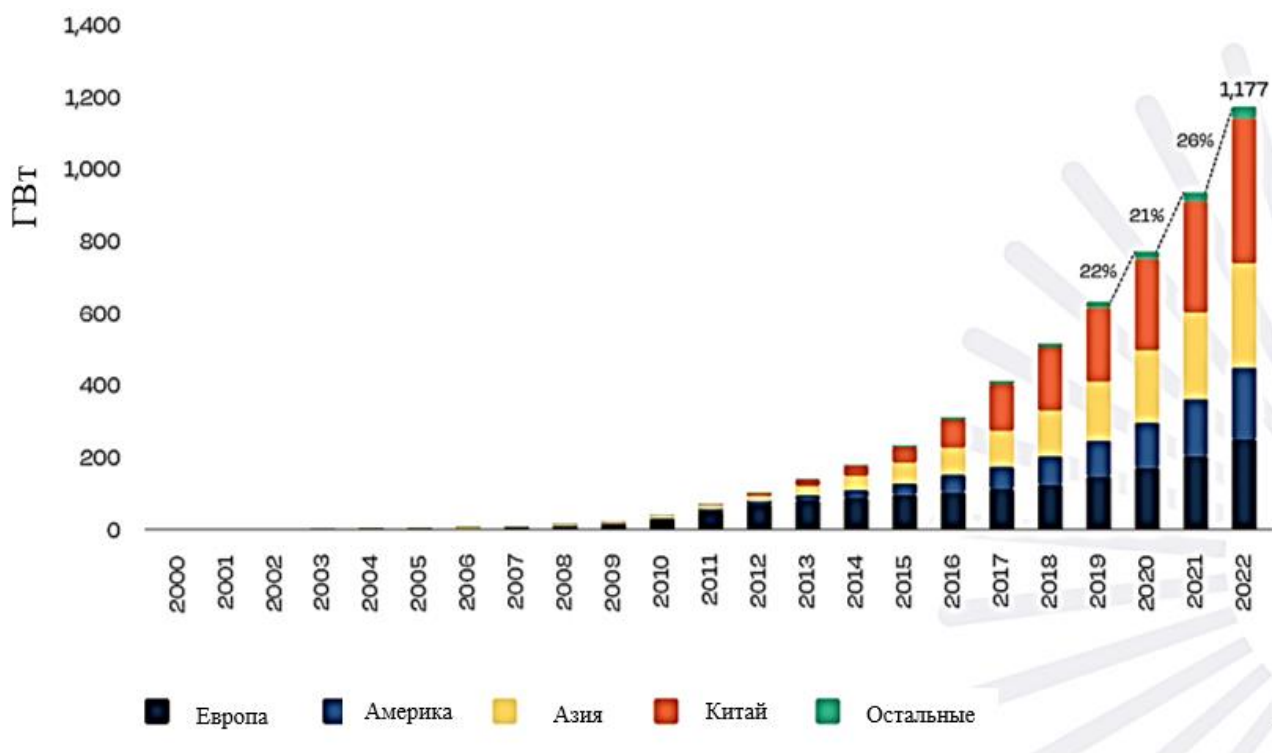


Рисунок 1.1 – Динамика роста кумулятивного объема установленной мощности солнечных электростанций.

К концу 2022 г. на Азиатско-Тихоокеанский регион, включая Китай, приходилось 59% мировых мощностей по выработке солнечной энергии с общей мощностью 692 ГВт (рис.1.2). Только Китай, установив более 400 ГВт, обеспечил 58% солнечной мощности Азиатско-Тихоокеанского региона, в то время как остальная часть региона контролирует оставшиеся 289 ГВт. Европа с совокупной фотоэлектрической мощностью 252 ГВт заняла второе место в глобальном рейтинге по установке солнечных электростанций. Несмотря на потерю лидерства по объему «солнечной» мощности, Европа остается главным рынком сбыта солнечной энергетики. Америка сохранила свое 3-е место в региональном рейтинге в 2022 году. Общая установленная фотоэлектрическая мощность региона составляет 200 ГВт. В регионе Ближнего Востока и Африки наблюдался значительный рост спроса, он не оказал существенного влияния на его солнечное позиционирование. Совокупная мощность солнечных фотоэлектрических станций региона составила 33,3 ГВт, а ее глобальная доля останется на уровне 3% в 2022 году [3-5]. В таблице 1.1 приведены точные данные по кумулятивным объемам установленной солнечной электростанции

Топ 20 стран мира в 2022 г.

Таблица 1.1. Топ 20 стран по кумулятивному объему солнечной мощности в 2022г.

№	Страна	Уст. мощность. ГВт	№	Страна	Уст. мощность. ГВт
1	Китай	402.945	11	Голландия	18.051
2	США	140.773	12	Великобритания	15.912
3	Япония	84.138	13	Франция	15.710
4	Индия	77.548	14	Польша	12.189
5	Германия	67.764	15	Тайвань	9.749
6	Австралия	31.024	16	Турция	9.525
7	Испания	27.406	17	Чили	6.514
8	Италия	24.610	18	Греция	5.524
9	Южная Корея	24.282	19	О.А.Э.	3.682
10	Бразилия	24.023	20	Саудовская Аравия	1.236

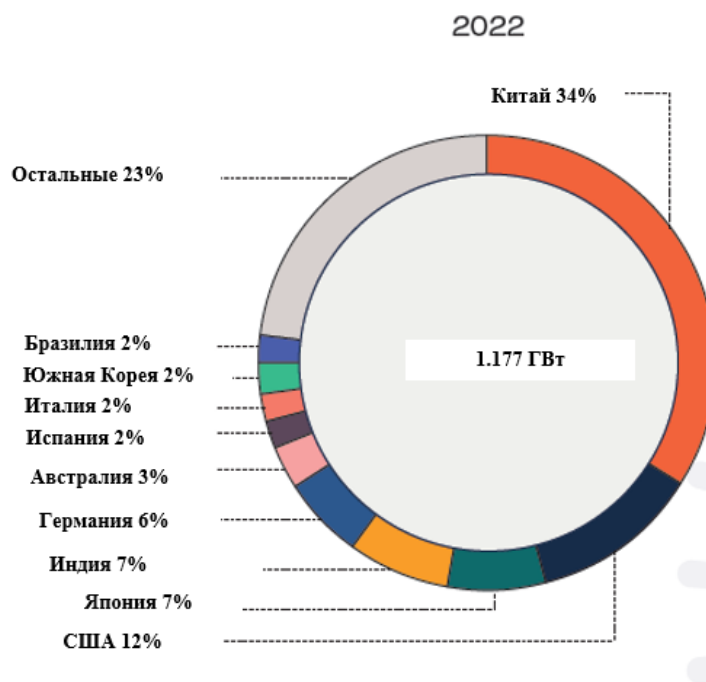


Рисунок 1.2 – Структура мирового объема солнечной фотоэлектрической мощности

Республика Таджикистан (РТ) располагает колоссальным потенциалом практически по всем возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), в том числе по солнечной энергии. Суммарная СИ при ясном небе на территории РТ достигает 700-900 Вт/м² или 7,500-8,000 МДж/м² (рис.1.3.). В горных районах, особенно на Восточном Памире, уровень СИ значительно выше, где местное население имеет ограниченные возможности использовать водные ресурсы для производства электроэнергии.

Оценка интенсивности прямой СИ на основе обобщенных показателей позволяет установить следующие значения: в июне и июле интенсивность инсоляции составляет примерно 10,3 кВтч/м², в декабре и январе эта величина снижается до 5,9 кВт·ч/ м². В весенние месяцы на склонах и спусках с углами наклона 10° и 30° уровень солнечной инсоляции ощутимо снижается: примерно на 10-15% и 15-20% соответственно по сравнению с горизонтальными поверхностями [6,7]. Летом, однако, общее количество солнечной инсоляции не отличается от той, которая падает на горизонтальные поверхности. В таблице 1.2 приведены данные о солнечной инсоляции на горизонтальной площадке в ясный день на средней широте Таджикистана (39° с. ш.).

На сегодняшний день в Таджикистане установлено 2433 солнечные генерирующие установки общей мощностью 887 кВт в соответствии с данными Министерства энергетики и водных ресурсов Таджикистана.

Таблица 1.2. Среднемесячная СИ в основных населенных пунктах Таджикистана, Вт/м²

Населенные пункты	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Душанбе	87	122	156	209	275	327	330	294	244	168	112	77
Худжанд	87	114	164	229	290	330	322	290	243	164	100	65
Бохтар	80	115	153	213	277	333	322	290	232	165	110	73
Шаартуз	80	115	153	213	277	333	322	290	232	165	110	73
Гарм	87	122	156	209	275	327	330	294	244	168	112	77
Исфара	87	122	156	209	275	327	330	294	244	168	112	77

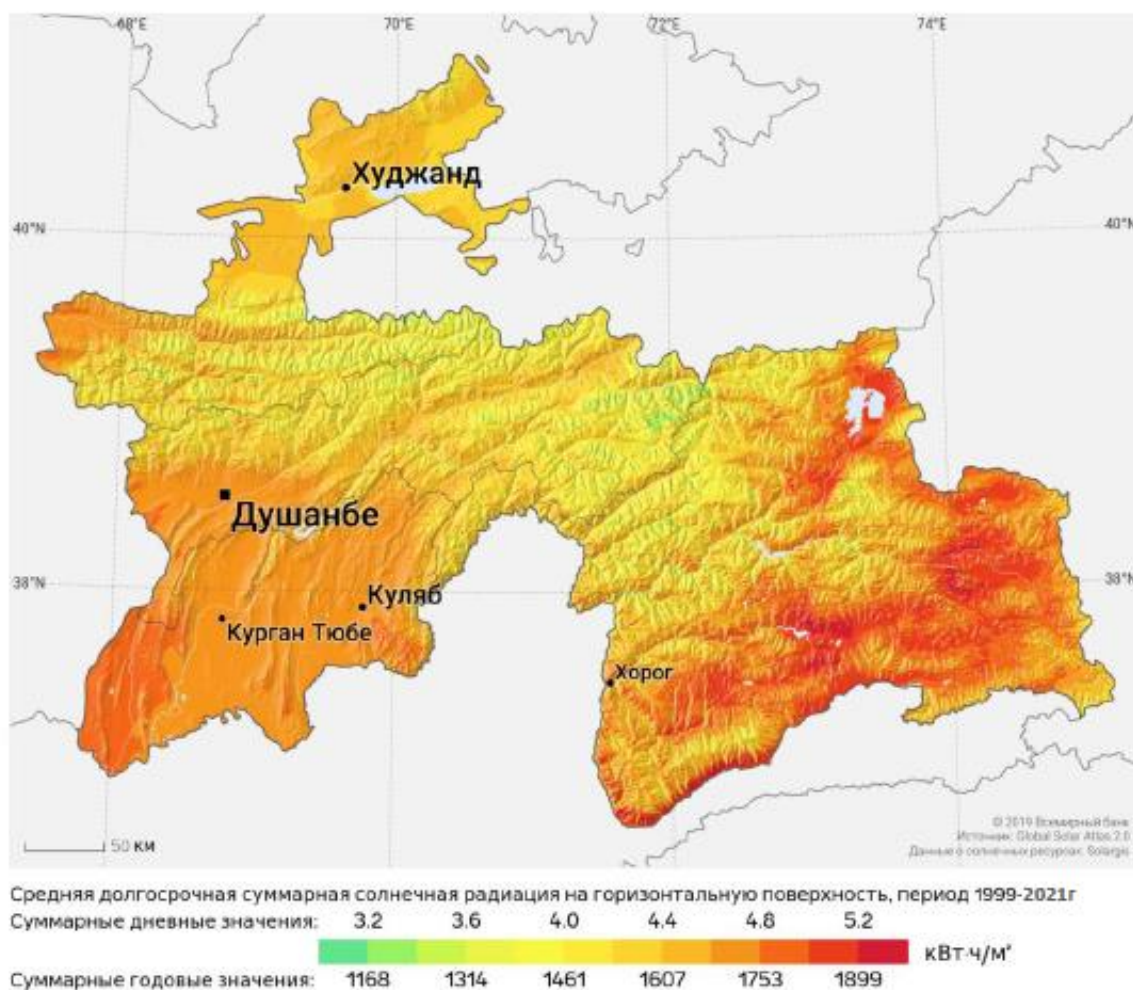


Рисунок 1.3 – Суммарная прямая солнечная радиация на территории Таджикистана

Таджикистан обладает благоприятными условиями для использования солнечной энергии. Благодаря более чем 300 солнечным дням в году и значительному потенциалу солнечной энергии, который оценивается в 25 миллиардов киловатт-часов, страна является идеальным местом для размещения солнечных электростанций. Несмотря на то, что площадь Таджикистана составляет 141,8 тысячи квадратных километров, только около 1% этой территории может быть использовано в целях размещения солнечных электростанций. Однако даже при таком ограниченном пространстве потенциал энергии, которую можно получить с этой территории, огромен. Специалисты утверждают, что средняя продолжительность работы солнечных установок в Таджикистане составляет 2700 часов в год [6,7]. Учитывая эффективность

преобразования солнечной энергии в электрическую, можно ожидать производство 300 миллиардов киловатт-часов электроэнергии в год. Это огромный потенциал, который может значительно сократить зависимость Таджикистана от традиционных источников энергии и способствовать развитию экологически чистых источников электричества в стране.

Особенно привлекательным является потенциал солнечной энергии для Таджикистана, учитывая его программы по развитию солнечных электростанций. Постепенно увеличивая долю энергии, получаемой от солнца, Таджикистан может сэкономить значительные средства, снизить выбросы углерода и способствовать более устойчивому развитию страны. Необходимо стремиться к изучению и внедрению новых технологий в области солнечной энергии, чтобы максимально использовать ее потенциал в Таджикистане и обеспечить стабильное, доступное и экологически чистое электроснабжение. Все эти факторы делают Таджикистан одним из наиболее привлекательных мест для инвестиций в солнечную энергетику.

Учитывая данный потенциал, Таджикистан имеет большие возможности использования солнечной энергии для покрытия зимнего дефицита электроэнергии.

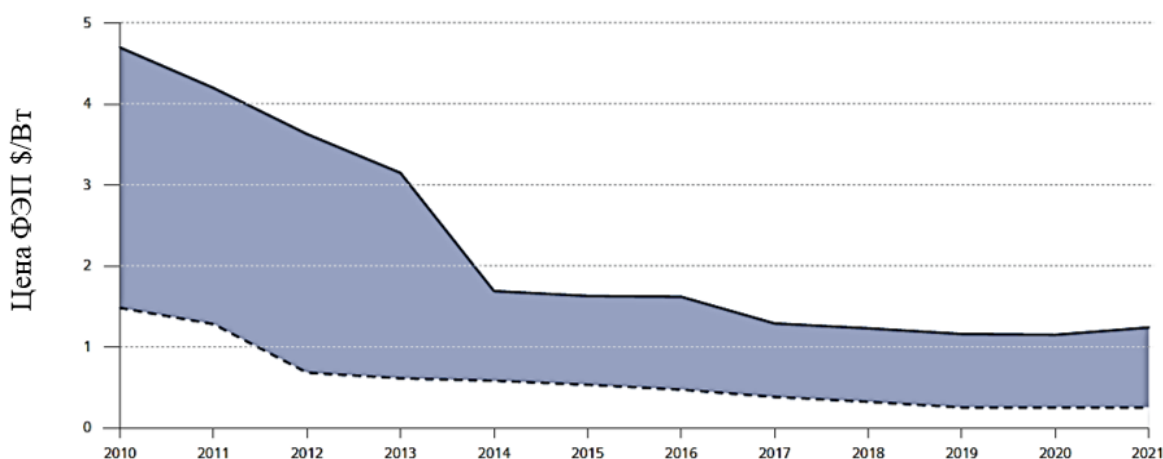


Рисунок 1.4 – Диаграмма изменения стоимости 1Вт кремниевых ФЭМ.

Для удовлетворения энергетических требований Таджикистана, учитывая наличие возобновляемых источников энергии и географические особенности, необходимо значительно инвестировать в развитие данных проектов.

Снижение стоимости ФЭМ является главным фактором роста солнечной энергетики, что, прежде всего, происходит благодаря научно-техническому прогрессу. За период 2010 по 2021 гг. стоимость 1 Вт кремниевых фотоэлектрических преобразователей сократилась в 19 раз [8] от 4.75\$ (2010г) верхняя граница ценового диапазона до 0,25\$ (2021г) нижняя граница ценового диапазона.

В ближайшие десятилетия солнечная энергетика станет стимулом для экономического развития экваториальных стран, обладающих максимальным «солнечным» ресурсом. По данным международной организации по поддержке возобновляемой энергетики *REN21 (Bonn, Germany)* в 2021 году общий объем инвестиций в альтернативную энергетику в мире составил 366 млрд. долларов, увеличившись на 6,8%. Объем инвестиций в солнечную энергетику в 2021г. составил 191 млрд. дол., что в 3 раза больше чем в 2009г. [3,4,8].

В настоящий момент существуют две гелиотехнологии, которые могут претендовать на развитие солнечной энергетики в будущем. Первая основана на извлечении тока в результате фотоэлектрического эффекта. Вторая технология, известная как концентрированная солнечная энергетика (CSP), представляет собой способ преобразования тепловой энергии солнца [9].

Солнечная фотоэнергетика продвинулась далеко за последние десятилетия, преимущественно благодаря возможности масштабирования фотоэлектрических станций (ФЭС) на любую мощность. Это означает, что фотоэлектрические станции могут быть маленькими автономными энергоустановками с мощностью от нескольких десятков ватт до сотен киловатт, а также крупными сетевыми электростанциями мощностью от десятков до сотен мегаватт.

Фотоэлектрические станции работают посредством превращения света в электрический ток при помощи полупроводниковых материалов, таких как кремний. Когда солнечный свет попадает на ФЭМ, электроны в материале взаимодействуют с фотонами, освобождая тем самым электроны и создавая поток электрического тока [10].

CSP-технология, с другой стороны, использует более сложный подход. Она основана на концентрации солнечного света с помощью зеркал и линз, чтобы сосредоточить его на узкой площади. От этого участка происходит нагрев теплоносителя, такого как масло или вода, который затем передает эту энергию в парогенераторы или паровые турбины для производства электричества.

Одна из главных преимуществ CSP-технологии заключается в ее способности производить энергию даже после захода солнца, поскольку теплоноситель может продолжать нагреваться и передавать энергию в течение продолжительного времени. Это делает ее более надежной и подходящей для производства электроэнергии даже во время облачной погоды или ночью.

Оба этих вида гелиотехнологий представляют огромный потенциал для развития солнечной энергетики в будущем. Они помогут нам сократить зависимость от исчерпаемых ископаемых ресурсов и снизить вредные выбросы в атмосферу, а также сделать нашу энергетическую систему более устойчивой и экологически чистой.

1.2. Физико-технические основы фотоэлектрической солнечной энергетики

Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии являются важным и перспективным источником возобновляемой энергии. Они основаны на использовании полупроводникового материала, такого как кремний с добавками других элементов, чтобы создать структуру с p-n-переходом. Работа ФЭ на основе кремния основана на создании различных типов проводимости в его слоях. В полупроводниковом кремниевом ФЭ формируется положительная проводимость в p-слое и отрицательная проводимость в n-слое. На границе этих двух слоев образуется потенциальный барьер, который препятствует свободному перемещению электронов и дырок из одного слоя в другой. Этот потенциальный барьер играет ключевую роль в конвертации солнечной энергии в электрическую. Когда ФЭ подвергается воздействию СИ, фотоны, содержащие энергию, попадают на поверхность ФЭ и вызывают фотоэффект. При этом

электроны, получив энергию от фотонов, преодолевают потенциальный барьер в области р-п-перехода, перемещаясь из р-слоя в п-слои и вызывая течение электрического тока.

Такие ФЭ на основе кремния широко применяются в солнечных панелях и солнечных батареях. Они способны генерировать электрическую энергию из солнечного излучения и оказываются надежными и экологически чистыми источниками энергии, внося значительный вклад в развитие возобновляемой энергетики.

Когда на ФЭ падает свет, фотоны энергии поглощаются полупроводником, создавая пары "электрон - дырка". Пары, приближаясь к границе слоев, нейтрализуют потенциальный барьер, позволяя электронам и дыркам свободно перемещаться между слоями. Это вызывает появление наведенной электродвижущей силы внутри полупроводника, и она становится источником электрического тока. Чем интенсивнее световой поток, тем больше будет фотоэлектродвижущая сила (фото ЭДС) (рис 1.5.) [11 - 13].

Фотоэлектрическая система опирается на солнечные элементы в качестве основного строительного блока. Обычно отдельная ячейка создает небольшую мощность около 1 или 2 Вт. Чтобы увеличить общую мощность, солнечные ячейки соединяются в модули, которые представляют собой более крупные секции. В свою очередь, модули могут быть объединены для создания массивов, которые увеличивают мощность.

В зависимости от рабочего фотоэлектрического слоя солнечные преобразователи могут быть классифицированы следующим образом:

1. Кремниевые:
 - монокристаллические;
 - поликристаллические;
 - аморфные.
2. Теллурий-кадмиевые.
3. На основе селенида индия-меди-галлия.
4. Полимерные.

5. Органические.
6. На основе арсенида галлия.
7. Комбинированные и многослойные.

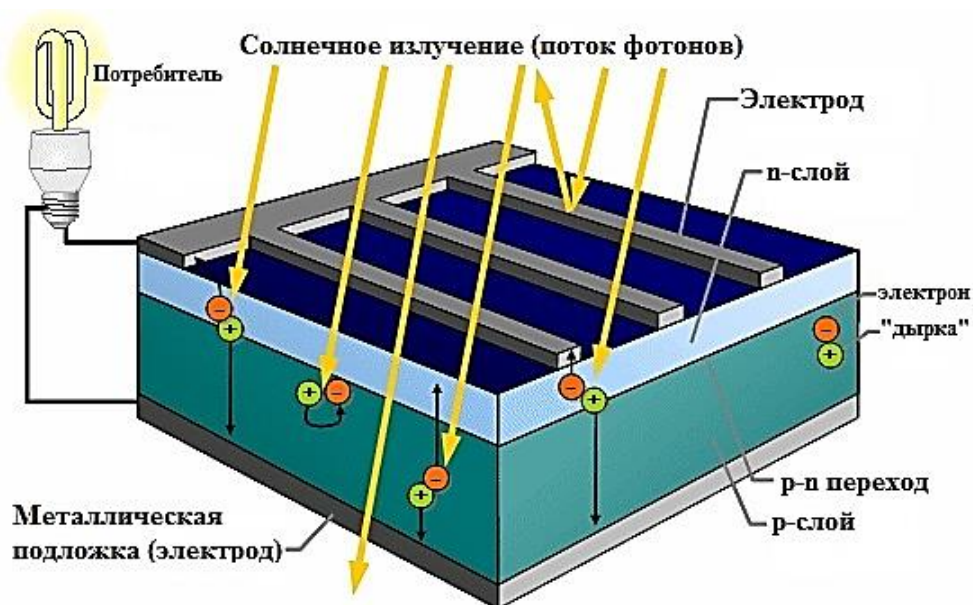


Рисунок 1.5 – Принцип действия ФЭ

Кремний, безусловно, является наиболее распространенным полупроводниковым материалом, используемым в солнечных преобразователях, что составляет примерно 95% продаваемых сегодня ФЭМ. Это также второй по распространенности материал на Земле (после кислорода) и самый распространенный полупроводник, используемый в компьютерных чипах. Структура элементов кристаллического кремния, состоящих из атомов кремния, взаимосвязанных друг с другом, формирует организованную решетку. Эта решетка обеспечивает упорядоченную систему, которая повышает эффективность преобразования световой энергии в электрическую.

ФЭ изготавливают из кремния и в настоящее время они объединяют в себе высокую эффективность, низкую стоимость и длительный срок эксплуатации. Предполагается, что такие модули прослужат более 25 лет, продолжая производить более 80% своей первоначальной мощности [14,15].

На сегодняшний день наиболее распространенными являются ФЭМ трех типов (рис.1.7): монокристаллические, обладающие КПД до 25%;

поликристаллические с КПД до 20%; модули из аморфного кремния, обеспечивающие КПД не более 9%. Монокристаллические солнечные модули являются самыми дорогостоящими в производстве, за ними следуют поликристаллические модули, а модули из аморфного кремния являются наименее затратными. В настоящее время наиболее распространены именно монокристаллические и поликристаллические ФЭМ, в то время как модули из аморфного кремния имеют более низкий КПД.

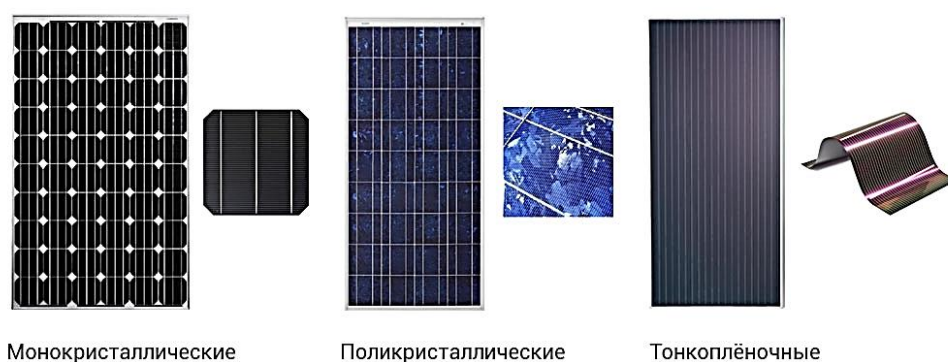


Рисунок 1.6 – Типы ФЭМ, наиболее используемых сегодня

Существует ряд ФЭМ, которые отличаются высокой эффективностью, превышающей 30%. Однако их стоимость значительно выше, поскольку они изготовлены с использованием редких и дорогостоящих металлов. Тем не менее, они успешно заняли свою нишу на рынке высоких технологий благодаря уникальным характеристикам.

Такие ФЭМ из редких металлов представлены несколькими типами, причем не все из них обладают более высокой эффективностью по сравнению с монокристаллическими кремниевыми модулями. Основными сплавами, используемыми для изготовления таких преобразователей, являются теллурид кадмия (CdTe), селенид индия-меди-галлия (CIGS) и селенид индия-меди (CIS).

Однако следует отметить, что кадмий является токсичным металлом, а индий, галлий и теллур считаются редкими и дорогостоящими ресурсами.

В связи с этим массовое производство ФЭМ на основе этих материалов даже в теории невозможно.

Эффективность таких ФЭМ составляет от 25 до 35%, однако в редких случаях она может достигать 40 процентов. Ранее использование этих ФЭМ преимущественно ограничивалось космической индустрией, но сейчас появилась новая перспективная область применения.

Большим достижением полупроводниковой промышленности стала разработка ФЭ, обладающих КПД до 48% (рис.1.7) [16]. В настоящее время быстрое развитие технологий создает большое количество новых вариантов фотоэлектрических преобразователей. Этот процесс продолжится и в будущем, поскольку технологии постоянно совершенствуются и улучшаются.

1.3. Анализ структуры ФЭУ

В общем случае ФЭУ представляют собой функциональную схему, изображенную на рисунке 1.9. Они состоят из ФЭМ, управляющего устройства - регулятора заряда-разряда, элементов хранения энергии - аккумуляторных батарей (АБ) и преобразователя, который преобразует постоянное напряжение в переменное – инвертор [17-22].

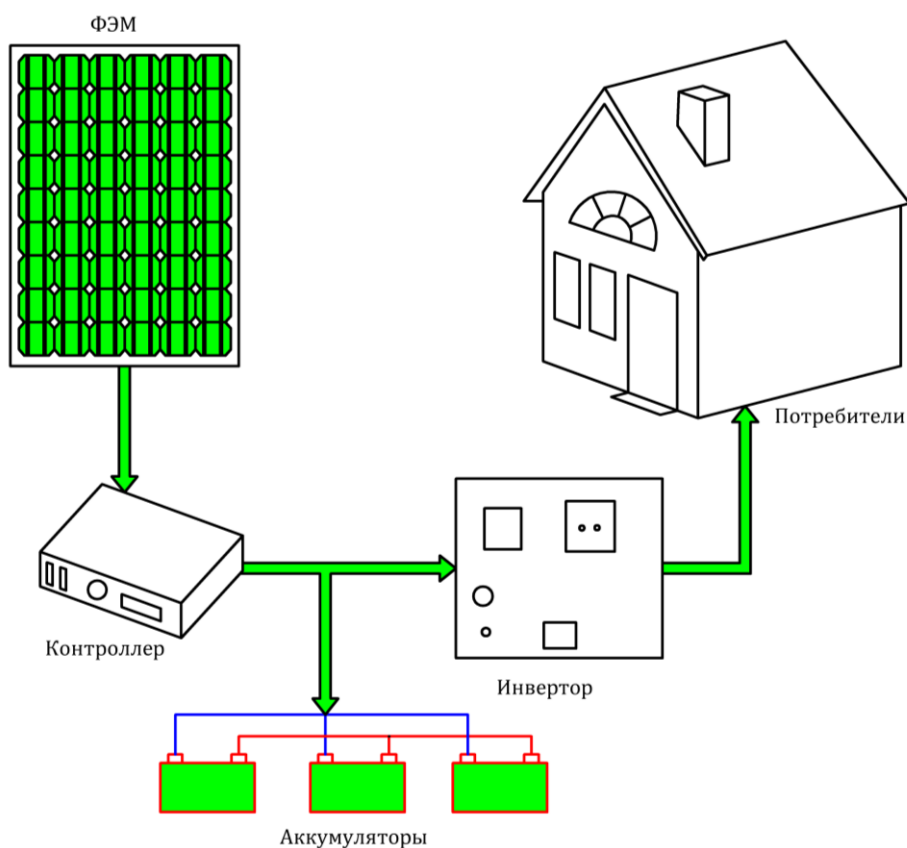


Рисунок 1.8 – Функциональная схема ФЭУ.

Состав ФЭУ может меняться в зависимости от технико-эксплуатационных требований [23 – 26].

В зависимости от сферы применения ФЭУ могут функционировать как автономные источники энергии или интегрироваться в сетевую инфраструктуру. Таким образом, существует несколько основных конфигураций ФЭУ, которые применяются для генерации электроэнергии.

Автономная ФЭУ

Самая распространенная конфигурация ФЭУ — это система, включающая в себя аккумуляторные батареи (АКБ) (рис. 1.9). Данная система является полностью автономной и не зависит от централизованных электросетей, что делает ее идеальным решением для комфортного энергоснабжения потребителей.

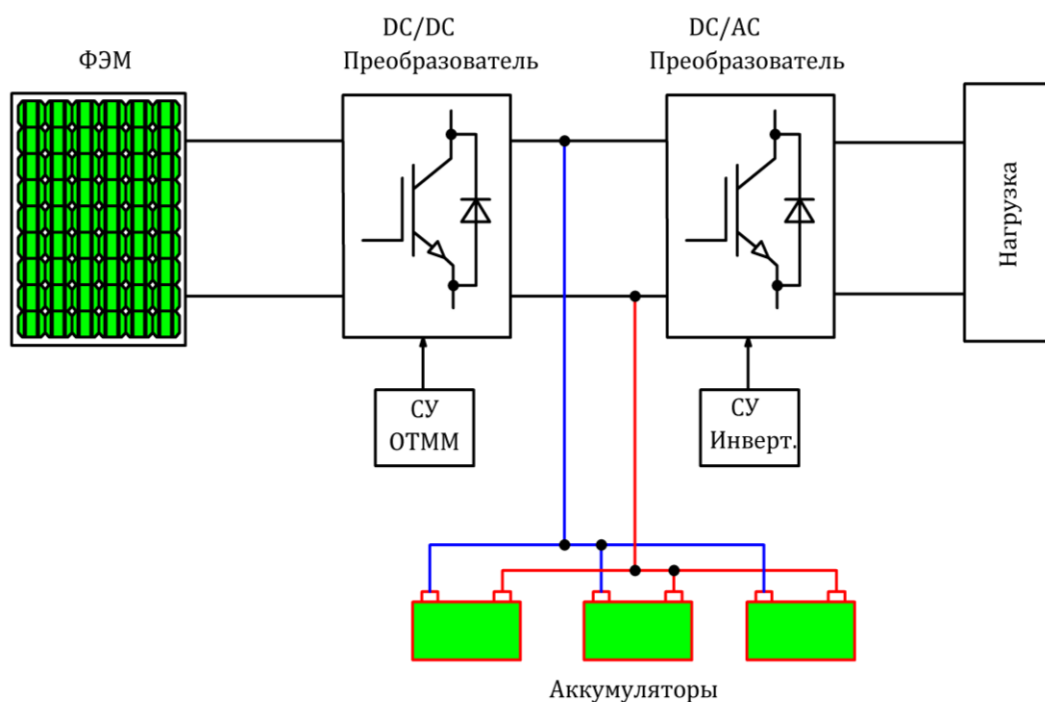


Рисунок 1.9 – Функциональная схема автономной ФЭУ

Аккумуляторные батареи позволяют улучшить работу ФЭУ, расширить их возможности и повысить надежность, поскольку они используются для хранения энергии, созданной солнечными преобразователями. Это позволяет увеличить эффективность системы, делая ее более надежной и решая проблему нехватки энергии в периоды низкой освещенности или, когда потребляемая нагрузка превышает генерируемую энергию ФЭУ.

Конфигурации, использующие такую технологию, находят широкое применение в различных областях. Например, они могут быть использованы для освещения жилых и коммерческих помещений, обеспечения энергоснабжения домов и зданий, создания систем безопасности и аварийного энергоснабжения, обеспечения энергией отдаленных жилых и коммерческих объектов, а также для энергоснабжения космических аппаратов и других областей.

Автономные ФЭУ обычно состоят из двух типов преобразователей. DC/DC преобразователь, который выступает в роли регулятора для зарядки аккумуляторных батарей, и система управления этим преобразователем может также отслеживать точку максимальной мощности с целью максимального использования солнечной энергии. При этом избыток энергии сохраняется в аккумуляторных батареях. DC/AC преобразователь же служит для преобразования постоянного тока (DC) в переменный (AC) для подачи нужного электричества устройствам. Он необходим для обеспечения энергией устройств, работающих от электрической сети переменного тока.

Данная система обладает преимуществом, которое заключается в возможности использования солнечной энергии как днем, так и ночью, благодаря возможности хранения энергии в аккумуляторных батареях. Кроме того, система сможет применяться на удаленных объектах, где отсутствует сетевое энергоснабжение. Однако ее недостатком является потеря энергии из-за двойного преобразования солнечной энергии, что может привести к уменьшению КПД системы и высокой стоимости аккумуляторных батарей.

Аккумуляторная сетевая ФЭУ

Данная ФЭУ имеет сходство с автономной системой, так как она также оснащена аккумуляторными батареями. Однако главными элементами этой системы являются солнечный инвертор и возможность подключения к централизованной электрической сети (рис. 1.10).

Лишнюю энергию, произведенную ФЭМ, можно направить в аккумуляторные батареи или подать в электрическую сеть. В случае, если потребление электроэнергии превышает производство ФЭМ, недостающую

энергию можно получить из сети. Если большее количество энергии используется в период дневного времени, а централизованное энергоснабжение редко прерывается, то использование такой системы будет наиболее эффективным с экономической точки зрения, и она будет обладать более низкой стоимостью.

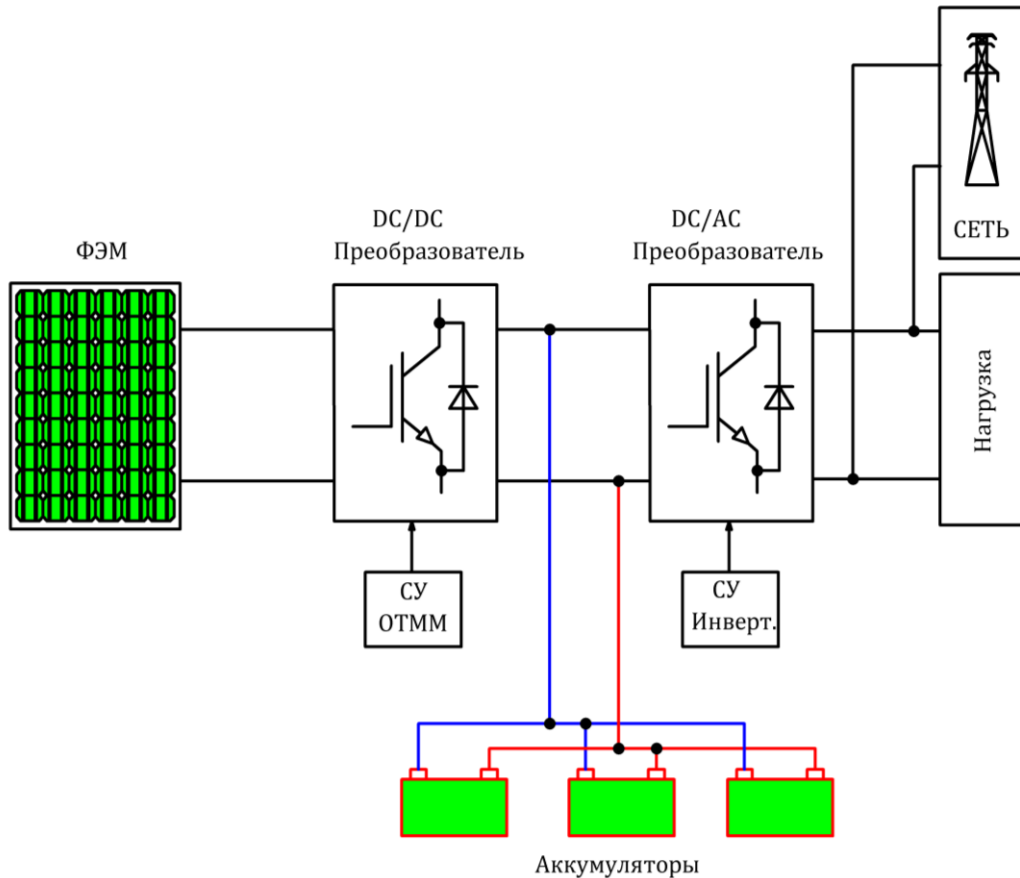


Рисунок 1.10 – Функциональная схема аккумуляторной сетевой ФЭУ

Безаккумуляторная сетевая ФЭУ

ФЭУ, изображенная на рисунке 1.11, не требует аккумуляторов и подключается к сети, что делает ее наиболее простой среди всех описанных ФЭУ.

Описываемая система состоит из ФЭМ и инвертора, который подключен к сети для генерации энергии. В отличие от систем с аккумуляторами эта система не предназначена для использования в качестве источника энергии для резерва при отключении электросети, поскольку ФЭМ не работают без подключения к сети. Несмотря на возможные ограничения, преимущества этой системы заключаются в ее высокой эффективности, низкой стоимости (за счет отсутствия

аккумуляторов и дешевых инверторов, необходимых для работы в сети) и высокой надежности.

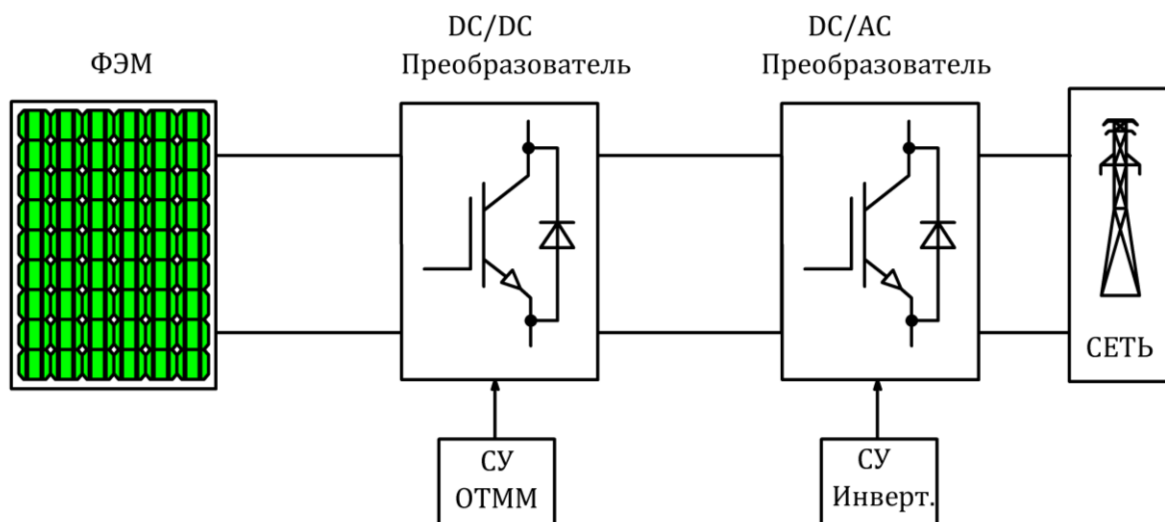


Рисунок 1.11 – Функциональная схема безаккумуляторной сетевой ФЭУ

Большие солнечные электростанции часто используют данную конфигурацию. Обычно управляющая система для таких инверторов не включает в себя функцию отслеживания точки максимальной мощности, так как реализация системы управления инвертором представляет собой более сложный процесс. Важно отметить, что ФЭУ, подключенные к энергосистеме, могут включать в себя не только инвертор, но и DC-DC преобразователь, что может упростить систему управления инвертором и позволить использовать алгоритм отслеживания ТММ.

В ходе исследования были рассмотрены наиболее распространенные конфигурации ФЭУ. Однако следует отметить, что помимо них существуют и другие конфигурации таких установок:

- простые и доступные по стоимости ФЭУ, которые состоят только из ФЭМ и преобразователя постоянного тока. Такие системы используются в случаях, когда требования к выходным характеристикам преобразователя невысоки.
- гибридные системы, которые могут использовать не только один тип возобновляемых источников электроэнергии, таких как ветрогенераторы, мини гидроэлектростанции (ГЭС) [26-30] и т.п.

Необходимо отметить, что различные типы преобразователей напряжения [31,32] могут использоваться в конфигурациях, которые были рассмотрены. Выбор преобразователя будет зависеть от специфических требований задачи и сложности ФЭУ.

1.4. Основные характеристики ФЭУ

Главной составляющей любой ФЭУ является ФЭМ, который может содержать множество ФЭ, соединенных последовательно, параллельно или параллельно-последовательно. Характеристики всех элементов, такие как вольтамперная характеристика (ВАХ) и вольт ваттная характеристика (ВВХ), зависят от уровня солнечной инсоляции, температуры окружающей среды, а также конструкционных особенностей самой ячейки.

Через ВАХ и ВВХ определяют основные параметры ФЭ (рис. 1.12).

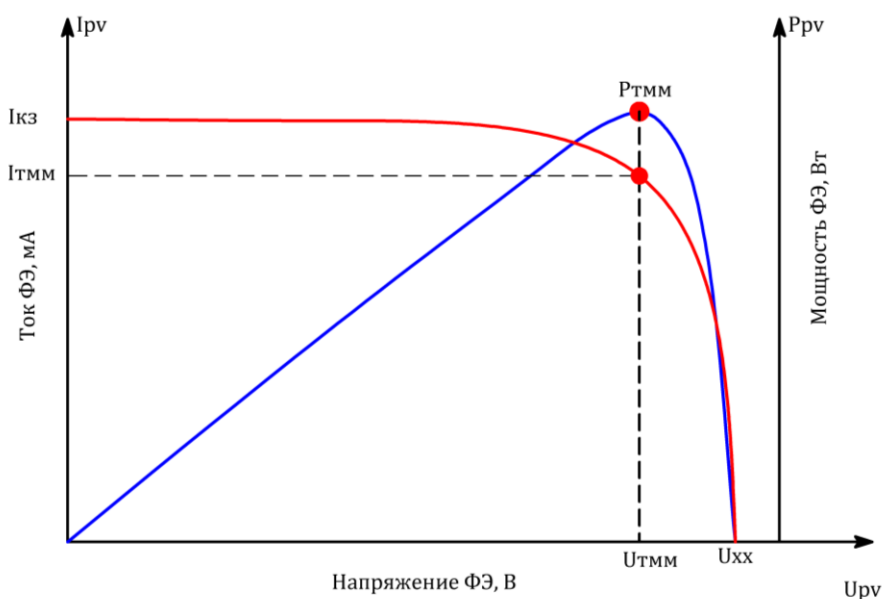


Рисунок 1.12 – ВАХ и ВВХ ФЭ

Основными параметрами ФЭ являются: ток короткого замыкания ($I_{кз}$), напряжение холостого хода ($U_{хх}$), максимальная мощность ($P_{тмм}$), рабочие ток и напряжение ($I_{тмм}$, $U_{тмм}$). На рисунке 1.13 изображена эквивалентная схема замещения ФЭ, с помощью которого создается ВАХ и ВВХ ФЭ.

ФЭ содержит источник тока, который имитирует фототок I_{ph} , возникающий при освещении, и параллельно ему расположенный диод, который

описывает ток, протекающий через неидеальный p-n-переход. Кроме того, в модель включено шунтирующее сопротивление R_{sh} , которое учитывается для отображения тока утечки, а также последовательное сопротивление R_s , которое определяет падение напряжения на выходе [33,34].

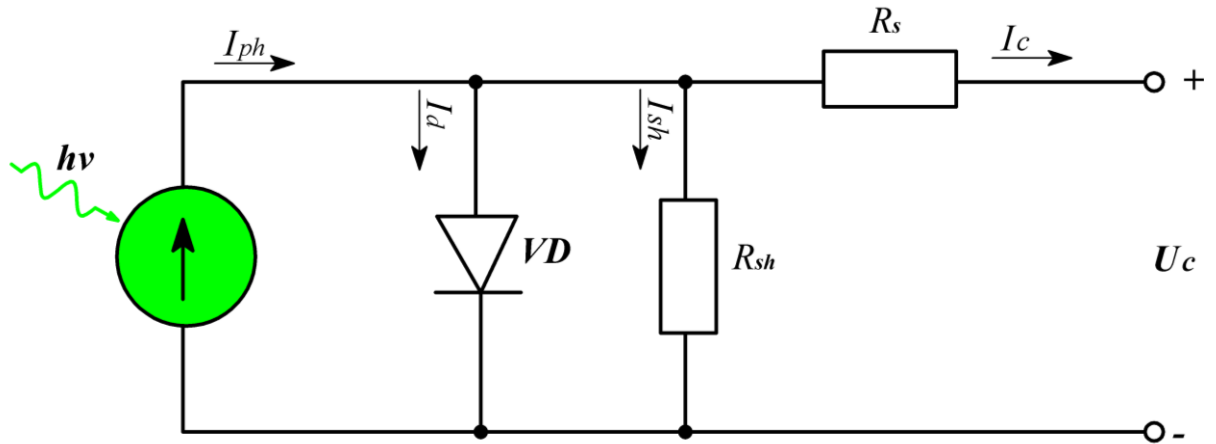


Рисунок 1.13 – Упрощенная схема замещения ФЭ

Формула для характеристического уравнения ФЭ, описывающего зависимость между током и напряжением, задается следующим образом:

$$I_c = I_{ph} - I_d \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c} (U_c + R_s I_c) \right]} - 1 \right\} - \frac{U_c + R_s I_c}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

Здесь представлены переменные, связанные с работой ФЭ:

I_{ph} – фототок;

I_d – обратный ток насыщения диода;

I_c – рабочий ток;

U_c – рабочее напряжение;

e – заряд электрона ($1,602 \times 10^{-19}$ Кл);

k – постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К);

A – диодный фактор или коэффициент идеализации;

T_c – температура окружающей среды, в градусах Кельвина;

R_s – внутреннее сопротивление солнечной ячейки, которое представляет собой сопротивление текущему току и зависит от глубины p-n перехода, примесей и сопротивлений контактов. Его измеряют в омах.

R_{sh} – шунтирующее сопротивление, которое относится к сопротивлению тока утечки в землю. Оно также измеряется в омах.

На рисунке 1.14 представлена модель ФЭ, которая более точно описывает его работу. Эта модель основана на поликристаллическом кремнии и состоит из двух параллельно включенных диодов, которые отображают протекание через р-п-переход диффузионного и рекомбинационного токов. Однако определение параметров для ВАХ ФЭ [33,34] является сложной задачей и является основным недостатком данной модели.

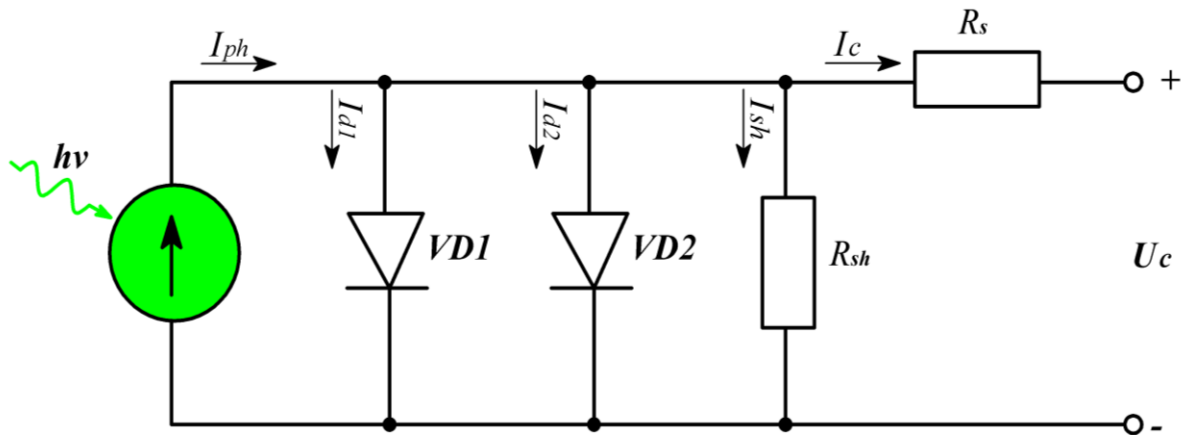


Рисунок.1.14 – Уточненная схема замещения ФЭ

Характеристическое уравнение для тока и напряжения солнечной батареи, представляющее точное математическое описание ее работы, может быть записано следующим образом:

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c} (U_c + R_s I_c) \right]} - 1 \right\} - I_{d2} \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c} (U_c + R_s I_c) \right]} - 1 \right\} - \frac{U_c + R_s I_c}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Где, I_{d1} -ток насыщения первого диода

I_{d2} -ток насыщения второго диода

Использование каждой схемы замещения имеет свои плюсы и минусы. Если выбрать более сложную математическую модель, то нужно будет провести больше вычислений, и возникают большие трудности при определении ВАХ. В связи с этим при имитационном моделировании большинство исследователей отдадут предпочтение более простой схеме замещения [33,34,39,73,74].

1.5. Эффективность ФЭУ

Энергетическая эффективность — это оценка полезного воздействия, полученного от использования энергетических ресурсов, по отношению к

затратам энергии, которые были использованы для получения такого эффекта. При оценке эффективности ФЭУ можно учитывать различные параметры, отражающие его энергетические характеристики.

1. КПД ФЭ. Согласно определению, КПД ФЭ — это отношение мощности, производимой ФЭ на подключенной нагрузке, к мощности светового потока, падающего на него.

$$\eta = \frac{U_{\Phi} I_{\Phi}}{S} \quad (1.3)$$

2. Коэффициент использования ФЭ k_{Φ} — это соотношение между фактически потребляемой мощностью от ФЭ и мощностью максимальной точки ВВХ, как показано на рисунке 1.12.

$$k_{\Phi} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{МАХ}}} = \frac{U_{\Phi} I_{\Phi}}{U_{\text{МРР}} I_{\text{МРР}}} \quad (1.4)$$

Данные показатели предоставляют возможность оценить результаты, полученные при использовании определенных подходов для улучшения энергоэффективности ФЭУ.

Существуют много способов повышения эффективности ФЭ. Одним из способов является уменьшение количества полупроводниковых примесей и деформаций кристаллической структуры. Этого можно достичь за счет производства монокристаллических элементов. Более чистая и однородная клетка имеет больше шансов взаимодействовать с поступающими фотонами [35]. Другой метод заключается в использовании более эффективного полупроводникового материала, такого как арсенид галлия. Хотя арсенид галлия гораздо более редкий и дорогой, чем кремний, его оптимальная ширина запрещенной зоны составляет 1,4 электрон-вольта, что позволяет использовать более высокий процент солнечной энергии. Несколько слоев полупроводникового материала, называемых р-п переходами, также могут использоваться для повышения эффективности ячейки. Эти многопереходные ячейки используют энергию нескольких участков солнечного спектра, поскольку каждое соединение имеет разную ширину запрещенной зоны [35]. Все выше-

перечисленные способы сопряжены повышенной стоимостью, поэтому в настоящее время применяются методы повышения эффективности ФЭУ путем изменения конструкции и внедрения современных систем управления.

В настоящее время для увеличения энергоэффективности ФЭУ существует несколько наиболее эффективных методов:

1. Метод экстремального регулирования мощности (ЭРМ). Реализация режима отбора мощности в оптимальной точке работы ВВХ [36 - 38].
2. Применение солнечных трекеров, которые обеспечивают непрерывное автоматическое наведение ФЭМ на Солнце [40-44].
3. Изменение конструкции ФЭМ с целью уменьшения нагрева ФЭ.
4. Для более эффективного «сбора» солнечного излучения на солнечные модули устанавливаются специальные устройства-концентраторы.
5. Применение современных систем управления для DC/DC и DC/AC преобразователей ФЭУ [45-50].

Известно, что температура окружающей среды и уровень СИ являются

основными факторами, влияющими на характеристики ФЭМ (рис 1.15). Влияние этих факторов приводит к смещению ТММ, в результате чего теряется часть мощности ФЭМ. Чтобы получить максимум мощности от ФЭМ, необходимо использовать подходящий алгоритм для слежения ТММ.

Характеристики ФЭМ зависят от разных погодных условий, таких как освещенность и температура, и поэтому могут меняться в течение дня. Из-за этих изменений точка максимальной мощности может смещаться, и ФЭМ может потерять часть своей мощности (см. рисунок 1.15). Для максимизации получения мощности от солнечного преобразователя необходимо использовать подходящий алгоритм отслеживания точки максимальной мощности.

Процесс поиска ТММ и максимизации выходной мощности ФЭМ выполняется специальными регуляторами, которые используют один из нескольких алгоритмов. В настоящее время существуют следующие методы, на основе которых строятся алгоритмы поиска ТММ;

- метод возмущения и наблюдения (P&O)
- метод возрастающей проводимости (InC)
- метод постоянного напряжения
- метод токовой развертки
- метод на основе искусственных нейронных сетей

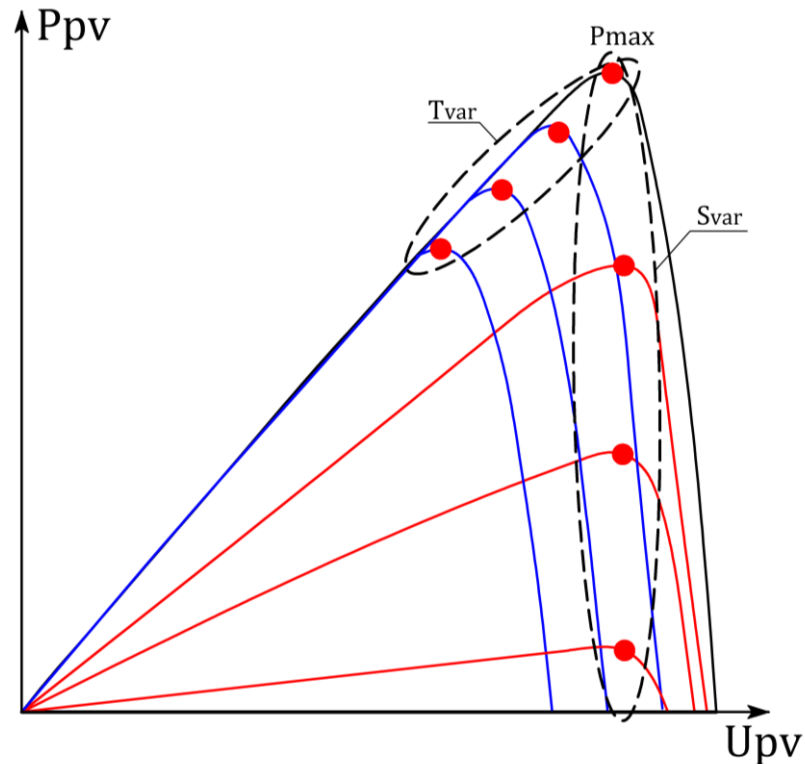


Рисунок 1.15 – ВВХ ФЭМ при различных значениях освещенности и температуры.

Анализ статей [45 - 50] показывает, что максимальная эффективность ФЭУ достигается путем регулирования выходного напряжения посредством импульсных преобразователей постоянного тока. Такой метод позволяет получить максимум выходной мощности от ФЭУ.

Таким образом, проектирование соответствующей системы управления с помощью программируемых контроллеров является одним из основных направлений повышения энергетической эффективности ФЭУ.

1.6. Анализ современных систем управления слежения за ТММ ФЭУ

Основным компонентом, участвующим в повышении энергетической эффективности ФЭУ), является импульсный преобразователь постоянного тока

(DC/DC- преобразователь). Функциональная схема ФЭУ с DC/DC-преобразователем представлена на рисунке 1.16. Посредством DC/DC-преобразователя можно изменять выходную мощность ФЭУ путем изменения выходного напряжения и тока.

На рисунке 1.12 можно заметить присутствие ФЭМ экстремума мощности у ВВХ, который обеспечивает максимальный сбор энергии. Целью повышения эффективности ФЭУ является нахождение тока и напряжения, комбинация которых выдает максимум мощности ФЭМ.

Поскольку ВВХ ФЭМ меняется в зависимости от погодных условий (изменение уровня СИ и температуры окружающей среды, угол падения СИ) усложняют эту задачу (рис.1.15). Анализ рисунка 1.15 показывает, что при изменении внешних условий ВВХ ФЭМ меняется, что приводит к постепенному смещению ТММ. Скорость этого смещения может достигать около 0,03 В/с [37,38]. В связи с этим разработчики сталкиваются с задачей отслеживания этой точки с целью максимизации производимой энергии ФЭМ.

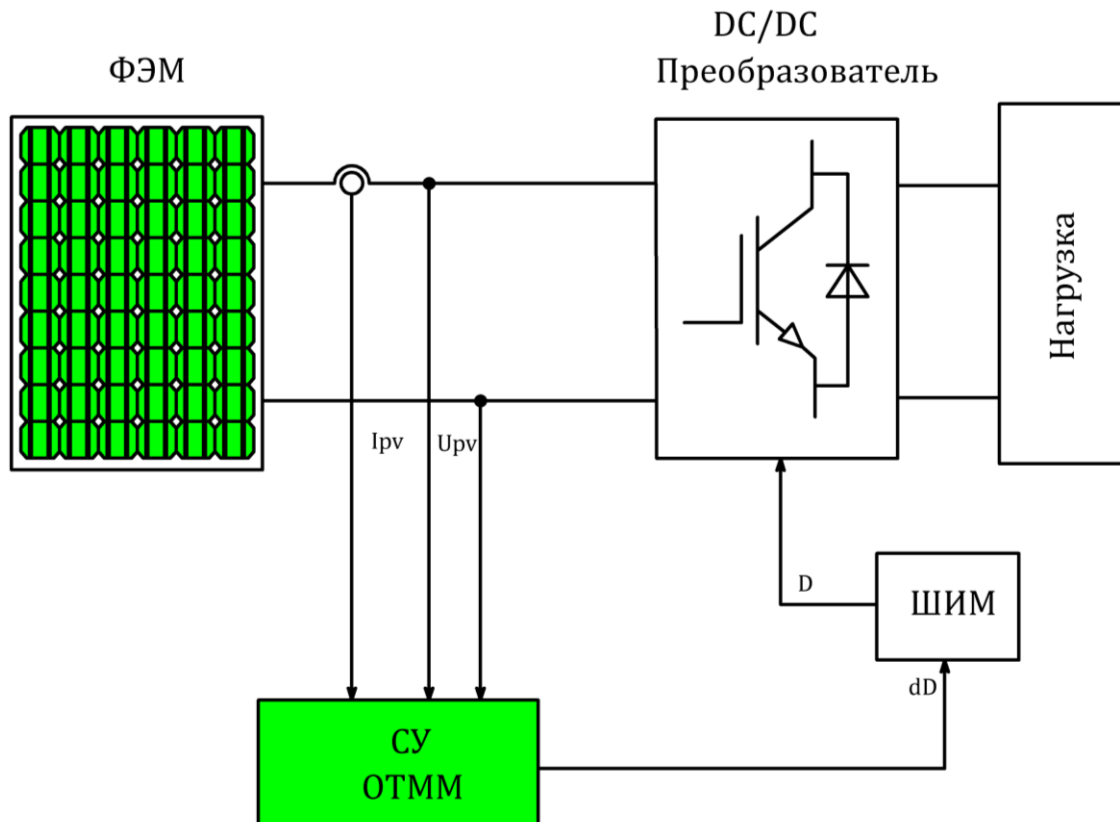


Рисунок 1.16 – Функциональная схема ФЭУ с DC/DC- преобразователем.

Энергетическая эффективность ФЭУ является важным показателем и определяется тем, насколько эффективно они преобразуют солнечную энергию в электрическую. В данном случае, статьи [40-44] показывают, что при использовании метода слежения максимальной мощности с помощью трекеров энергетическая эффективность может достигать до 30%.

Существует несколько способов поиска ТММ ФЭУ. Например, в статье [51] описывается метод токовой развёртки, основанный на использовании сигнала развёртки для тока ФЭУ. Этот метод позволяет периодически обновлять вольтамперную характеристику (ВАХ) с постоянной частотой. Напряжение в ТММ вычисляется на основе ВАХ. В работе [52] рассматривается применение метода возрастающей проводимости для оценки эффекта изменения напряжения в ФЭУ. Для этого регулятор фиксирует изменения тока и напряжения, что позволяет нам получить предварительную оценку влияния этих изменений. В статье [53] рассмотрен метод постоянного напряжения, известный также как метод холостого хода напряжения. Суть данного метода заключается в регулировании выходного напряжения постоянным значением. Одна особенность метода постоянного напряжения заключается в том, что он не учитывает изменения входных параметров, таких как температура и освещенность, которые могут влиять на выходное напряжение. Это может привести к большой погрешности на больших расстояниях. Например, на ФЭУ, работающих на методе постоянного напряжения, температурные изменения могут значительно влиять на выходную мощность. При повышении температуры батареи ее эффективность может снижаться, что приводит к снижению выходного напряжения. Точно так же изменения освещенности могут вызывать колебания в выходном напряжении. Более популярным методом является метод «возмущения и наблюдения», который был широко использован [37, 45, 52, 54, 55]. В этом методе устройство слежения за ТММ итеративно изменяет напряжение на ФЭМ для изменения мощности. Путем оценки изменения мощности регулятор определяет направление поиска точки экстремума ВВХ. Однако этот метод имеет недостатки - колебания мощности и длительное время

регулирования. Колебания мощности возникают из-за итеративного изменения напряжения на ФЭУ. Из-за таких изменений мощности регулятор может совершать перепрыгивания экстремумов, что приводит к колебаниям и нестабильности работы устройства. Длительное время регулирования происходит из-за итеративности метода. Каждое изменение напряжения требует некоторого времени для измерения и оценки мощности, чтобы определить направление поиска точки экстремума. Таким образом, достижение оптимального значения может занять длительное время. Для решения этих проблем предлагается использовать модифицированного алгоритма «возмущения и наблюдения».

1.6.1. Метод возмущения и наблюдения

В зарубежной литературе метод «возмущения и наблюдения» известен как Perturb and Observe (P&O).

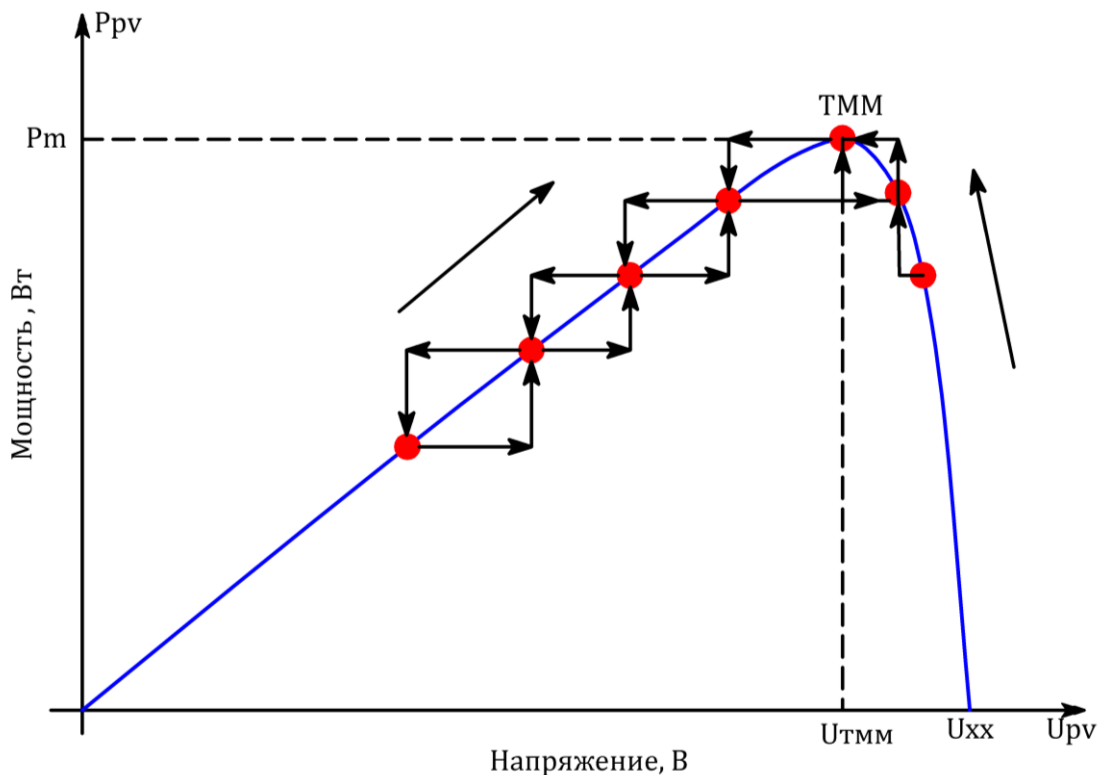


Рисунок 1.17 – Работа алгоритма P&O

Метод P&O MPPT широко используется благодаря своей простоте, легкости реализации, меньшему количеству требований к датчикам и низким затратам. Этот метод работает по принципу незначительного изменения

напряжения ФЭУ и отслеживает результирующее влияние на мощность. Это достигается за счет изменения рабочего цикла DC/DC преобразователя, используемого в системе. С помощью этих возмущений можно определить изменение мощности. Если мощность увеличивается за счет увеличения напряжения, рабочая точка ФЭМ находится на левой стороне кривой ВВХ (рис.1.17). Если, с другой стороны, мощность снижается с увеличением напряжения, рабочая точка ФЭМ находится на правой стороне кривой ВВХ.

При работе по заданному алгоритму P&O преобразователь изменяет свою скважность и повторяет этот процесс до достижения ТММ. Фактически система колеблется вокруг этой точки.

Чтобы уменьшать колебания и повысить точность отслеживания ТММ уменьшается шаг возмущения, но это может негативно сказываться на эффективности слежения, поскольку замедляется процесс слежения. Наоборот, повышение шага возмущения приводит к «перепрыгиванию» ТММ ФЭМ, в результате чего снижается эффективность слежения ТММ (рис. 1.18).

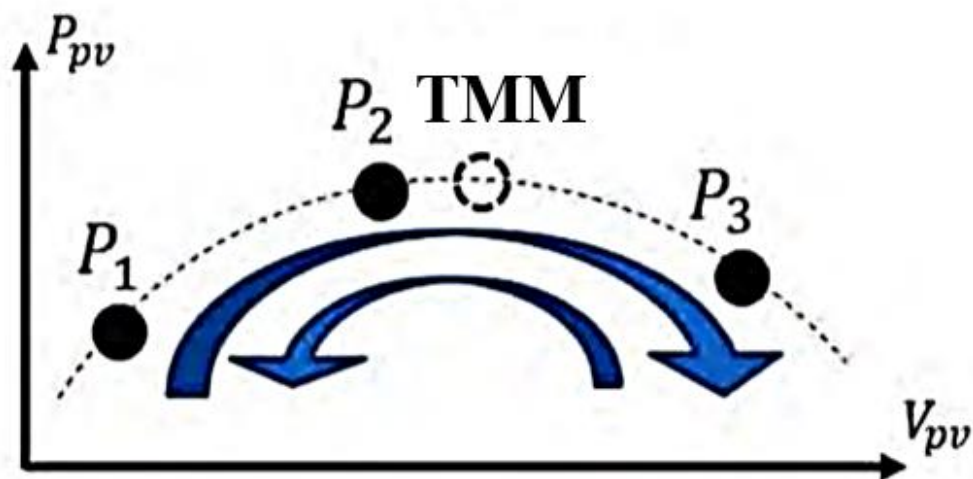


Рисунок 1.18 – Траектория движения вблизи точки максимальной мощности

В статье [56] провели экспериментальные и теоретические исследования, чтобы определить оптимальные значения двух основных параметров алгоритма P&O (рис. 1.19). Авторы статьи предполагали, что оптимизация этих параметров поможет повысить производительность алгоритма. Однако в реальности даже при оптимальных значениях параметров алгоритм P&O продолжает иметь основные проблемы, которые не удастся решить. Проблемы заключаются в том,

что параметры остаются фиксированными, и приходится выбирать между точностью отслеживания и скоростью работы, т.е. по мере уменьшения шага возмущения время отслеживания увеличивается.

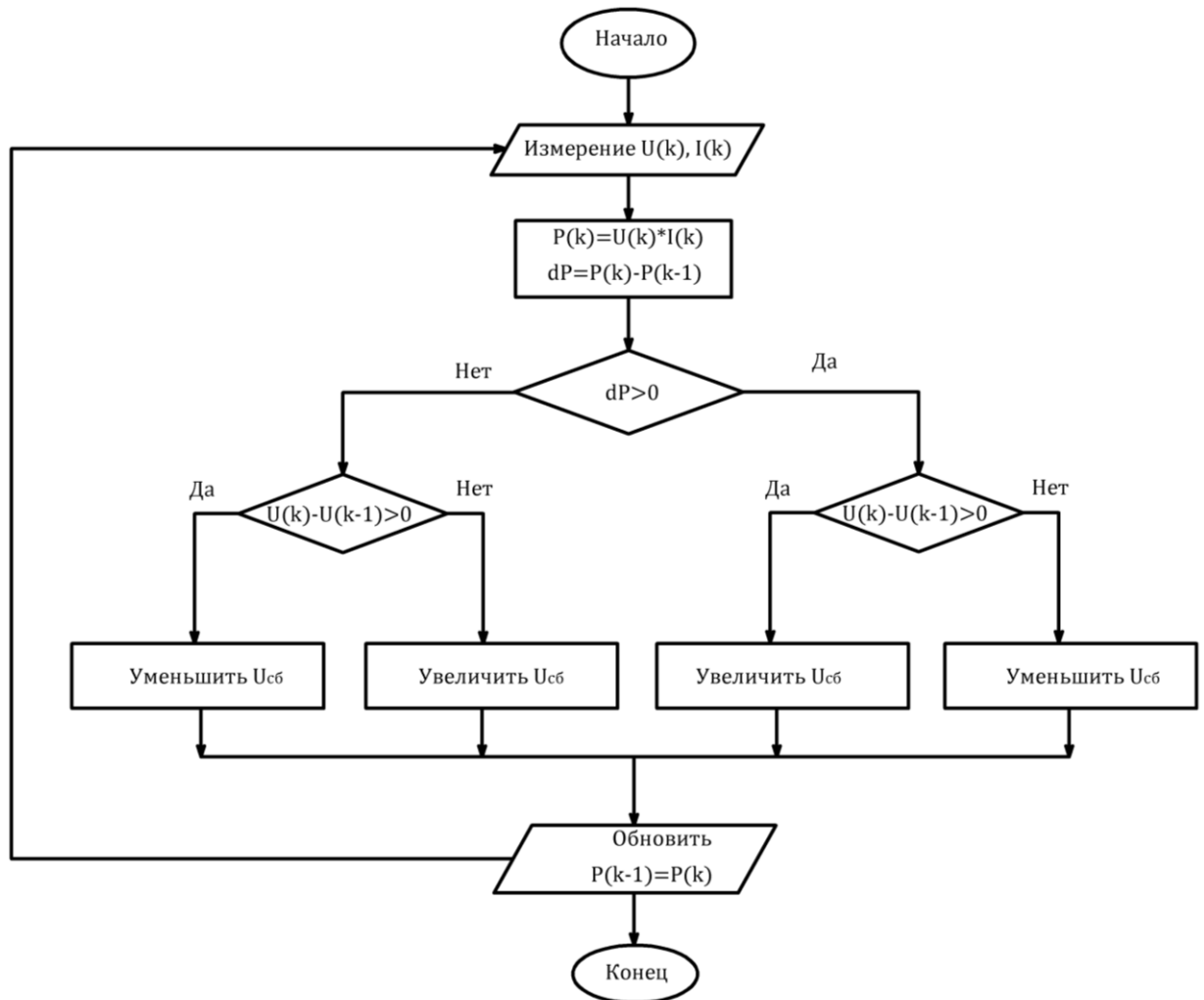


Рисунок 1.19 – Блок схема алгоритма P&O

Одним из методов модификации алгоритма P&O является применение нечёткой логики [57,58]. Основная идея заключается в использовании переменного шага возмущения в зависимости от рабочей точки. Коэффициент на выходе нечёткого регулятора увеличивается в процессе поиска ТММ и уменьшится, когда находится ТММ. В статье [58] рассматривается модифицированный метод алгоритма P&O, в котором используется динамическое изменение размера возмущения. В то же время вводится динамическое граничное условие, гарантирующее, что алгоритм не будет отклоняться от максимума отслеживания.

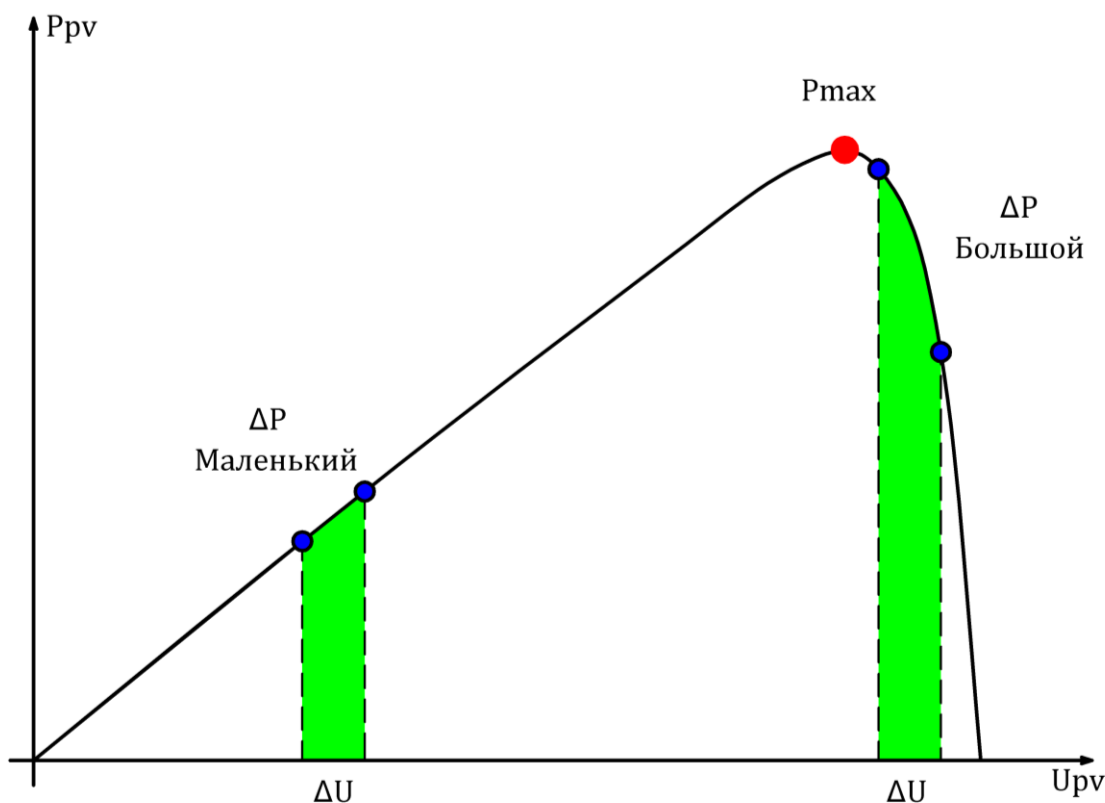


Рисунок 1.20 – Работа модифицированного алгоритма P&O на основе нечеткой логики

Предложенный алгоритм, описанный в [58], основан на применении адаптивного нечеткого логического регулятора. Его особенностью является применение нечеткого логического регулятора с адаптивным изменением переменного шага распределения функций принадлежности. Для распределения функций принадлежности используется нелинейная несимметричная ВВХ, которая представлена на рисунке 1.20.

На рисунке 1.21 представлена блок-схема адаптивного алгоритма P&O с переменным шагом. Слева показан обычный алгоритм P&O, а справа - адаптивный нечеткий алгоритм P&O, который был разработан в данном исследовании и включает новый нечеткий вывод.

В статье [59] авторами предлагается решение колебания мощности вокруг ТММ адаптивным методом отслеживания, который имеет следующие преимущества:

1. Адаптивный алгоритм автоматически регулирует возмущение, исходя из изменений в системе.

2. Метод простой в реализации, так как требуется только использование PI-регулятора.

3. При использовании метода не возникают колебания во время отслеживания и стационарной работы.

4. Метод требует невысокой вычислительной нагрузки, что позволяет использовать недорогие регуляторы для быстрого отслеживания.

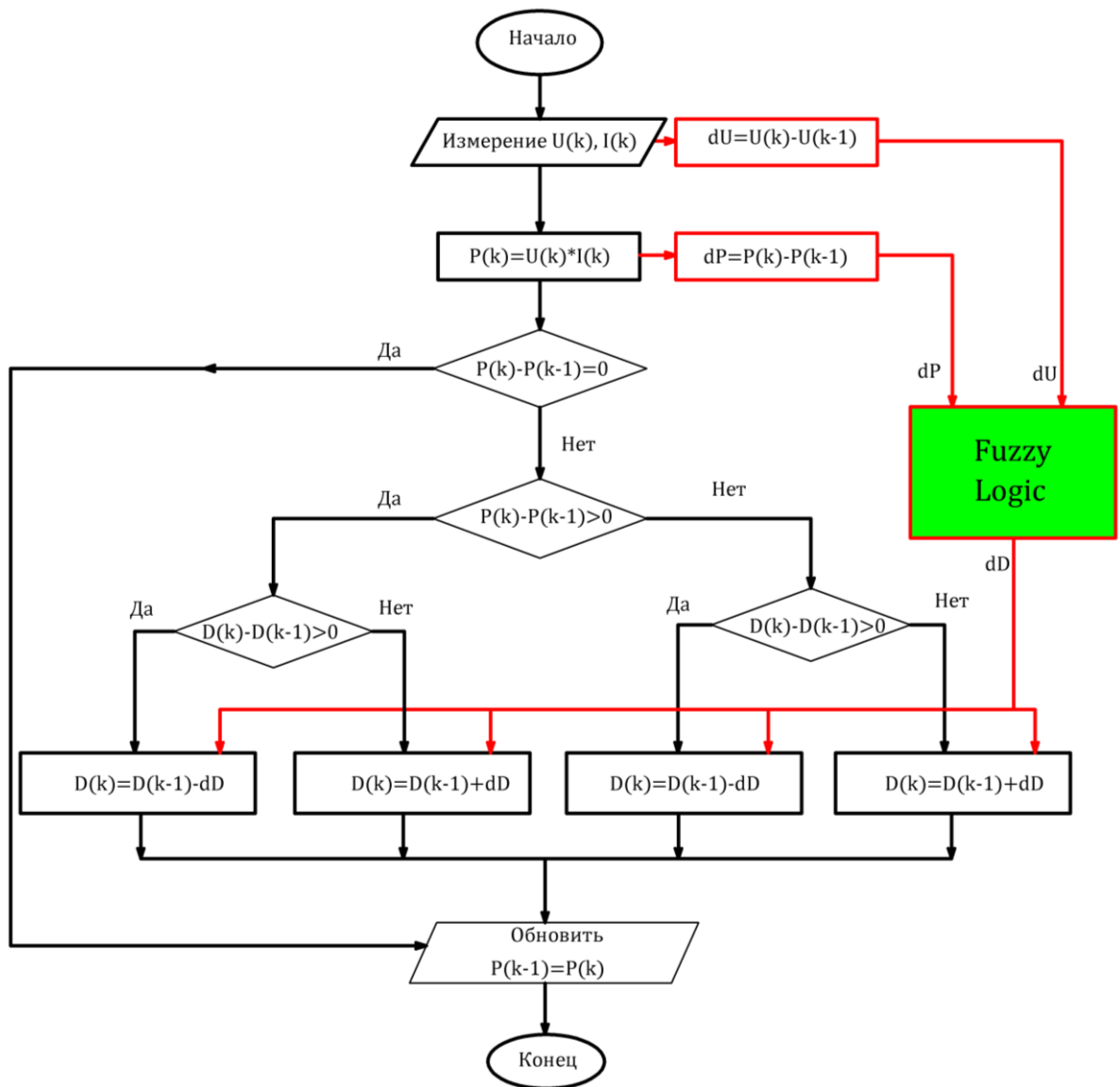


Рисунок 1.21 – Модифицированный алгоритм P&O на основе нечеткой логики

Целью применения PI-регулятора в данном случае являются предотвращение перерегулирования при запуске, избежание стационарных колебаний и достижение минимальной ошибки в устойчивом состоянии. Pi-регулятор адаптируется к изменениям в процессе и регулирует значение возмущений на основе текущей ошибки, что позволяет уменьшить ошибку в

замкнутой системе и достичь требуемой стабильности и точности управления.

Достоинство метода позволяет снизить вычислительную нагрузку, так как не требует хранения заранее заданных констант. Он основывается на измерениях напряжения и тока и адаптивно выбирает шаг возмущения, что делает его более эффективным и гибким. За счет этого он является популярным методом управления солнечными батареями.

1.6.2. Метод возрастающей проводимости

Данный метод представляет собой улучшенную версию алгоритма Р&О и позволяет отслеживать ТММ ФЭУ в быстро меняющейся среде [52]. В зарубежной литературе метод упоминается под названием Incremental Conductance (InC). Принципиальный факт этого метода основан на вычислении наклона мощности $\frac{dP}{dU}$ на кривой ВВХ, т.к. на ТММ $\frac{dP}{dU} = 0$ (рис. 1.22). Поскольку мгновенная мощность определяется как произведение мгновенного напряжения и тока, наклон мощности определяется следующим образом:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(I \times U)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (1.5)$$

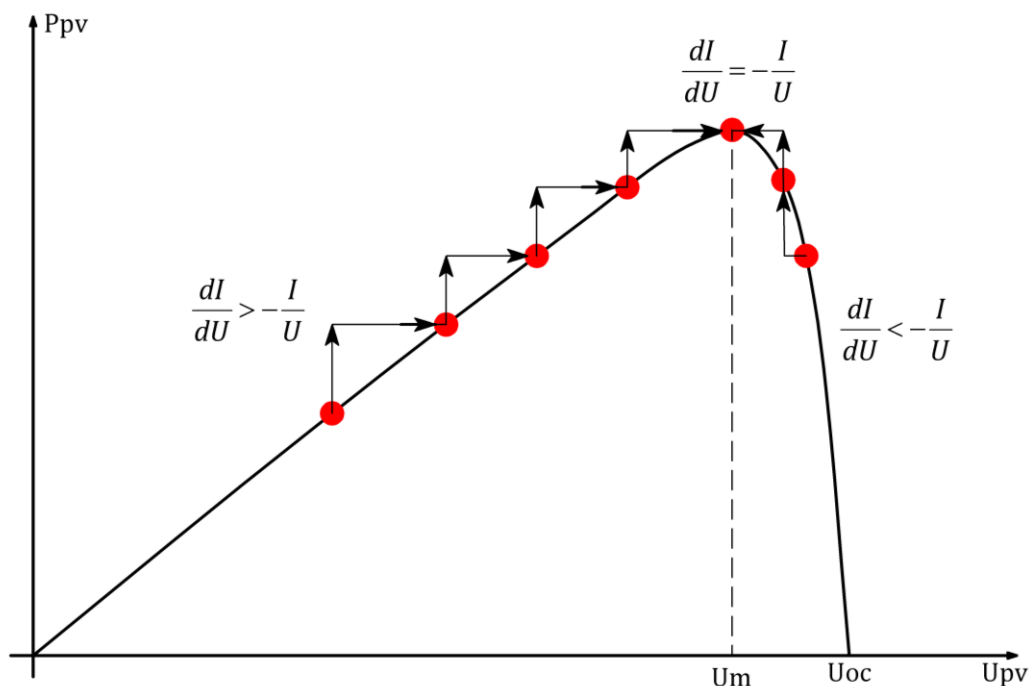


Рисунок 1.22 – К работе алгоритма возрастающей проводимости.

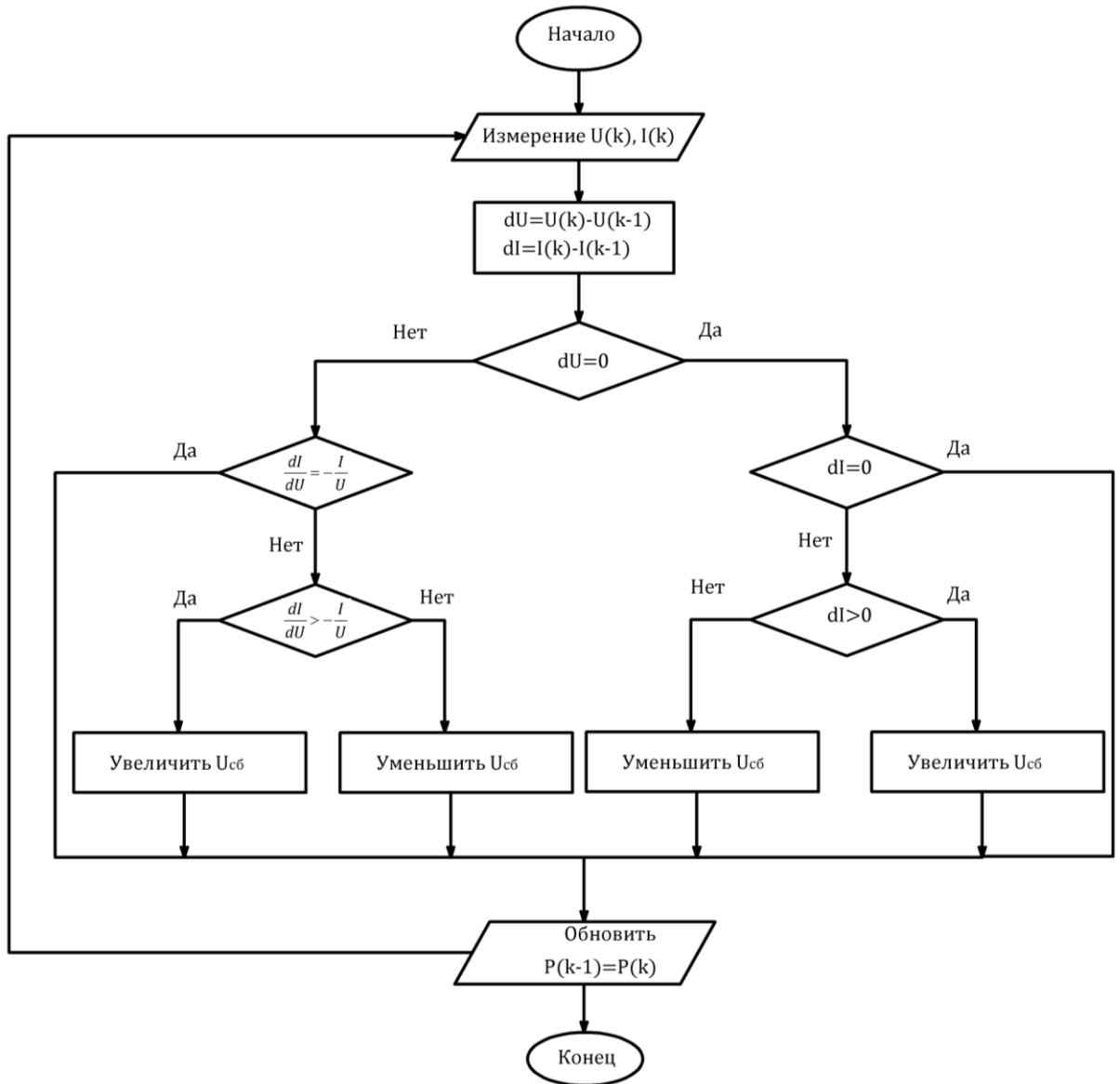


Рисунок 1.23 – Блок схема алгоритма возрастающей проводимости
Условие экстремума

$$\frac{dP}{dU} = 0 \quad (1.6)$$

Тогда

$$I + U \frac{dI}{dU} = 0 \rightarrow \frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (1.7)$$

Из уравнения (1.7) можно вывести следующие условия.

1. Если

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \rightarrow \frac{dP}{dU} = 0$$

То рабочая точка находится на ТММ.

2. Если

$$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U} \rightarrow \frac{dP}{dU} < 0$$

То рабочая точка находится справа от ТММ.

3. Если

$$\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U} \rightarrow \frac{dP}{dU} > 0$$

То рабочая точка находится слева от ТММ.

1.6.3. Метод токовой развертки

В данном методе регулятор использует сигнал о развертке тока от ФЭМ для построения ВАХ с определенной периодичностью [60]. Далее, с использованием этой периодичности, определяется напряжение, при котором достигается максимальная мощность. Функция для задания формы развертки тока пропорциональна производной этой функции.

$$f(t) = k_4 \frac{df(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Где k_4 – пропорциональная постоянная.

Мощность ФЭУ определяется следующим образом;

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (1.9)$$

Уравнение для ТММ

$$\frac{dP(t)}{dt} = U(t) \frac{df(t)}{dt} + f(t) \frac{dU(t)}{dt} = 0 \quad (1.10)$$

Из уравнений (1.8) и (1.10) получим

$$\frac{dP(t)}{dt} = \left[U(t) + k_4 \frac{dU(t)}{dt} \right] \cdot \frac{df(t)}{dt} = 0 \quad (1.11)$$

Решая дифференциальное уравнение (1.11), получим

$$f(t) = C \cdot \exp\left(\frac{t}{k_4}\right) \quad (1.12)$$

Для выбора коэффициента C используется максимальный ток ФЭМ I_{max} . Коэффициент k_4 выбирается со знаком минус, чтобы уменьшить экспоненту. C

учетом функции с постоянной времени $\tau = -k_4$ в уравнении (1.12) получаем следующее выражение:

$$f(t) = I_{max} \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \quad (1.13)$$

В уравнении (1.13) ток можно получить использованием уравнения разряда конденсатора. Так как производная (1.14) отличается от нуля, (1.11) можно разделить на $\frac{df(t)}{dt}$ и с подстановкой $f(t) = I(t)$ упростить до

$$\frac{dP(t)}{dI(t)} = U(t) + k_4 \frac{dU(t)}{t} = 0 \quad (1.14)$$

После определения напряжения, при котором достигается максимальная мощность, данный результат можно использовать как опорное значение для последующих итераций.

1.6.4. Метод постоянного напряжения

В данном методе регулировки напряжения на выходе используется постоянное значение. Этот метод позволяет определить рабочее напряжение ФЭМ путем измерения напряжения холостого хода и добавления постоянного коэффициента.

Этот коэффициент может быть определен как эмпирически, так и с помощью математического моделирования для конкретных условий эксплуатации.

$$U_{MPP} \approx k_1 \cdot U_{x.x.} \quad (1.15)$$

Напряжение холостого хода – это напряжение, которое выделяется ФЭМ при отключенной нагрузке. Добавление постоянного коэффициента компенсирует потери напряжения, которые возникают во время работы модулей при подключенной нагрузке. Таким образом, этот метод позволяет определить рабочий уровень напряжения, необходимый для работы ФЭМ с определенной нагрузкой.

Сегодня метод поддержания постоянного напряжения редко используется в качестве самостоятельного метода, однако он широко применяется в качестве дополнительного режима совместно с другими методами [53].

1.6.5. Интеллектуальные методы управления

В связи с выявленными проблемами классических методов и их модификаций исследователи переключили свое внимание на более инновационные подходы, такие как нечеткая логика [46,49,57,58] искусственные нейронные сети (ИНС) [45,47,62,63,64] и гибридные методы, совмещающие в себе как классические, так и интеллектуальные методы

ИНС — это вычислительная система, имитирующая принцип работы нейронов в человеческом мозге. В современном мире ИНС широко распространены и успешно используются в различных областях, включая отслеживание ТММ ФЭУ.

В работе [45] разработан регулятор, использующий нейронную сеть (ИНС) для отслеживания ТММ ФЭУ при переменных погодных условиях. ИНС имеет трехслойную структуру и использует рабочую температуру ФЭМ и уровень освещения в качестве входных параметров, а максимальные значения тока и напряжения - в качестве выходных параметров. Сигналы затем передаются в блок управления, который регулирует управляющий преобразователь сигнала, обеспечивая передачу максимальной мощности в нагрузку. Таким образом, регулятор отслеживания ТММ на основе ИНС эффективно использует солнечную энергию, извлекая максимальную мощность из ФЭУ в любых погодных условиях.

В своей работе [63] авторы исследуют применение нейронных сетей для определения оптимального напряжения ТММ при различных атмосферных условиях. Для этого они используют однослойную искусственную нейронную сеть, которая представлена на рисунке 1.24. Эта модель может быть обучена на основе собранных данных о производительности солнечной электростанции при различных уровнях напряжения. Затем нейронная сеть может использоваться для предсказания оптимального напряжения ТММ в зависимости от текущих атмосферных условий. Результаты эксперимента показали, что данная модель позволяет эффективно достичь ТММ.

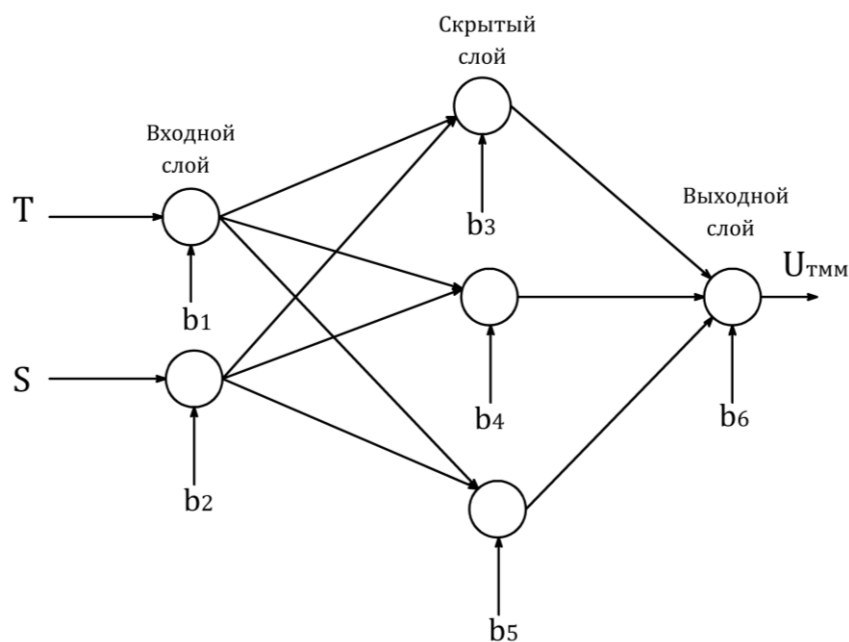


Рисунок 1.24 – Структура искусственной нейронной сети

Для проведения теоретического анализа, описанного в статье, были приняты данные о температуре (Т) и СИ (S) ФЭМ на входе системы. На выходе модельного исследования автономной ФЭУ получено напряжение в ТММ ($U_{ТММ}$). Для наглядности проведенного исследования приведен на рисунке 1.25.

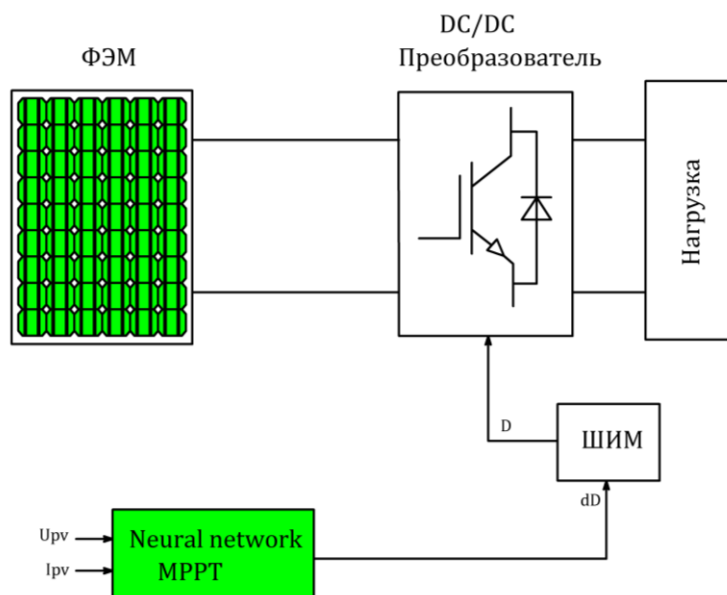


Рисунок 1.25 – Функциональная схема ФЭУ с ИНС

На рисунках 1.26 и 1.27 изображены графики выходного напряжения и тока, соответствующие различным температурам и уровням освещенности в ФЭУ. Система управления обеспечивает выход нейронной сети с точкой максимальной мощности. Путем сравнения характеристик тока и напряжения,

полученных из ФЭМ, с выходными значениями, получаемыми системой управления от ИНС, можно сделать вывод о хороших динамических характеристиках системы управления.

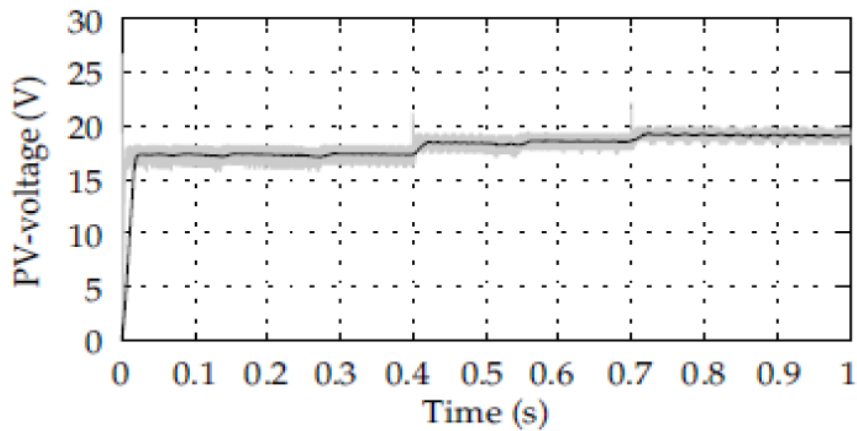


Рисунок 1.26 – Выходное напряжение ФЭУ с ИНС

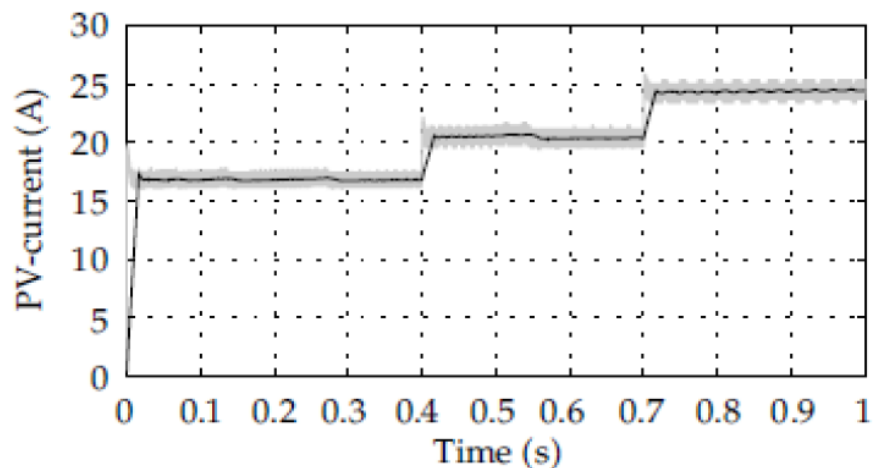


Рисунок 1.27 – Выходной ток ФЭУ с ИНС

Применение ИНС для слежения за ТММ является одним из современных и точных методов повышения эффективности ФЭУ. Недостатком данной системы является большое количество объемов экспериментальных данных для обучения ИНС.

Алгоритм отслеживания ТММ нечетким регулятором — Метод слежения за ТММ с применением нечеткого регулятора основан на использовании нечеткой логики и теории нечетких множеств. Этот подход позволяет настраивать шаг изменения напряжения в соответствии с оценкой входных параметров и определенными правилами нечеткого регулятора (рис. 1.28).

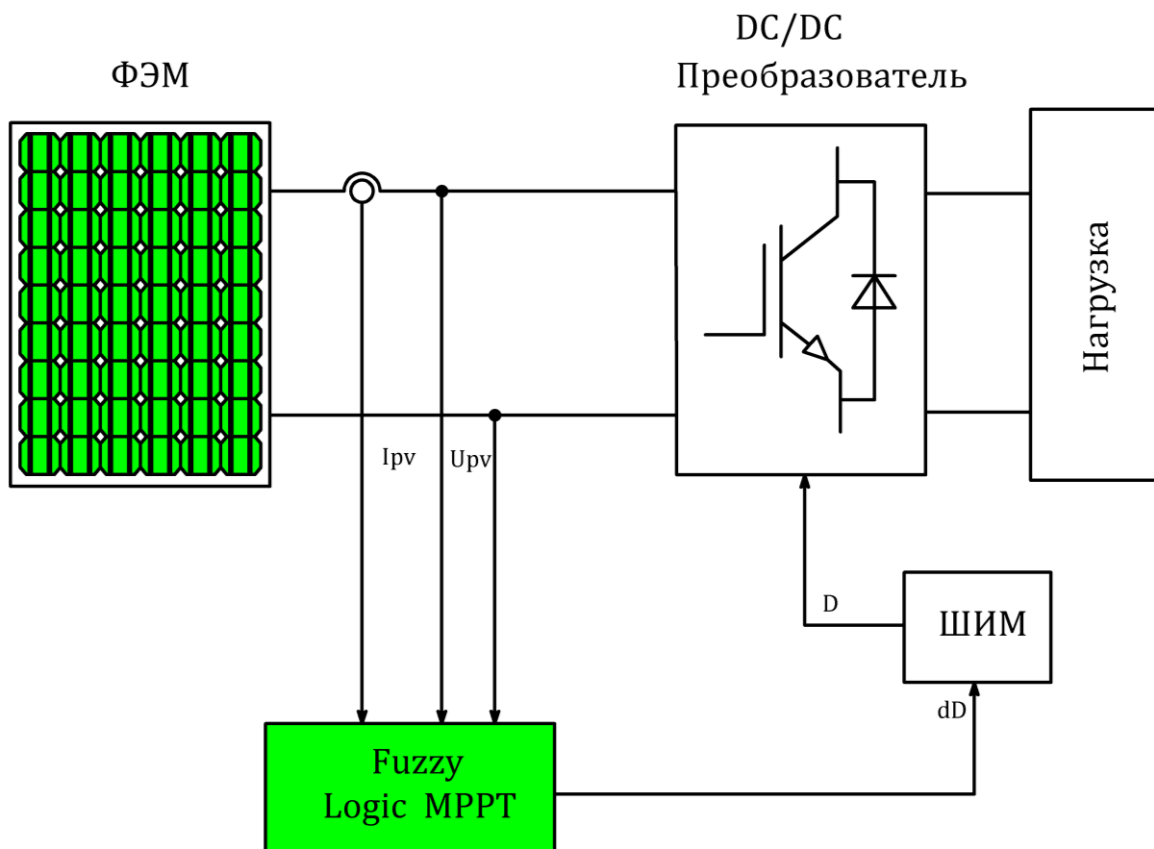


Рисунок 1.28 – Функциональная схема ФЭУ с регулятором нечеткой логики

Математическая теория нечетких множеств является формальной системой для описания нечетких понятий и знаний, а также обеспечивает возможность выполнения операций и осуществления нечетких выводов. В научных исследованиях было показано, что использование нечеткой логики для управления системами (нечеткое управление) приводит к лучшим результатам, чем получаемые с использованием традиционных алгоритмов управления.

В обобщенном виде регулятор нечеткой логики представлен на рисунке 1.29. Разработка системы управления ФЭУ, основанной на нечеткой логике, предлагает множество преимуществ, таких как высокая эффективность поиска оптимальных решений при различных условиях. Однако особое значение при реализации такой системы приобретает синтез функции принадлежности нечеткой логики. В большинстве случаев разработчики регуляторов нечеткой логики применяют традиционные методы проб и ошибок для синтеза функции принадлежности управления. В связи с этим проблемы внедрения методов нечеткой логики для слежения за ТММ ФЭУ являются актуальными, а научная

и практическая значимость вопросов, связанных с разработкой методик расчета параметров и синтеза алгоритмов нечеткой логики, не вызывает сомнений.

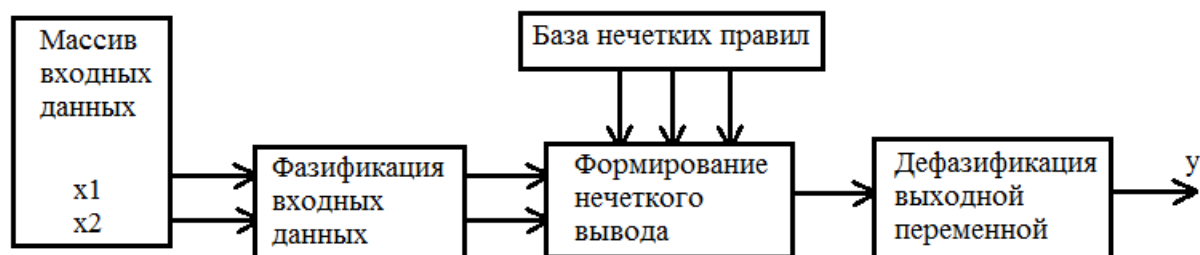


Рисунок 1.29 – Функциональная схема регулятора нечеткой логики

Выводы и результаты по первой главе

В данной главе рассматриваются состояние и перспективы развития мировой солнечной энергетики на рынке возобновляемой энергетики. Анализируются лидирующие позиции в генерации электроэнергии и освещаются текущие конфигурации ФЭУ. Также рассмотрены возможные способы повышения эффективности ФЭУ в целом. Для улучшения энергетической эффективности генерации в ФЭУ эффективным способом является использование алгоритма отслеживания ТММ. После проведения сравнительного анализа стало очевидным, что сложность алгоритма является ключевым параметром, влияющим на общую производительность системы при реализации алгоритмов отслеживания. Классические методы сталкиваются с трудностями при динамическом изменении условий окружающей среды. По этой причине надежнее работать с интеллектуальными методами, такими как нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Они могут эффективно применяться в данной ситуации.

Использование интеллектуальных методов позволяет практически исключить колебания в ТММ, что приводит к повышению эффективности системы. Однако разработка алгоритмов на основе метода нечеткой логики является более сложной задачей и требует дополнительных знаний, а также может потребовать установки дополнительных датчиков. Кроме того, для работы интеллектуальных алгоритмов необходима более мощная вычислительная система.

Вопреки несомненным достоинствам в точности и безошибочной работе при динамично изменяющихся условиях такие алгоритмы ограничены своей сложностью применения и разработки, развивались в меньшей степени. Однако они обладают большим потенциалом для дальнейшего развития и применения в различных сферах.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЭУ

2.1. Моделирование элементов ФЭУ

Создание новых эффективных ФЭУ является одной из актуальных задач развития солнечной энергетики. В связи с этим оценка эффективности их работы является достаточно важной. Необходимо иметь возможность определять выходные зависимости ФЭУ под действием разнообразных факторов окружающей среды, сравнивать эффективность использования ФЭУ из различных материалов, оценивать их поведение в различных режимах работы.

Определение поведения и воспроизведения характеристик ФЭУ осуществляется с помощью моделирования. По сравнению с экспериментом математическое моделирование представляет более быстрый, гибкий и дешевый способ отработки ФЭУ. Для воспроизведения характеристик ФЭУ чаще всего используются аналитические модели, которые строятся на базе эквивалентной электрической схемы и основного уравнения ФЭУ. Работы по моделированию характеристик ФЭУ активно ведутся за рубежом, результаты исследований рассматриваются на международных научно-технических конференциях [33,34,65,66]. Вследствие перспективности внедрения солнечной энергетики вопрос моделирования ФЭУ интересует и отечественных исследователей.

Математическое моделирование основных компонентов ФЭУ производится на основе рисунка 2.1. Рисунок 2.1 представляет собой обобщенную функциональную схему ФЭУ, которая была построена на основе сравнительного анализа возможных функциональных схем ФЭУ, представленных на рисунках 1.8-1.11. Эта функциональная схема включает различные блоки и компоненты, которые обеспечивают его работу. Функциональную схему ФЭУ можно описать через 5 основных функциональных блоков, каждый из которых отличается назначением, принципом работы, составом и параметрами внутренних компонентов, а также взаимосвязью с другими элементами ФЭУ. При использовании функциональной схемы ФЭУ в

виде 5 функциональных блоков или подсистем существует обоснование и преимущество в том, что именно параметры данных компонентов определяют характеристики и свойства всей изучаемой технической системы. Также, на основе математических моделей данных подсистем возможно создать комплексную модель ФЭУ в целом.

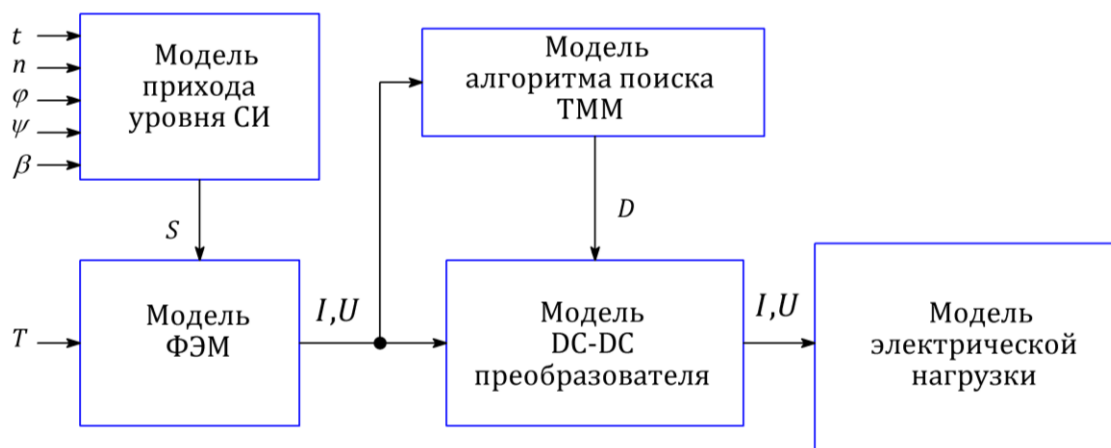


Рисунок 2.1 – Обобщенная функциональная схема для построения математической модели ФЭУ

При разработке математической модели ФЭУ необходимо учитывать, что его функционирование характеризуется значительным разбросом скорости протекания процессов в отдельных компонентах или подсистемах. Это означает, что различные части ФЭУ могут работать с разной скоростью протекания процессов, что влияет на его общую производительность. При создании математической модели необходимо учесть этот разброс и описать взаимодействие различных компонентов, чтобы получить более точное представление о его работе в различных условиях. В полупроводниковых преобразователях постоянные времени обычно составляют доли секунды. Это связано с быстрыми процессами, свойственными полупроводниковым устройствам, которые могут изменять свое состояние и реагировать на изменения входного сигнала в течение очень коротких промежутков времени. С другой стороны, постоянная время аккумуляторной батареи, которая используется для хранения электрической энергии, обычно измеряется в минутах. Это связано с более медленными процессами, такими как процессы

зарядки и разрядки аккумулятора, которые требуют большего времени для завершения. Для электрической нагрузки, которая потребляет электрическую энергию, постоянная время обычно измеряется в часах. Это объясняется тем, что электрическая нагрузка имеет более длительные циклы работы и обладает большей инерцией по сравнению с полупроводниковыми устройствами и аккумуляторными батареями. При выборе постоянных времен для компонентов и устройств следует учитывать различные факторы, чтобы обеспечить правильное функционирование системы в целом. Возможность рассмотрения процессов в каждой подсистеме отдельно является значимым аспектом при построении и реализации математических моделей. Это позволяет более детально и точно описывать поведение отдельных компонентов системы и их взаимодействие. Рассмотрение процессов в отдельных подсистемах позволяет учитывать их специфические особенности, а также разделить сложные задачи на более простые. Каждая подсистема может быть изучена в отдельности, что облегчает анализ и разработку моделей, а также позволяет увидеть влияние каждой подсистемы на общую систему.

Однако, следует отметить, что рассмотрение процессов в подсистемах отдельно также может иметь свои ограничения. Взаимодействие между подсистемами может влиять на поведение системы в целом, поэтому необходимо учитывать их взаимодействие и возможные обратные связи. Важно также иметь возможность интегрировать модели подсистем в единую системную модель, чтобы оценить их совместное влияние и согласованность.

Таким образом, рассмотрение процессов в подсистемах отдельно является важным шагом при построении математических моделей, позволяющим получить более детальное и полное представление о поведении системы. Однако, необходимо учитывать взаимодействие между подсистемами и интегрировать модели для получения комплексного представления о системе в целом. При этом взаимосвязь между отдельными подсистемами может быть выражена в виде соотношений между связующими параметрами и организована на основе выходных характеристик или показателей, полученных в результате

моделирования подсистемы. Это позволяет установить связь между входными и выходными параметрами различных компонентов системы и определить влияние одной подсистемы на другую [52].

Математические модели могут быть построены с использованием различных подходов, таких как дифференциальные уравнения, стохастическое моделирование, логическое программирование и т.д. Ключевым факто 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. Например, с ее помощью можно исследовать динамику системы, оптимизировать параметры компонентов, оценить влияние различных факторов на работу системы, предсказать ее поведение в различных ситуациях и т.д.

Кроме того, имитационная модель ФЭУ может использоваться для проверки и верификации реальной системы, а также в качестве инструмента для обучения операторов. Она позволяет проводить эксперименты и анализировать их результаты без необходимости проведения реальных испытаний.

Таким образом, построение полной имитационной модели ФЭУ с помощью соответствующих математических моделей компонентов является важным этапом проектирования и исследования ФЭУ, позволяющим получить глубокое понимание работы системы и оптимизировать ее производительность и эффективность.

Для построения имитационной компьютерной модели ФЭУ произвольной конфигурации потребуется разработка создание следующих математических моделей для пяти основных компонентов:

1. Модель прихода солнечной инсоляции:

- Входные параметры модели: время суток (t), дата (n), географические координаты (φ, ψ), угол наклона ФЭМ (β), ориентация панелей и метеорологические условия.

- Выходные параметры модели: уровень СИ на поверхности ФЭМ (S).

2. Модель ФЭМ:

- Входные параметры модели: уровень СИ, температура окружающей среды (S), характеристики ФЭМ (V_{AX}, V_{BX}).

- Выходные параметры модели: сила тока (I) и напряжение (U) на выходе ФЭМ.

3. Модель DC-DC преобразователя:

- Входные параметры модели: сила тока (I) и напряжение (U) на входе преобразователя, коэффициенты преобразования, эффективность преобразователя.

- Выходные параметры модели: сила тока (I) и напряжение (U) на выходе преобразователя.

4. Модель контроллера поиска ТММ:

- Входные параметры модели: сила тока (I) и напряжение (U) на выходе ФЭМ.

- Выходные параметры модели: оптимальное значение напряжения и силы тока для достижения максимальной мощности.

5. Модель электрической нагрузки DC-DC преобразователя:

- Входные параметры модели: сила тока (I) и напряжение (U) на выходе преобразователя, характеристики электрической нагрузки.

- Выходные параметры модели: электрическая мощность потребляемой нагрузки.

Разработка и интеграция этих моделей позволит создать компьютерную модель ФЭУ, которая будет имитировать работу системы в различных условиях. Каждая модель должна быть построена на основе фундаментальных законов и экспериментальных данных для обеспечения точности моделирования.

2.1.1. Моделирование прихода уровня СИ с последующей верификации с результатами реальных испытаний

В облачной атмосфере происходят значительные потери прямых солнечных инсоляций. Большая часть отражается обратно в пространство от вершин облаков, другая часть передается вниз на землю в виде рассеянного излучения, и небольшая часть поглощается облаками (рис.2.2).

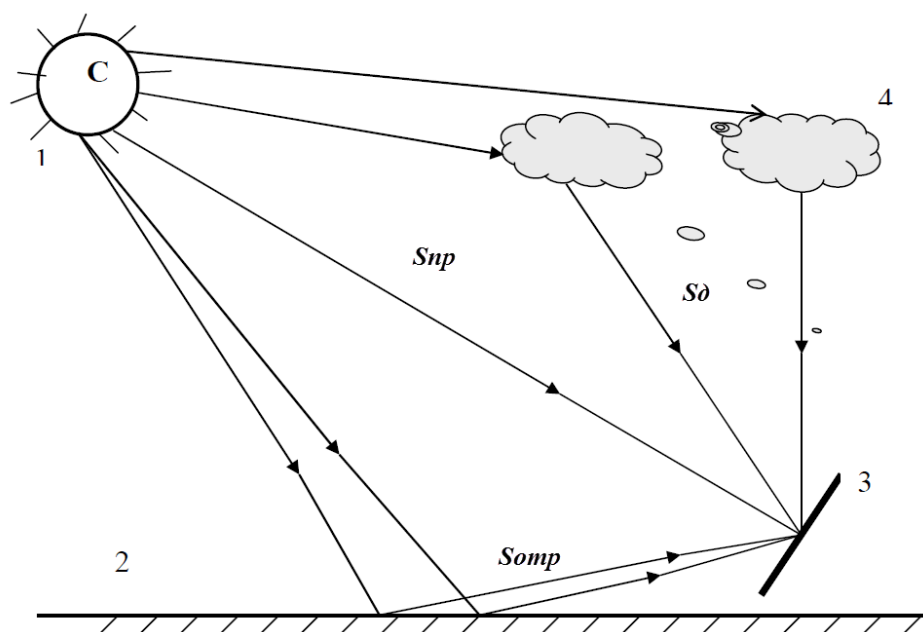


Рисунок 2.2 – Основные составляющие СИ на поверхности Земли: 1-Солнце, 2-поверхность Земли, 3-приемная площадка, 4-облака, аэрозоль, пыль

Доля полной солнечной энергии излучения отражается обратно в космос через отражение от вершин облаков, рассеивая атмосферными газами и частицами пыли, и отражением от земной поверхности называется альбедо системы Земля-атмосфера и имеет значение около 0,30 для земли в целом. Среднемесячное значение интенсивности прямого солнечного излучения, в полдень изменяется от 0,51 до 1,05 кВт / м², в зависимости от широты, высота станции и время года.

В виду наличия атмосферы и подстилающей поверхности земли. На произвольно-ориентированную приемную площадку СИ поступает уже в виде трех потоков солнечной энергии:

-прямая $S_{пр}(t)$

-диффузная или рассеянная $S_{д}(t)$

-отраженная $S_{от}(t)$ от поверхности Земли (рис.2.2).

Суммарный поток СИ на приемную площадку $S(t)$ на поверхности земли будет в каждый момент времени t складываться как.

$$S(t) = S_{пр}(t) + S_{д}(t) + S_{от}(t) \quad (2.1)$$

Рассмотрим методику расчета прямой солнечной инсоляции, поступающие на горизонтальную поверхность.

Величина $S_{пр}(t)$ определяется следующим выражением;

$$S_{пр}(t) = S_{орт}(t) \cdot \cos(\theta) \quad (2.2)$$

Где ,

$S_{орт}(t)$ – прямое солнечное излучение на ортогональную лучам плоскость, Вт/м²

θ – угол прямого падения солнечной инсоляции на наклонную поверхность, рад.

Величина $S_{орт}(t)$ – определяется в соответствии со следующим выражением

$$\begin{cases} S_{орт}(t) = \frac{S_a}{\sin\alpha + c} \\ S_a = S_o \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot n\right)\right) \end{cases} \quad (2.3)$$

где,

S_a – солнечная радиация на верхних слоях атмосферы, Вт/м²

α – высота солнца над горизонтом, рад.

c – постоянная зависящая от степени прозрачности атмосферы.

S_o – солнечная постоянная, равная 1380 Вт/м²

n – порядковый номер дня года, $n_1=1$ для 01.01, $n_2=2$ для 02.02 и т.д. до 365

Высота солнца находится в соответствии с выражением;

$$\sin\alpha = \sin\varphi \cdot \sin\delta(t) + \cos\varphi \cdot \cos\omega(t) \quad (2.4)$$

где, $\delta(t)$ – угол склонения солнца , рад.

$\omega(t)$ – часовой угол солнца, рад.

φ – широта местности, рад.

Угол склонения солнца можно найти с высокой точностью используя формулу Купера [67];

$$\delta(t) = \delta_o \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \varphi, \psi \quad (2.5)$$

где, δ_o – максимальное склонение, равное 23.45^0 (рис.2.3).

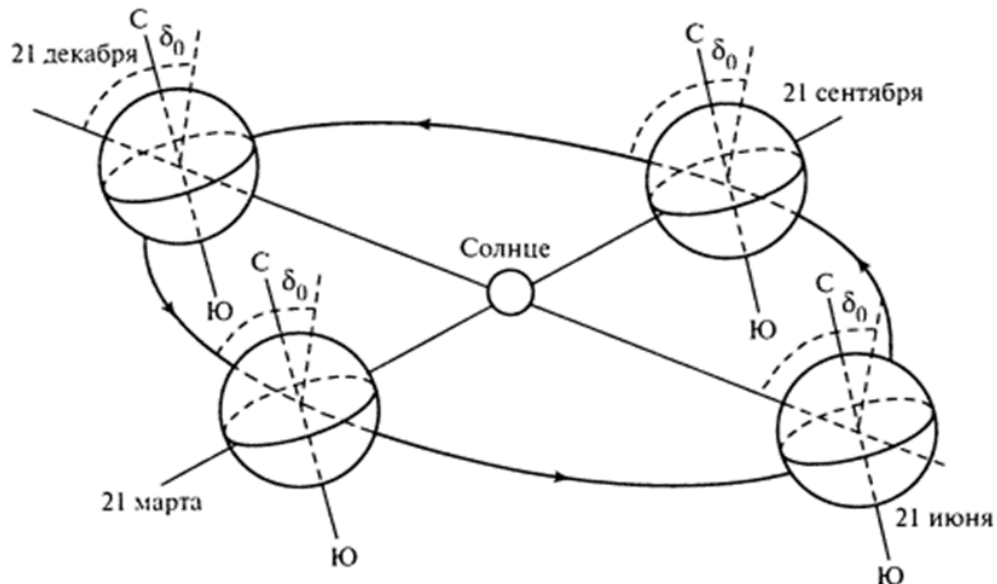


Рисунок.2.3 – Схема вращения земли вокруг солнца

Часовой угол солнца — это величина, характеризующая угол на которой поворачивается земля с момента солнечного полдня в рассматриваемой точке А (φ, ψ), определяется по формуле

$$\begin{cases} \omega(t) = 15 \cdot (t - t_{\text{полд.}}) + e(t) + (\psi - \psi_{\text{зоны}}) \\ e(t) = 7.53 \cdot \cos(C) + 1.5 \cdot \sin(C) - 9.87 \cdot \sin(2C) \\ C = 360 \cdot \frac{n - 84}{365} \end{cases} \quad (2.6)$$

Где, t – рассматриваемый момент времени в сутках

$t_{\text{полд.}}$ – местное время солнечного полдня в часовой зоне.

$e(t)$ – поправка с графика уравнения времени [67]

ψ – географическая долгота местности

$\psi_{\text{зоны}}$ – географическая долгота той меридианной плоскости в котором местный полдень совпадает с истинным солнечным полднем.

Угол прямого падения солнечной инсоляции на наклонную поверхность определяется следующим выражением [67].

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(\theta) = (A - B) \cdot \sin\delta(t) + [C \cdot \sin\omega(t) + (D + E) \cdot \cos\omega(t)] \cdot \cos\delta(t) \\ A = \sin\varphi \cdot \cos\varphi \\ B = \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\ C = \sin\beta \cdot \sin\gamma \\ D = \cos\varphi \cdot \cos\beta \\ E = \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Где, β – угол наклона приемной площадки относительно горизонтальной плоскости.

γ – азимут приемной площадки.

Используя уравнение (2.1) - (2.7) можно вычислить прямую солнечную инсоляцию, приходящую на наклонную плоскость в единицу времени.

Далее рассмотрим способ расчета диффузионную солнечную радиацию на наклонной плоскости. Диффузное солнечное излучение $S_d(t)$ — это часть солнечного излучения, рассеянного облаками, аэрозолю, пылью и т.п. Для расчета $S_d(t)$ на практике применяется две общеизвестные модели; изотропная и анизотропная [67]. Использование изотропной модели в большинство случаев приведет к значительному отклонению от реальных параметров. На практике чаще применяется анизотропные модели. Для расчета диффузионной составляющей солнечной инсоляции по анизотропным моделям используются в основном две модели; модель Дж.Хея и модель Клачера [67]. В данной работе используется анизотропная модель Клачера. Модель Клачера определяется следующим выражением;

$$\left\{ \begin{array}{l} S_d(t) = S_{от}(t) \cdot \cos^2 \frac{\beta}{2} \cdot (1 + R \cdot \sin^3 \frac{\beta}{2}) \cdot (1 + R \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta_z) \\ S_{от}(t) = \frac{1}{3} (S_a(t) - S_{орт}(t)) \\ R(t) = 1 - \left(\frac{D_{гор}(t)}{Q_{гор}(t)} \right) \\ Q_{гор}(t) = S_{от}(t) + S_{гор}(t) \\ S_{гор}(t) = S_{орт}(t) \cdot \sin\alpha \\ \theta_z = \arccos [\sin\varphi \cdot \sin\delta(t) + \cos\varphi \cdot \cos\delta(t) \cdot \cos\omega(t)] \end{array} \right. \quad (2.8)$$

где,

$S_{от}(t)$ – поток рассеянной СИ на горизонтальную поверхность, Вт/м²

Θ_z – зенитный угол Солнца, рад.

$Q_{гор}(t)$ – поток суммарной солнечной инсоляции на горизонтальную поверхность, Вт/м²

S_0 – солнечная постоянная, равная 1380 Вт/м²

n_i – порядковый номер дня года, $n_1=1$ для 01.01, $n_2=2$ для 02.02 и т.д. до 365

На основании вышеприведённых уравнений можно определить среднемесячный приход уровня СИ на горизонтальную поверхность.

$$R_0(n_i) = \int_0^T S(t) d(t) \quad (2.9)$$

где n_i – порядковый номер суток в году

Интегрируя выражение (2.9) по T найдем приход СИ на горизонтальную поверхность за сутки (кВт.час/м²).

$$R_0(n_i) = \frac{24}{\pi} \cdot S_0 \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot n\right) \right] \times \\ \times \left[\cos\varphi \cdot \cos\delta(n_i) \cdot \sin\omega_{з/в} + \frac{2\pi}{360^0} \cdot \sin\omega_{з/в} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta(n_i) \right] \quad (2.10)$$

где $\omega_{з/в}$ – определяется по следующим выражением.

$$\omega_{з/в} = \arccos(-tg\varphi \cdot tg\delta) \quad (2.11)$$

За световой день $T_{c.c.}$, ч, Солнце проходит два часовых угла (каждый из них равен 90^0 , т.е. $\omega_{з/в}$). Учитывая, что за один час Солнце «перемещается» по своей орбите на 15^0 , получаем, что.

$$T_{c.c.} \cdot 15^0/ч = 2 \arccos(-tg\varphi \cdot tg\delta) \quad (2.12)$$

Или окончательно для n_i – суток года

$$T_{c.c.} = 2/15^0 \arccos(-tg\varphi \cdot tg\delta) \quad (2.13)$$

В отечественной литературе встречаются другие подобные формулы расчета $R_0(n_i)$. Например, предложенная С.Ш. Сулейманом в 1985 году представлена ниже [67]

$$R_0(n_i) = S_0 \cdot \left[\frac{24}{n_i} \cdot \cos\varphi \cos\delta(n_i) \sin\left(\frac{T_{c.c.} \cdot n_i}{24}\right) + T_{c.c.} \cdot \sin\varphi \sin\delta(n_i) \right] \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned}
S_{\text{орт}}(t) &= \frac{S_a}{\sin\alpha + c} \\
S_a &= S_o \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot n\right)\right) \\
S_{\text{пр}}(t) &= S_{\text{орт}}(t) \cdot \cos(\theta) \\
\sin\alpha &= \sin\varphi \cdot \sin\delta(t) + \cos\varphi \cdot \cos\omega(t) \\
\delta(t) &= \delta_o \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \varphi, \psi \\
\omega_{3/В} &= \arccos(-tg\varphi \cdot tg\delta) \\
T_{c.c} \cdot 15^0/ч &= 2 \arccos(-tg\varphi \cdot tg\delta) \\
\omega(t) &= 15 \cdot (t - t_{\text{полд.}}) + e(t) + (\psi - \psi_{\text{зоны}}) \\
e(t) &= 7.53 \cdot \cos(C) + 1.5 \cdot \sin(C) - 9.87 \cdot \sin(2C) \\
C &= 360 \cdot \frac{n-84}{365} \\
T_{c.c} &= \frac{2}{15^0 \arccos(-tg\varphi \cdot tg\delta)} \\
\cos(\theta) &= (A - B) \cdot \sin\delta(t) + [C \cdot \sin\omega(t) + (D + E) \cdot \cos\omega(t)] \cdot \cos\delta(t) \quad (2.15) \\
A &= \sin\varphi \cdot \cos\varphi \\
B &= \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\
C &= \sin\beta \cdot \sin\gamma \\
D &= \cos\varphi \cdot \cos\beta \\
E &= \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\
S_d(t) &= S_{\text{орт}}(t) \cdot \cos^2\frac{\beta}{2} \cdot (1 + R \cdot \sin^3\frac{\beta}{2}) \cdot (1 + R \cdot \cos^2\theta \cdot \sin^2\theta_z) \\
S_{\text{орт}}(t) &= \frac{1}{3} (S_a(t) - S_{\text{орт}}(t)) \\
R(t) &= 1 - \left(\frac{D_{\text{гор}}(t)}{Q_{\text{гор}}(t)}\right) \\
Q_{\text{гор}}(t) &= S_{\text{орт}}(t) + S_{\text{гор}}(t) \\
S_{\text{гор}}(t) &= S_{\text{орт}}(t) \cdot \sin\alpha \\
\theta_z &= \arccos [\sin\varphi \cdot \sin\delta(t) + \cos\varphi \cdot \cos\delta(t) \cdot \cos\omega(t)] \\
R(t) &= 1 - \left(\frac{D_{\text{гор}}(t)}{Q_{\text{гор}}(t)}\right) \\
S_{\text{гор}}(t) &= S_{\text{орт}}(t) \cdot \sin\alpha \\
Q_{\text{гор}}(t) &= D_{\text{гор}}(t) + S_{\text{гор}}(t) \\
S(t) &= S_{\text{пр}}(t) + S_d(t) + S_{\text{орт}}(t) \\
R_0(n_i) &= \int_0^T S(t) d(t) \\
R_0(n_i) &= S_0 \cdot \left[\frac{24}{n_i} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\delta(n_i) \cdot \sin\left(\frac{T_{c.c} \cdot n_i}{24}\right) + T_{c.c} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta(n_i)\right]
\end{aligned}$$

Используя уравнения (2.1) - (2.14) составим систему уравнений описывающую математическую модель прихода уровня СИ на любой горизонтальной поверхности (2.15).

Таким образом для исследования и прогнозирования прихода уровня СИ в математической модели (2.15) обычно используются уравнения, которые

учитывают различные факторы, влияющие на СИ. В общем случае, эти уравнения могут включать следующие переменные:

1. Географические координаты: широту и долготу местоположения, для которого проводится прогноз.

2. Данные о времени: дата и время, для которых требуется прогнозирование уровня солнечной инсоляции.

3. Метеорологические данные: такие как облачность, плотность атмосферы, аэрозоли и другие параметры, которые могут влиять на интенсивность солнечной радиации.

4. Геометрические параметры: угол падения солнечных лучей на поверхность земли, а также углы отражения и преломления.

5. Характеристики поверхности: альbedo (отражающая способность поверхности), тип поверхности (например, вода, трава, асфальт и т.д.) и другие факторы, определяющие поглощение и отражение солнечной радиации.

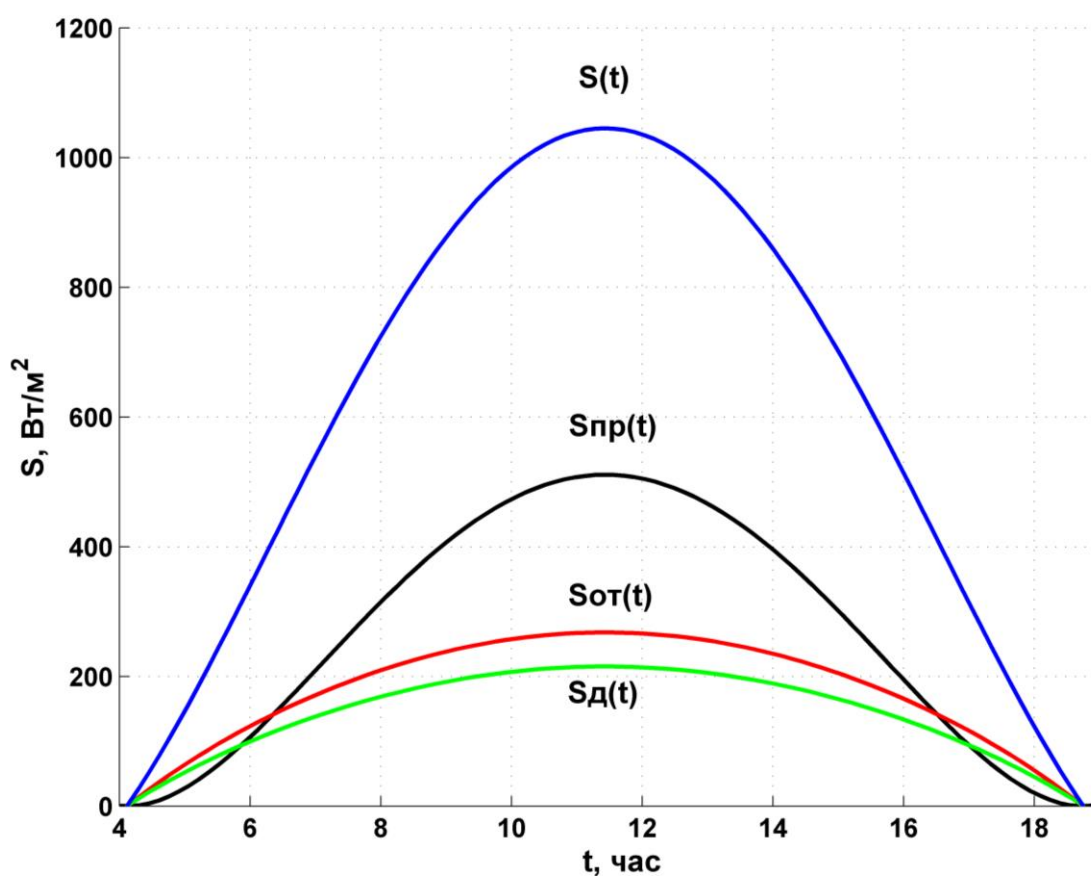


Рисунок 2.4 – Приход уровня СИ на горизонтальную горизонтальную поверхность г. Душанбе (03.06.2022)

Используя математическую модель и программный комплекс для исследования в области инженерных наук Matlab/Simulink, смоделируем приход уровня СИ на горизонтальную поверхность в климатических условиях Республики Таджикистан. Кроме того, используя открытые источники по наземной солнечной энергетике, такие как база NASA и Solargis по климатическим данным [68 - 72], произведём сравнение данных разработанной модели с данными, полученными из открытых источников.

Путем моделирования и анализа этих уравнений можно получить прогнозы уровня СИ в заданной точке и в заданный момент времени. Однако следует учесть, что точность этих прогнозов зависит от достоверности и полноты входных данных, а также от сложности и точности используемых моделей.

Рисунок 2.4 наглядно демонстрирует моделирование прихода уровня СИ на горизонтальную поверхность в географических условиях г. Душанбе (координаты $38^{\circ}32,145$ северной широты и $68^{\circ}46,743$ восточной долготы). Из анализа этого рисунка видно, что суммарный поток СИ $S(t)$ в основном зависит от прямой составляющей $S_{пр}(t)$, диффузионной составляющей $S_{д}(t)$ и отражающей составляющей СИ, которые примерно равны между собой. Стоит отметить, что моделирование прихода СИ проведен в июне месяце, так как в это время года СИ и температура существенно отличаются от других времен года. Это позволит точнее оценить потенциал солнечной энергии и прогнозировать ее возможное использование. Моделирование в другие месяцы позволит получить данные для сравнения и анализа влияния сезонных изменений на уровень СИ. Анализ рисунка 2.4 позволяет установить, что наиболее высокое значение уровня СИ в г. Душанбе составляет 1070 Вт/м^2 . Это значение означает, что в данных условиях СИ достигает максимальной интенсивности, и может иметь важное значение для различных процессов, связанных с солнечной энергетикой. Максимальное значение уровня СИ может быть полезным для определения потенциала солнечной энергии в этом регионе или для учета воздействия солнечного излучения на окружающую среду. Однако для полного анализа данной информации может потребоваться дополнительные данные, такие как

временные изменения уровней СИ в течение дня или в течение года, а также другие факторы, влияющие на солнечное излучение в данном районе.

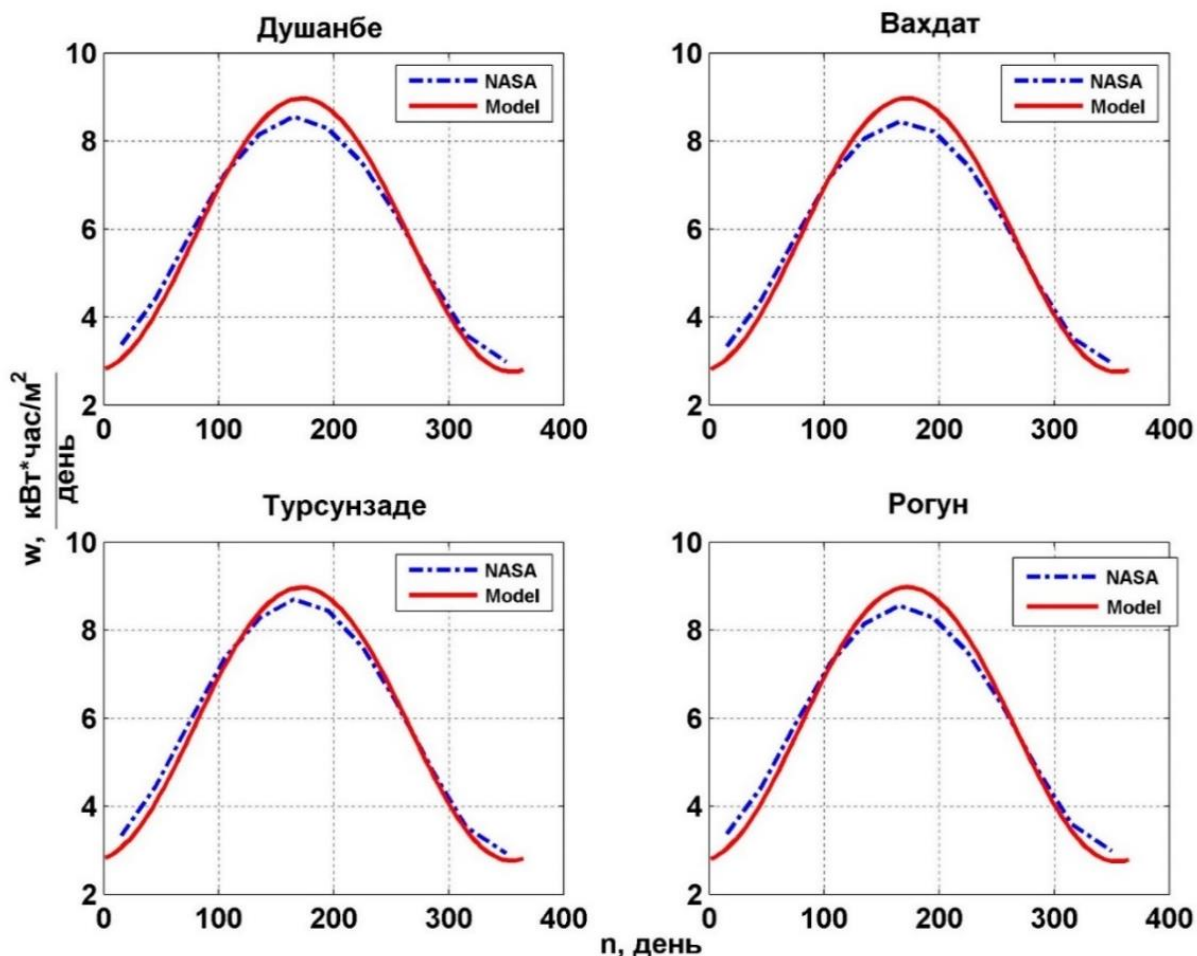


Рисунок 2.5 – Среднедневной приход солнечной энергии для климатических условий центральной части РТ.

Необходимо отметить, что математическая модель позволяет оценить среднедневной приход солнечной энергии для климатических условий РТ (рис.2.5 – 2.8). Модель позволяет провести анализ и прогнозирование прихода солнечной энергии на протяжении года, месяцев или даже отдельных дней. Это важно для разработки и оптимизации ФЭУ, а также для оценки потенциала использования солнечной энергии в данном регионе. В рамках исследования также произведены сравнения показателей солнечной энергии по регионам РТ с данными по базам NASA [74]

На рисунке 2.5 показаны результаты моделирования среднедневного прихода солнечной энергии для центральной части РТ, включающей города

Душанбе, Вахдат, Турсунзаде и Рогун. В зимний период приход средне значение прихода солнечной энергии находится на уровне 2.8 кВт*день/м^2 и в летний период на уровне 8.9 кВт*день/м^2 . В среднем за год в центральной части РТ приходит примерно 5.8 кВт*день/м^2 солнечной энергии.

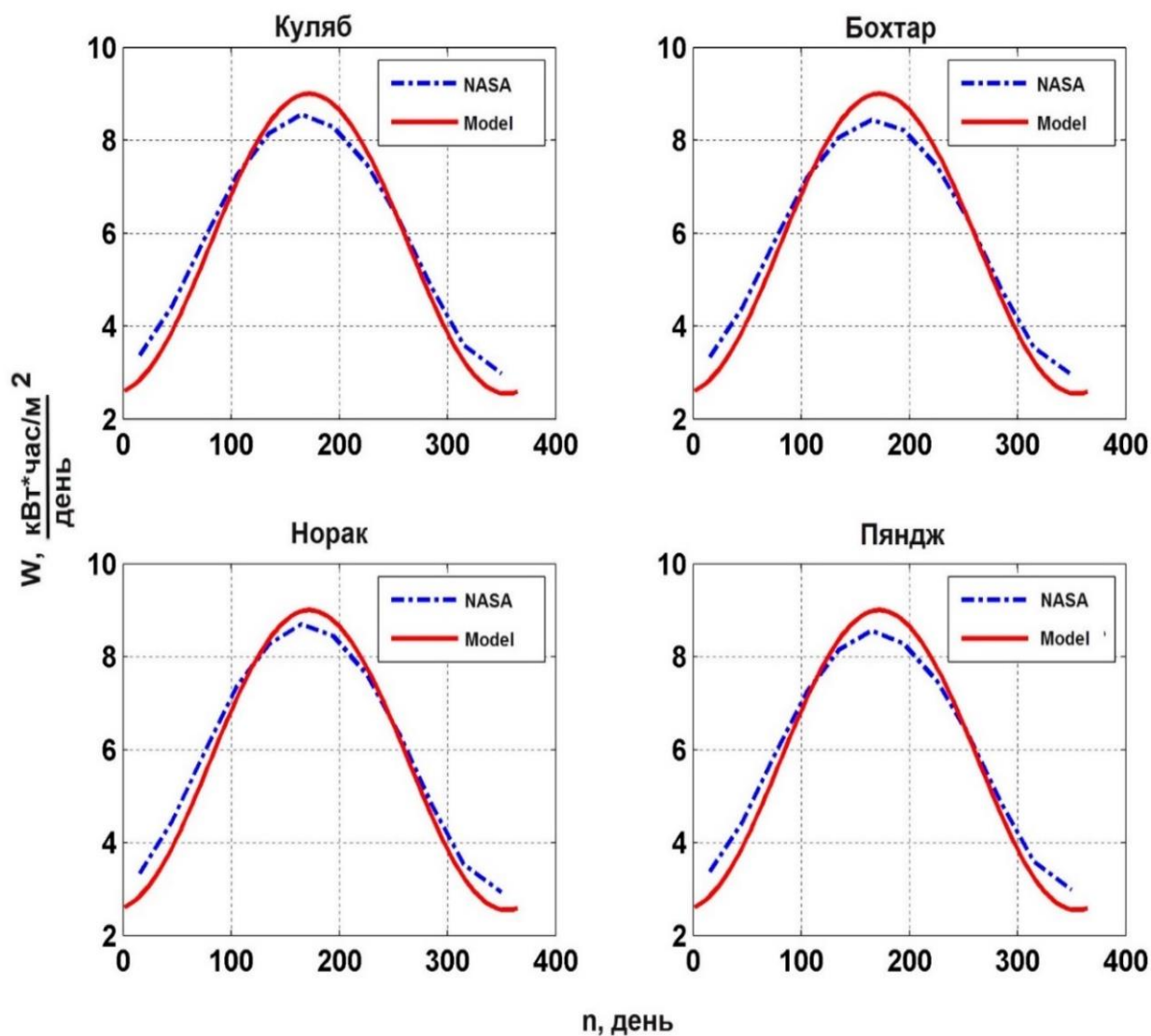


Рисунок 2.6 – Среднедневной приход солнечной энергии для климатических условий южной части РТ

На рисунке 2.6 показаны результаты моделирования прихода солнечной энергии для климатических условий южной части РТ. В условиях южной части РТ средние значения прихода солнечной энергии в летние месяцы находилось в диапазоне $6 - 8,9 \text{ кВт*день/м}^2$, зимой $2-4 \text{ кВт*день/м}^2$, при этом среднее значение за год составило $5,89 \text{ кВт*день/м}^2$. Эти данные позволяют оценить средние значения прихода солнечной энергии в разные времена года. Это означает, что в

течение всего года южная часть РТ получает умеренное количество солнечной энергии.

Рисунок 2.7 иллюстрирует среднедневной приход солнечной энергии для климатических условий северной части РТ (Худжанд, Истаравшан, Исфара, Пенджикент)

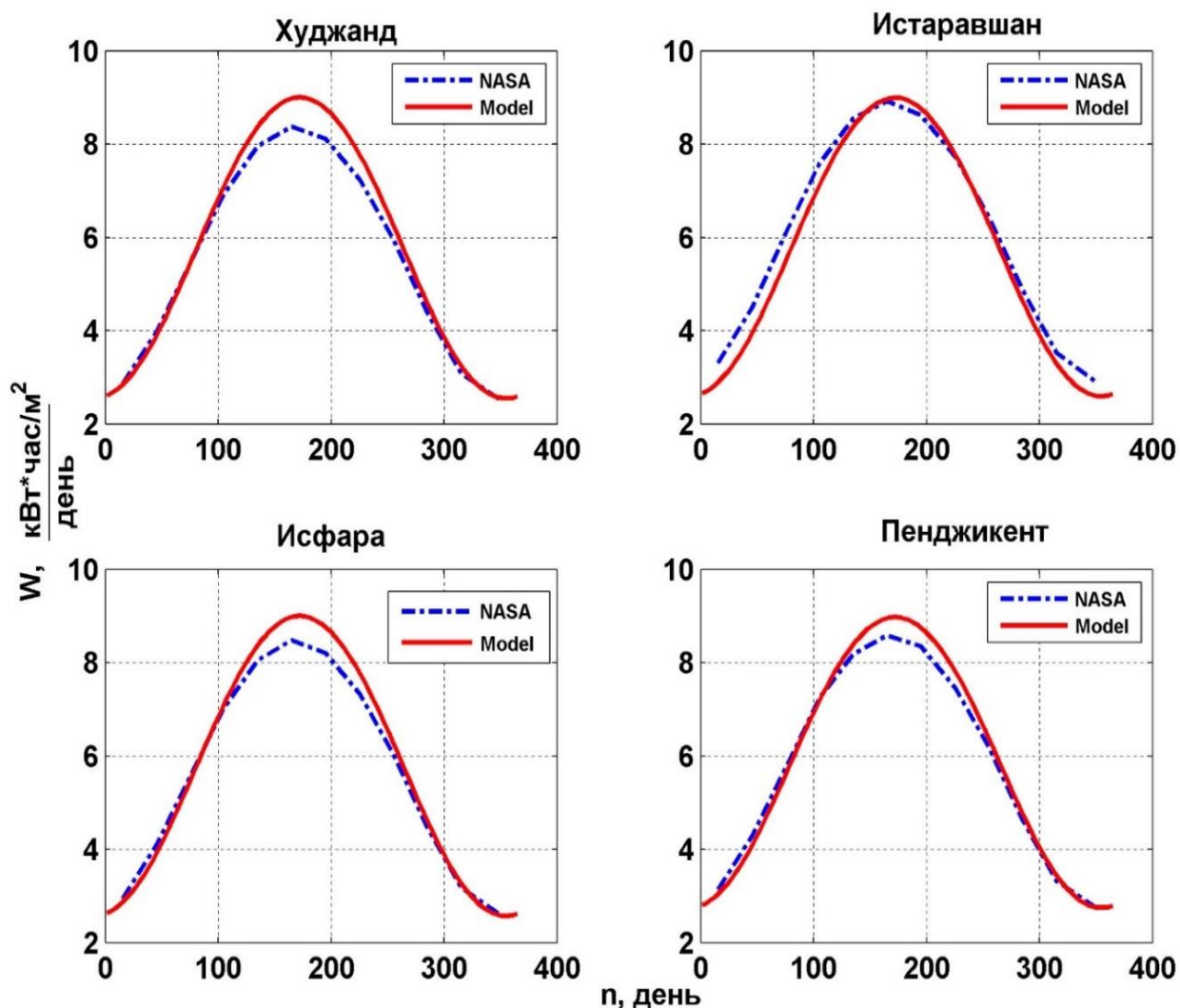


Рисунок 2.7 – Среднедневной приход солнечной энергии для климатических условий северной части РТ

. Анализ рисунка показывает, что в северной части РТ среднедневной приход солнечной энергии ниже, чем в южной части региона. Это связано с климатическими условиями, которые в северной части РТ характеризуются относительно большим количеством облачных дней и менее интенсивным солнечным излучением. Таким образом, потенциал использования солнечной энергии в северной части РТ может быть несколько меньше по сравнению с

южной частью. В среднем за год в северной части РТ приходит примерно 5.6 кВт*день/м² солнечной энергии.

По результату моделирования самый большой приход солнечной энергии в условиях РТ зафиксирован в восточной части страны (Мургаб, Хорог). Это связано с тем, что в высокогорных регионах, таких как Мургаб и Хорог, солнце находится ближе к земной поверхности и свет проходит через меньшее количество атмосферы, что увеличивает интенсивность солнечной радиации (рис.2.8). Кроме того, в этих регионах обычно меньше облачности и океанических туманов, что также способствует получению большего количества солнечной энергии.

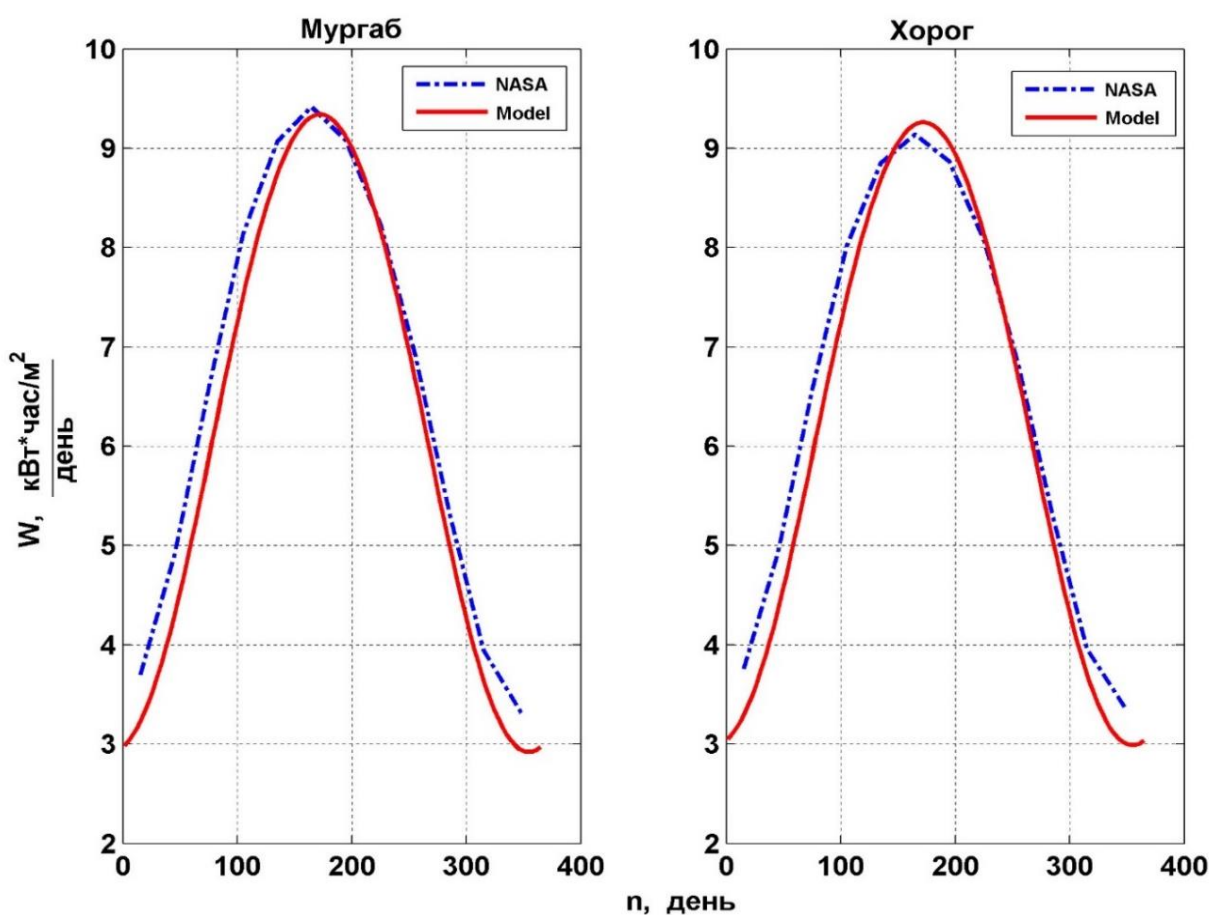


Рисунок 2.8 – Среднедневной приход солнечной энергии для климатических условий восточной части РТ

Благодаря этим факторам, Мургаб и Хорог являются одними из наиболее подходящих мест в Таджикистане для развития солнечной энергетики. Использование солнечной энергии в этих регионах может снизить зависимость

от традиционных источников энергии, таких как уголь и газ, а также помочь сократить выбросы парниковых газов и улучшить экологическую обстановку. В условиях восточной части РТ средние значения прихода солнечной энергии в летние месяцы находилось в диапазоне 7 – 9,3 кВт*день/м², зимой 3-4 кВт*день/м², при этом среднее значение за год составило 6,2 кВт*день/м²

Таким образом результаты свидетельствуют о том, что данные, полученные в рамках исследования, в значительной степени соответствуют данным, предоставленным базами NASA [68]. Это говорит о надежности и точности полученных результатов и подтверждает возможность использования данных исследования для дальнейших анализов и прогнозов в области солнечной энергии в регионах РТ. Однако, необходимо учитывать, что в некоторых случаях наблюдалось превышение отклонения данных на 10%, что может быть вызвано различиями в методиках сбора данных или другими факторами. Тем не менее, в целом, результаты сравнения свидетельствуют о высокой достоверности данных исследования.

Кроме того, для оценки адекватности и точности модели 22.06.2022 г. на кафедре «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими проводилось экспериментальное исследование прихода уровня СИ для координаты 38°32,145 северной широты и 68°46,743 восточной долготы (г. Душанбе). Измерение проводилось с помощью датчика облучения и теплового потока LI-19, технические характеристики которого приведены в таблице 2.1. Датчик LI-19 предназначен для измерения интегрального (всех длин волн) облучения и теплового потока в различных применениях, таких как метеорология, солнечная энергетика, экология и других областях, где требуется мониторинг излучения и теплового потока.

Результаты исследования приведены в таблице 2.2 и рисунке 2.9. Анализ данных показывает, что СИ полученные с модели - S_{model} , замеренные с помощью датчика LI-19 - S_{LI-19} и полученные с базы NASA - S_{NASA} коррелируются, и отклонение между ними не превышает 10%.

Таблица 2.1. Технические характеристики датчика LI-19.

1.	Тип датчика	LI-19
2.	Количество каналов	1
3.	Диапазон входных сигналов	1-0-200мВ
4.	Разрешение (мкВ)	1
5.	Точность измерения	0.1%
6.	Хранение данных. Внутренняя память	3518 образцов
7.	Источник питания	3 В постоянного тока
8.	Время работы аккумулятора	600 часов
9.	Диапазон рабочих температур	-10 ⁰ С , +40 ⁰ С
10.	Диапазон измерения инсоляции	0-1400 Вт/м ²

Для сравнения данных в качестве основного источника СИ приняты данные с датчика LI-19.

Таблица 2.2. Результаты прихода уровня СИ (г.Душанбе)

t, час	S _{LI-19} , Вт/м ²	S _{NASA} , Вт/м ²	S _{Model} , Вт/м ²
5	75	65	72
6	197	200	217
7	406	390	430
8	610	590	637
9	788	791	818
10	925	945	956
11	1003	985	1039
12	1026	995	1060
13	992	945	1019
14	897	890	918
15	751	770	766
14	565	540	575
17	355	325	363
18	151	143	253
19	15	17	19

Приход уровня СИ на горизонтальную поверхность в климатических условиях г. Душанбе достигнет до 1100 Вт/м^2 . Так как экспериментальное исследование проводилось в середине июня и выбран наиболее жаркий день, можно предположить о том, что максимальный приход уровня СИ на горизонтальную поверхность в условиях г. Душанбе колеблется в пределах $1000\text{-}1100 \text{ Вт/м}^2$.

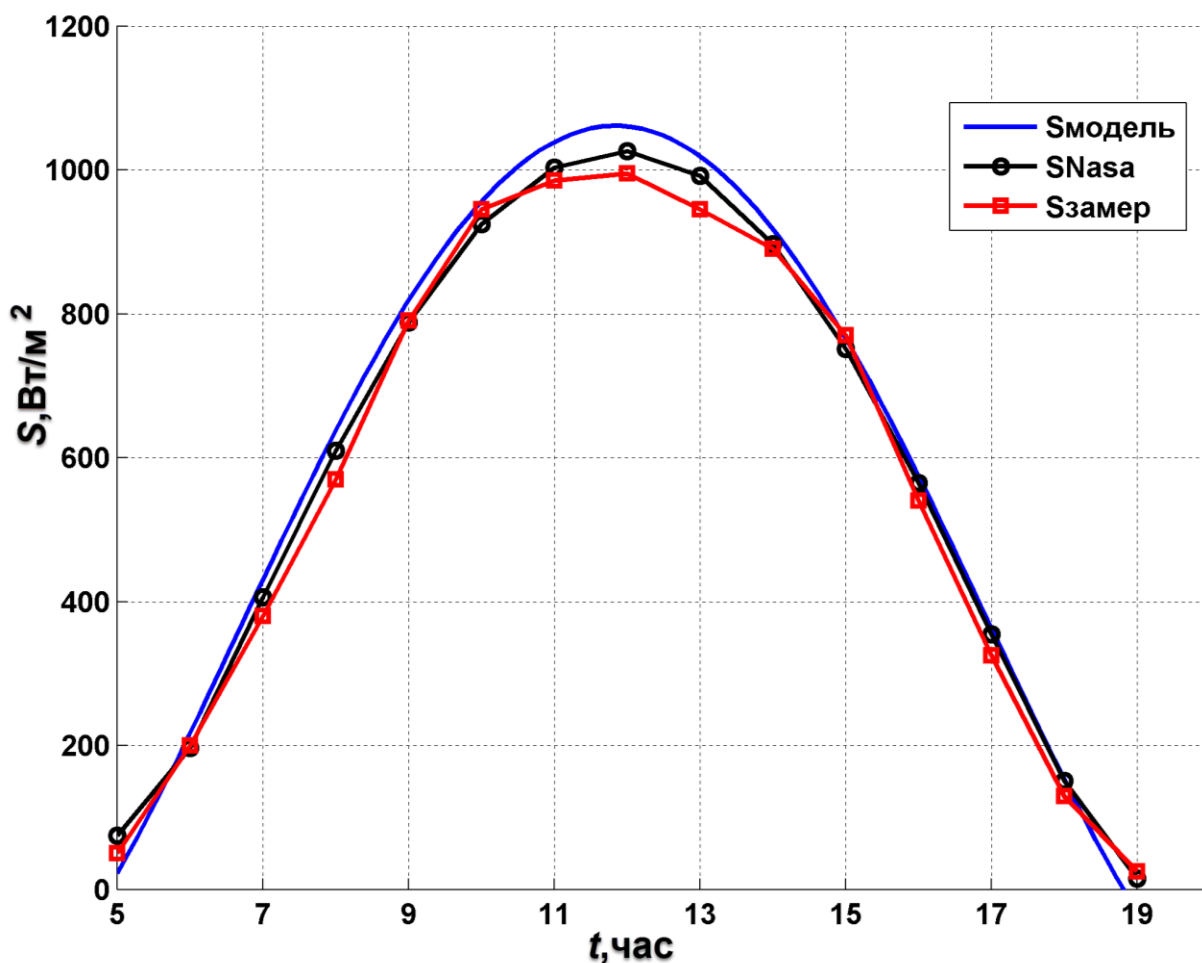


Рисунок 2.9 – Приход уровня СИ на горизонтальную поверхность г. Душанбе (22.06.2022)

Разработанная математическая модель, описывающая возможность получения прихода СИ на горизонтальную поверхность в условиях РТ.

Анализ диаграммы прихода уровня СИ показывает, что максимальное значение СИ составляет $1000\text{-}1100 \text{ Вт/м}^2$. Такое значение можно зафиксировать в жаркий летний день. Экспериментальная проверка расчетных соотношений прихода уровня СИ математической для климатических условий РТ подтвердила

их справедливость. В результате сравнения полученных данных с моделью с реальным прибором (датчик облучения и теплового потока LI-19) получено не более 10% отклонения, что показывает достаточно высокую степень работоспособности данной модели в реальных условиях эксплуатации.

Выбор и использование подходящей математической модели является важным шагом в исследовании и анализе солнечной энергии. Эта модель позволяет учесть множество переменных и факторов, которые могут влиять на приход солнечной энергии. Таким образом, результаты моделирования с помощью данной математической модели позволяют более точно определить потенциал солнечной энергии в РТ.

2.1.2. Математическая модель ФЭМ и верификация выходных характеристик при различных условиях окружающей среды

ФЭМ представляет собой устройство, состоящее из последовательно-параллельной комбинации фотоэлектрических солнечных элементов, организованных в соответствии с эквивалентной схемой, изображенной на рисунке 2.10 [73]

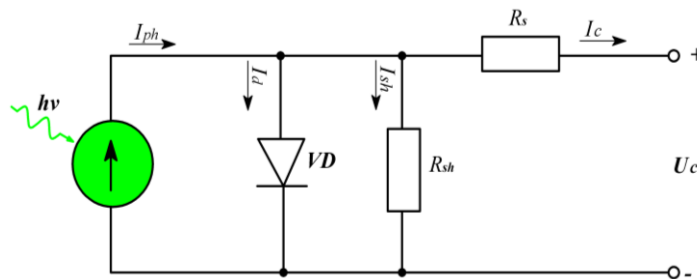


Рисунок 2.10 – Эквивалентная схема ФЭМ.

Выходной ток ФЭМ определяется следующим образом:

$$I_c = I_{ph} - I_d \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c} (U_c + R_s I_c) \right]} - 1 \right\} - \frac{U_c + R_s I_c}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

где I_{ph} – фототок, А;

I_d – обратный ток насыщения диодов, А;

I_c – рабочий ток, А;

U_c – рабочее напряжение, В;

e – заряд электрона ($1,106 \times 10^{-19}$ кл);

k – постоянная Больцмана ($0,138 \times 10^{-23}$ Дж/К);

A – диодный фактор или коэффициент идеализации;

T_C – температура окружающей среды, в градусах Кельвина;

R_s – внутреннее сопротивление солнечной ячейки, которое представляет собой сопротивление текущему току и зависит от глубины р-п перехода, примесей и сопротивления контактов. Его измеряют в омах.

R_{sh} – шунтирующее сопротивление, которое относится к сопротивлению тока утечки в землю. Оно также измеряется в омах.

Коэффициент идеализации показывает, насколько идеальный ФЭ отличается от реального. Значение данного коэффициента зависит от материала СЭ и технологии изготовления и колеблется в пределах от 1 до 2. Величина диодного коэффициента для некоторых материалов приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Значения фактора идеализации диода от материала СЭ

1	Материал	n
2	Монокристаллический Si	1.2
3	Поликристаллический Si	1.3
4	a-Si:H ($E_g=1.7$ эВ)	1.8
5	a-Si:H тандемные	3.3
6	a-Si:H тройные	5
7	CdTe ($E_g=1.45$ эВ)	1.5
8	CIGS ($E_g=1.38$ эВ)	1.5 – 6
9	GaAS ($E_g=1.43$ эВ)	1.3

Поскольку шунтирующее сопротивление R_{sh} гораздо больше, чем последовательное сопротивление R_s , последнее слагаемое в уравнении (2.15) становится незначительным по сравнению с суммой начальных составляющих, следовательно, последним слагаемым можно пренебречь, тогда уравнение (2.15) будет иметь следующий вид:

$$I_c = I_{ph} - I_d \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c} (U_c + R_s I_c) \right]} - 1 \right\} \quad (2.16)$$

Эквивалентная схема ФЭМ без учета R_{sh} выглядит следующим образом (рис.2.11):

Следует отметить, что величина обратного тока насыщения диодов I_d редко предвидится в паспортных данных ФЭМ.

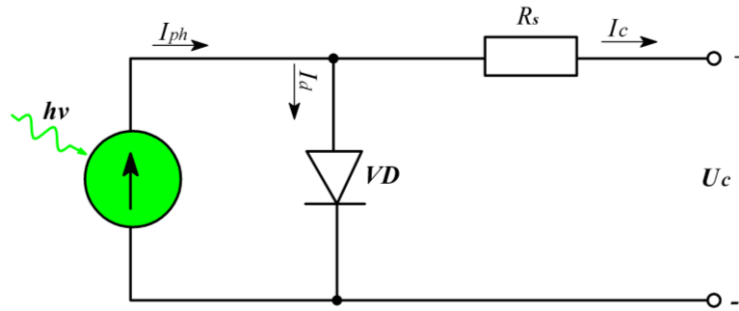


Рисунок 2.11 – Эквивалентная схема ФЭМ без учета обратного сопротивления диода (R_{sh}).

Выходное напряжение ФЭМ U_c является функцией фототока I_c , что в основном определяется током нагрузки в зависимости от уровня солнечной инсоляции и температуры окружающей среды. С учетом уравнения (2.16) определяем выходное напряжение ФЭ U_c

$$U_c = \frac{AkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_c + I_d}{I_d} \right) - R_s I_s \quad (2.17)$$

Уравнение (2.3) дает напряжение единичного ФЭ, которое затем умножается на количество ячеек, соединенных последовательно.

Переменная величина температуры окружающей среды T_c влияет на выходное напряжение и фототок ячейки и называется температурным эффектом, и описывается следующими уравнениями [74 - 77];

$$\begin{cases} C_{TU} = 1 + \beta_T (T_c - T_x) \\ C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_c} (T_x - T_c) \end{cases} \quad (2.18)$$

где β_T – температурный коэффициент выходного напряжения, U/°C;

γ_T – температурный коэффициент выходного тока, A/°C;

T_x – номинальная рабочая температура 25°C.

Если температура окружающей среды существенно не изменяется в дневное время, уровень солнечной инсоляции изменяется в зависимости от количества солнечного света и облачности. Изменение уровня СИ вызывает изменение рабочей температуры фототока в ячейке, которая, в свою очередь, влияет на величину выходного напряжения. Таким образом, изменение уровня солнечной инсоляции, влияющей на величину фототока и рабочей температуры, можно описать через две константы C_{SU} и C_{SI} .

$$\begin{cases} C_{SU} = 1 + \beta_T \alpha_s (S_x - S_c) \\ C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_c} (S_x - S_c) \\ \alpha_s = \frac{T_x - T_c}{S_x - S_c} \end{cases} \quad (2.19)$$

где S_x – уровень СИ, [Вт/М²];

S_c – номинальный рабочий уровень СИ, 1000Вт/М²;

α_s – коэффициент, учитывающий отклонение рабочей температуры в ячейке [80-83], обусловленного изменением уровня СИ. Таким образом, используя уравнения (2.15) - (2.19), можно составить систему уравнений, описывающую математическую модель ФЭМ.

$$\begin{cases} I_c = I_{ph} - I_d \left\{ e^{\left[\frac{e}{AkT_c} (U_c + I_c R_c) \right]} - 1 \right\} \\ U_c = \frac{AkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_c + I_d}{I_d} \right) - I_c R_c \\ C_{SU} = 1 + \beta_T \alpha_s (S_x - S_c) + k_{SU} \\ C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_c} (S_x - S_c) + k_{SI} \\ C_{TU} = 1 + \beta_T (T_c - T_x) \\ C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_c} (T_x - T_c) \\ \alpha_s = \frac{T_x - T_c}{S_x - S_c} \\ U_{Cx} = C_{SU} C_{TU} U_c \\ I_{phx} = C_{TI} C_{SI} I_c \\ P_{Cx} = U_{Cx} I_{phx} \end{cases} \quad (2.20)$$

2.2. Моделирование ФЭМ в программе Matlab/Simulink

Предложена универсальная модель ФЭМ в программе Matlab с применением элементов библиотеки Simulink и Sim Power System [78,79]. Компьютерная модель строится на основании уравнения математической модели (2.6) и эквивалентной схемы ФЭМ. Данная модель позволяет смоделировать систему электроснабжения ФЭМ с учетом изменения СИ и температуры окружающей среды. Моделирование производится для единичного ФЭ с выходным напряжением 0,61-0,67 В, которое затем умножается на количество ячеек, подключенных последовательно, чтобы получить выходное напряжение ФЭМ. Компьютерная модель выполнена для 4-х видов, наиболее распространенных ФЭМ, которые имеют следующие технические данные (таблица 2.4)

1. ***TSM-210SB*** – ФЭМ разработан на основе пластин кристаллического кремния с активным слоем, толщина которого составляет не менее 180 микрометров. Это позволяет достичь максимального коэффициента преобразования световой энергии в электрическую, однако такое решение приводит к существенному увеличению затрат на производство.

2. ***Pramac Luce MСPH P7*** – ФЭМ изготовлен из тонкопленочного фотоэлектрического элемента на основе аморфного и микрокристаллического кремния (a-si/μc-si). Его активные слои имеют толщину, не превышающую 1,5 микрометра.

3. ***SW 155*** – ФЭМ изготавливается из монокристаллического кремния, чтобы подчеркнуть, что используемые солнечные элементы получены из одного кристалла. Благодаря использованию монокристалла электроны, создающие электрический ток, имеют большое пространство для перемещения, что приводит к более высокой эффективности по сравнению с поликристаллическими солнечными панелями.

4. ***ASM6610P 270*** - Данная ФЭМ является поликристаллической. Поликристаллические ФЭУ менее эффективны, но их преимуществом является более доступная цена. Они визуально отличаются от монокристаллических

панелей своим синим оттенком. Поликристаллические панели изготавливают из множества фрагментов кристаллического кремния в отличие от монокристаллических, которые состоят из одного кристалла.

Таблица 2.4. Паспортные данные исследуемых ФЭМ

Тип ФЭУ		TCM- 210SB	SW 155	MCPH P7	ASM6610P 270
Номинальная мощность, Вт	P_n	210	155	125	270
Напряжение холостого хода,	U_{xx}	44	43.6	74.1	37.99
Рабочее напряжение, В	U_p	38	34.8	56.6	31.29
Рабочий ток, А	I_p	5,49	4.46	2.23	8.7
КПД, %	η	17,34	4.9	2.71	9.15
Площадь поверхности, М ²	S_n	1.26	11.8	8.9	16.5
Количество фотоэлементов	N	72	72	72	60
Свойства ФЭ					
Обратный ток насыщения диодов, А	I_d	$2.2 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$
Диод, фактор идеализации	A	1,43	1,43	1,6	1,43
Температурный коэффициент выходного	β_T	0,004	0,004	0,39	0,32
Температурный коэффициент выходного	γ_m	0,06	0,06	0,06	0,059

Модель ФЭМ приведена на рисунке 2.12. Данная модель состоит из ФЭМ (*PV Sysytem*), подключенной к активно-индуктивной нагрузке (*RL Load*). С помощью элементов *Voltage Measurement* и *Current Measurement* можно замерять выходное напряжение и ток ФЭМ. Элемент *I-V curve(XY Graph)* позволяет построить ВАХ и ВВХ ФЭМ при вариации входных переменных.

В состав блока *PV system* входит следующая система, по которой рассчитываются выходное напряжение и ток ФЭМ рис. 2.13-2.14.

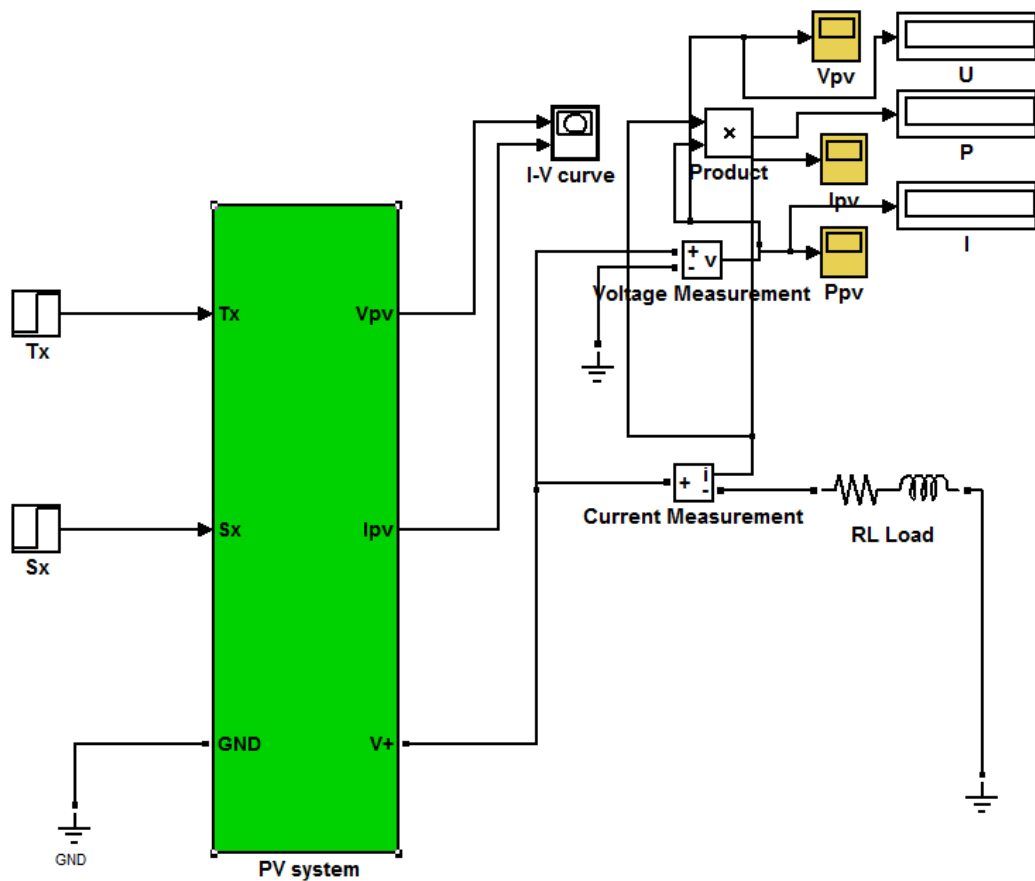


Рисунок 2.12 – Модель ФЭМ

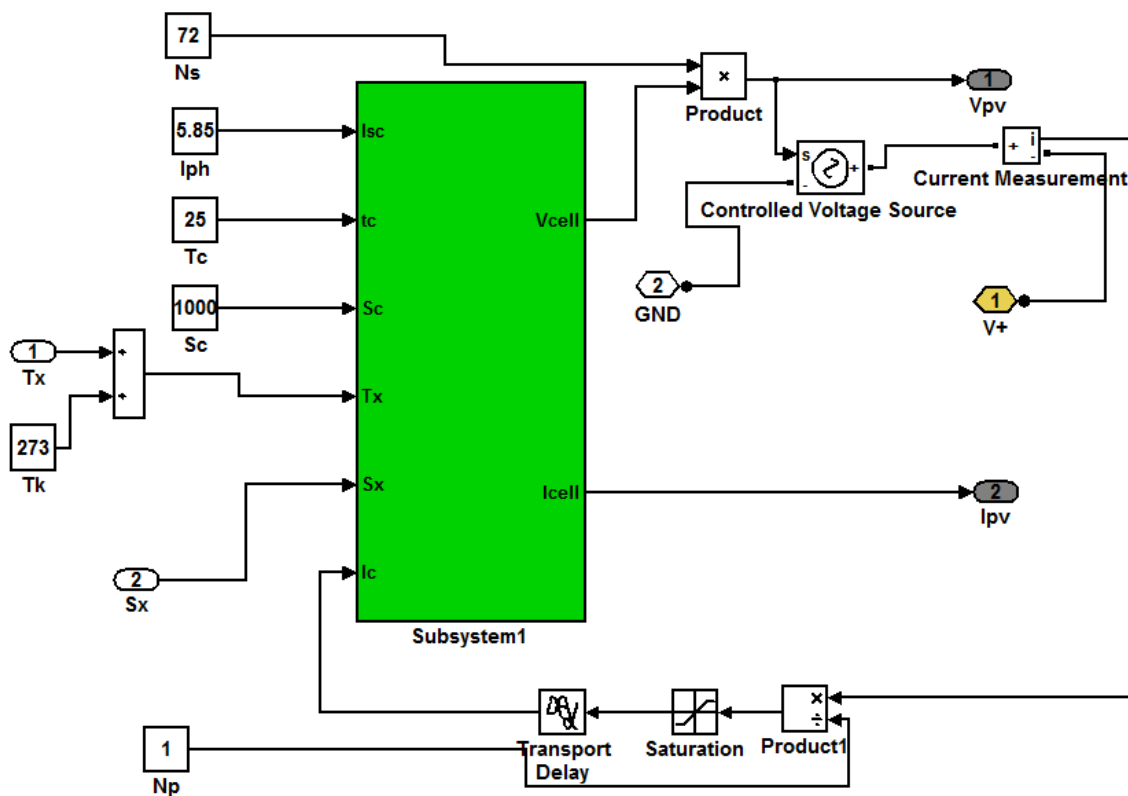


Рисунок 2.13 – Модель подсистемы *PV Subsystem*

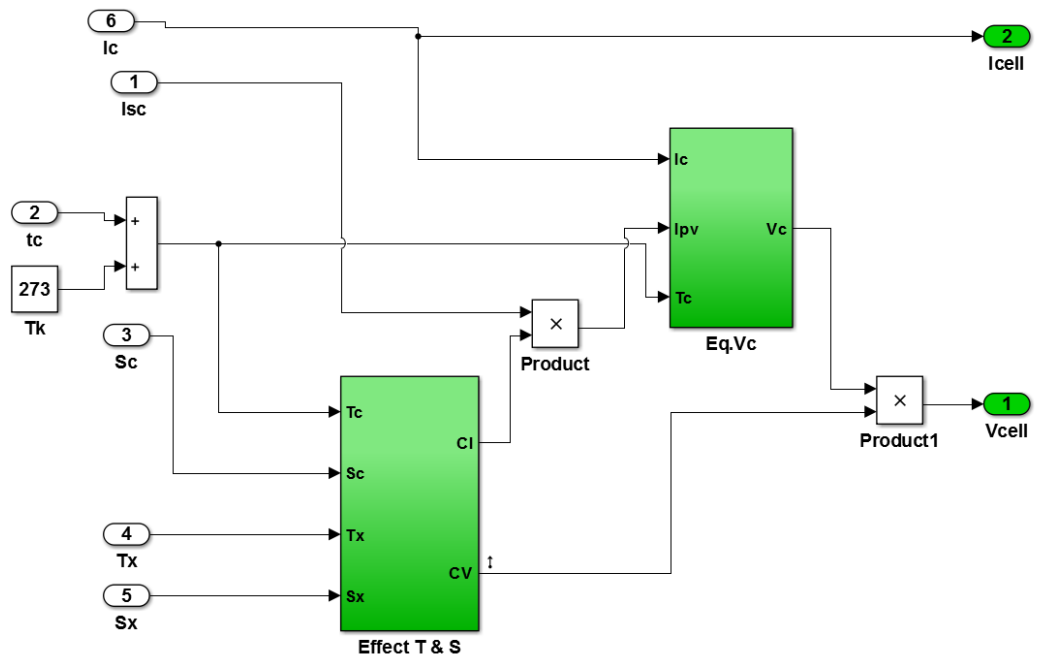


Рисунок 2.14 – Модель подсистемы *Subsystem1*

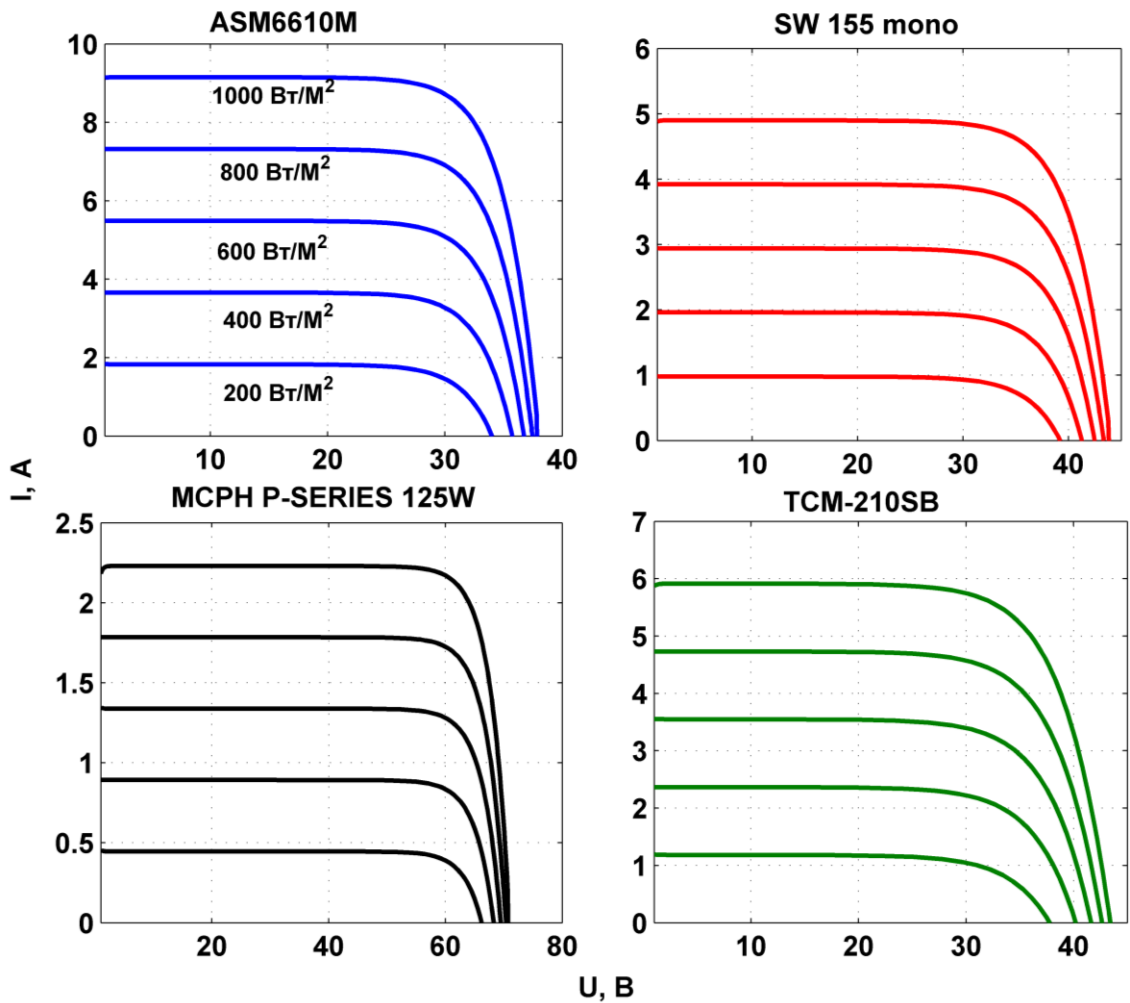


Рисунок 2.15 – ВАХ ФЭМ для различных уровней СИ.

Важными параметрами, прямо влияющими на работу ФЭУ, являются температура и солнечная радиация. С помощью модели можно рассматривать влияние температуры окружающей среды и уровня солнечной инсоляции на выходные характеристики ФЭМ.

Модель ФЭМ позволяет рассмотреть и изучить влияние температуры окружающей среды и уровня СИ на выходные характеристики фотоэлементов и эффективность работы установки в целом. Это позволяет оптимизировать настройки и параметры установки для максимальной эффективности и стабильности работы, а также прогнозировать ее работу в различных климатических условиях.

СИ максимально эффективно используется ФЭМ для генерации электричества. Чем выше интенсивность СИ, тем больше энергии может быть преобразовано в электрическую. Однако, при слишком высокой интенсивности СИ, возможно перегревание ФЭ и снижение их эффективности. Также, изменение уровня СИ может влиять на стабильность ФЭУ, что может привести к нестабильной выработке электричества

Рассмотрим влияние уровня СИ на выходные характеристики ФЭМ. На рисунке 2.15 приведено семейство ВАХ ФЭМ при изменении уровня солнечной инсоляции в диапазоне [1000-200] Вт/м². Анализ рисунка показывает, что при уменьшении уровня солнечной инсоляции уменьшается ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, причем ток короткого замыкания уменьшается быстрее, чем напряжение холостого хода.

Таким образом, снижение уровня СИ оказывает большее влияние на ток короткого замыкания, чем на напряжение холостого хода, что приводит к уменьшению выходной мощности ФЭМ. По мере уменьшения уровня СИ характеристика выходной мощности ФЭМ смещается вниз. График изменения выходной мощности ФЭМ от уровня СИ представлен на рисунке 2.16 и 2.17.

В настоящее время современные технологии преобразования солнечной энергии позволяют использовать лишь небольшую часть ее для производства электрической энергии в ФЭМ. Большая часть СИ преобразуется в тепло в

элементах ФЭМ, что приводит к повышенной рабочей температуре ФЭМ. В результате температура ФЭМ может быть значительно выше окружающей среды, что снижает ее эффективность. С другой стороны, температура окружающей среды также влияет на фотоэлектрический эффект в фотоэлементе. Повышение температуры может вызвать увеличение тепловой активации неосновных носителей заряда, что в конечном счете может привести к снижению фототока I_c и, соответственно, к уменьшению выходного напряжения U_c . График ВАХ ФЭМ при изменении температуры окружающей среды представлен на рисунке 2.18.

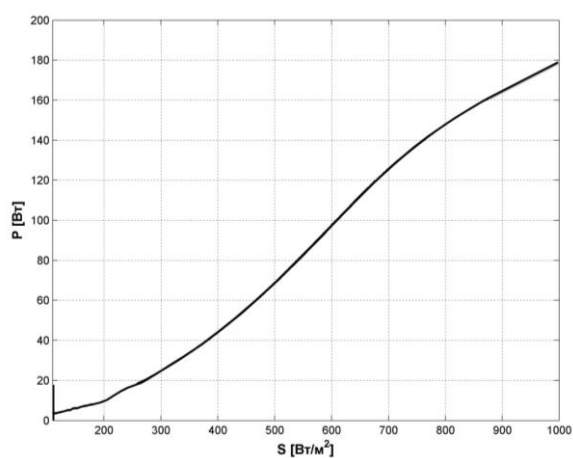


Рисунок 2.16 – Зависимость выходной мощности ФЭМ *TCM-201SB* от солнечной инсоляции

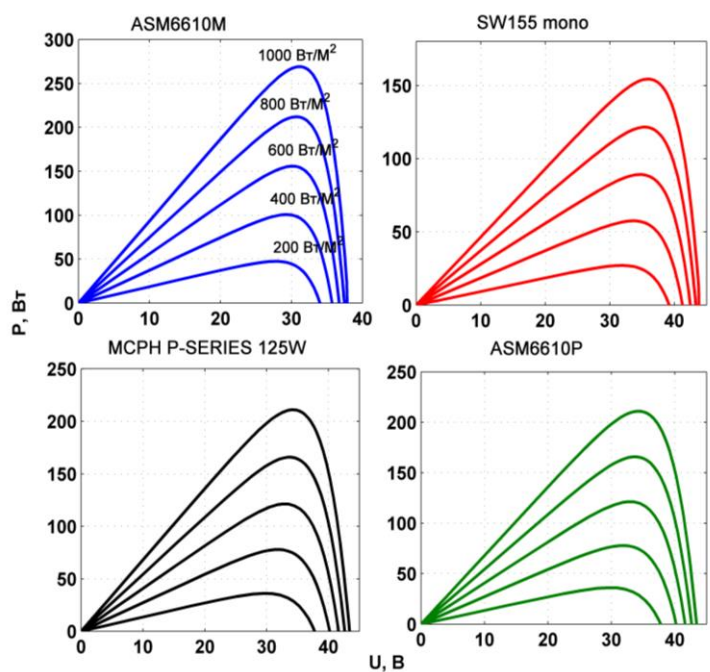


Рисунок 2.17 – ВВХ ФЭМ от изменения уровня СИ

В некоторых исследованиях было выявлено, что изменение температуры может оказывать влияние на эффективность ФЭМ. При этом эксперты отметили наличие линейной зависимости между температурой и эффективностью с отрицательным коэффициентом наклона [80,81].

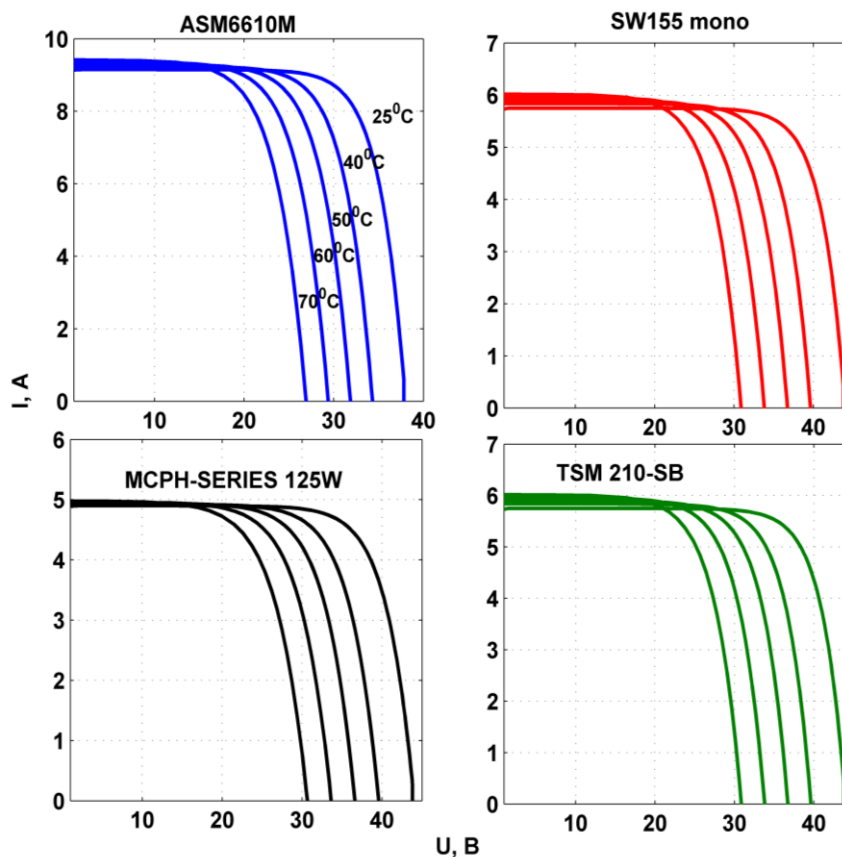


Рисунок 2.18 – ВАХ ФЭМ при изменении температуры

Как видно из рисунка, изменение температуры оказывает существенное влияние на напряжение холостого хода. При увеличении температуры от 25⁰С до 70⁰С напряжение холостого хода уменьшается на 18% (рис.2.19), в то время как ток короткого замыкания существенно не изменяется.

Из анализа представленных данных следует, что характер изменения этих параметров близок к линейному. При этом коэффициент наклона для U_{xx} является отрицательным и составляет величину около -0,4 %/°С. Изменение тока короткого замыкания $I_{кз}$ с ростом температуры также носит характер, близкий к линейному, но с весьма малым положительным коэффициентом наклона (порядка 0,06 %/°С). Как видно из рисунков 2.18 и 2.19, основным фактором,

снижающим вырабатываемую мощность ФЭМ при изменении температуры, является U_{xx} .

Ток короткого замыкания — это максимальный ток, который ФЭ может обеспечить. Влияние температуры на ток короткого замыкания намного меньше по сравнению напряжением холостого хода, поскольку энергия запрещенной E_{G0} зоны уменьшается, и большее количество фотонов имеет достаточно энергии для создания электронно-дырочной пары. Однако это оказывает небольшой эффект, и температурная зависимость тока короткого замыкания кремниевого ФЭ обычно составляет;

$$\frac{dI_{sc}}{dT} \approx 0.06 \% / ^\circ\text{C}$$

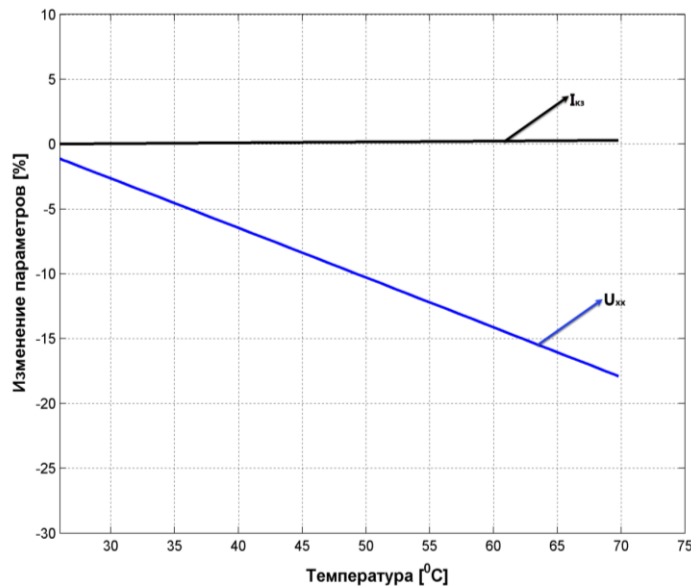


Рисунок 2.19 – Характеристика зависимости параметров ФЭМ от изменения температуры

Температурная зависимость ФЭМ отличаются, друг от друга и зависит от материала и состава полупроводника. Так, например, для ФЭМ на основе аморфного кремния температурные характеристики показывают меньшие зависимости по сравнению ФЭМ на основе кристаллического кремния. ФЭМ на основе Арсенида-галлия (GaAs), эффективно работает вплоть до 150°C [81]. Тонкопленочные ФЭМ на основе сульфита и кадмия сохраняют свою эффективность до 100°C [81]. В паспортах, выпускаемых ФЭМ приводится

зависимость выходных параметров от температуры. Один из основных параметров показывающий влияние температуры на выходные характеристики ФЭМ является температурный коэффициент напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и максимальной мощности который зависит от материала и состава ФЭМ (таблица 2.5). Фотоэлектрический температурный коэффициент мощности показывает, насколько сильно выходная мощность ФЭМ зависит от температуры ячейки. Данный коэффициент является отрицательным числом, потому что выходная мощность уменьшается с ростом температуры ячеек.

Таблица 2.5. Температурный коэффициент ФЭМ

Тип ФЭМ	$\alpha_{P_{max}}, \%/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_{I_{SC}}, \%/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_{U_{CO}}, \%/^{\circ}\text{C}$
Поликристаллический Si	-0.48	0.032	-0.41
Монокристаллический Si	-0.46	0.091	-0.36
Монокристалл-аморфный Si	-0.30	0.013	-0.43
Тонкопленочный аморфный Si	-0.20	0.084	-0.57
Тонкопленочный CIS	-0.16	0.019	-0.44

Зависимость эффективности фотоэлементов от температуры при переменных погодных и эксплуатационных условиях проанализирована в работах [82,83,86,87].

Для оценки достоверности модели на кафедре электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) проводилось экспериментальное исследование характеристик ФЭМ типа *TSM-210SB* на базе тестовой фотоэлектрической станции (ТФЭС), установленной в рамках соглашения о научном сотрудничестве в области возобновляемой энергетики между УГАТУ и ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе [33,34,71,72].

Исследование проводилось при изменении уровня СИ от 1000 до 300 Вт/м², которая является наиболее доступной на широте Республики Башкортостан. Результаты сравнения приведены в таблице 2.1 и рисунке 2.10.

В процессе экспериментальных исследований характеристик ФЭУ

TSM-210SB были рассмотрены следующие вопросы:

1. Анализ влияния уровня солнечной инсоляции и температуры окружающей среды на выходные параметры ФЭМ;
2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных;
3. Расчет степени погрешности и корректировки параметров модели при необходимости.

Объектами исследования являются два ФЭМ, изготовленных по различным технологиям. Тонкопленочный ФЭМ (*PramacLuce*), выполненный на основе аморфного и микрокристаллического кремния, имеет толщину активных слоев не более 1,5 микрон. Второй ФЭМ (*TSM-210SB*) выполнен на основе пластин кристаллического кремния и имеет толщину активного слоя не менее 180 микрон, что обеспечивает максимальный коэффициент преобразования световой энергии в электрическую, но при этом существенно дорожает производство. Основные эксплуатационные характеристики ФЭМ приведены в таблице 2.4.

Сбор и передача накопленных данных ФЭМ осуществляются через централизованный *web* – сервер, подключенный к телекоммуникационным сетям с выделенным фиксированным *IP*-адресом. Электронный регистратор фиксирует значения следующих параметров в энергонезависимой памяти:

- 1) Вырабатываемый ток и напряжение в точке оптимальной мощности двух ФЭУ;
- 2) Вырабатываемая электрическая мощность;
- 3) Температура на тыльной поверхности ФЭУ;
- 4) Уровень солнечной инсоляции, измеренной кремниевым фотоприемником, работающим в режиме короткого замыкания;
- 5) Температура окружающей среды;

б) Скорость и направление ветра.

Внешний вид ФЭМ, установленных на крыше научно-исследовательской лаборатории УГАТУ и шкаф управления ТФЭС приведены на рисунках 2.20 и 2.21 соответственно.

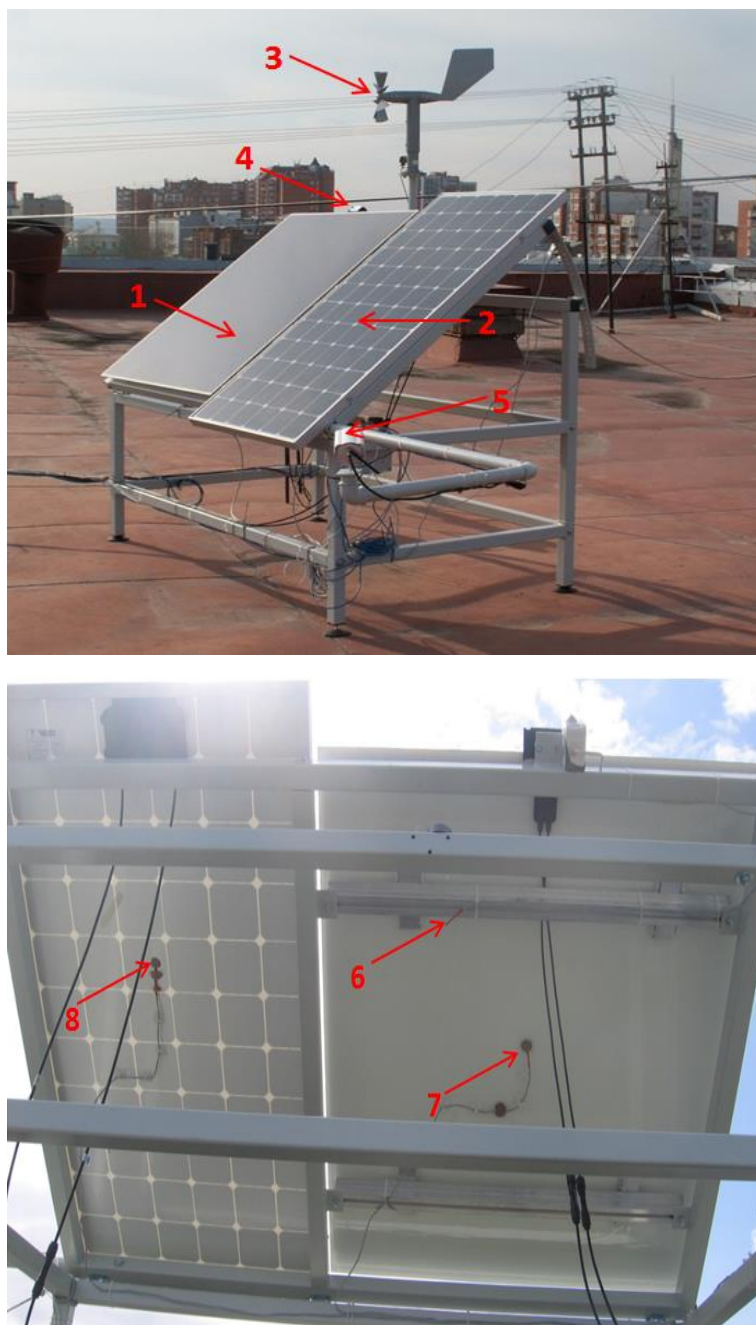


Рисунок 2.20 – Внешний вид опорной конструкции ТФЭС с размещенными на ней ФЭМ.

Обозначения:

1 – ФЭМ 1,

2 – ФЭМ 2,

- 3 – датчик скорости и направления ветра,
- 4 – датчик СИ,
- 5 – камера наблюдения,
- 6 – температурный датчик окружающей среды,
- 7 – температурный датчик задней поверхности ФЭМ 1,
- 8 – температурный датчик ФЭМ 2

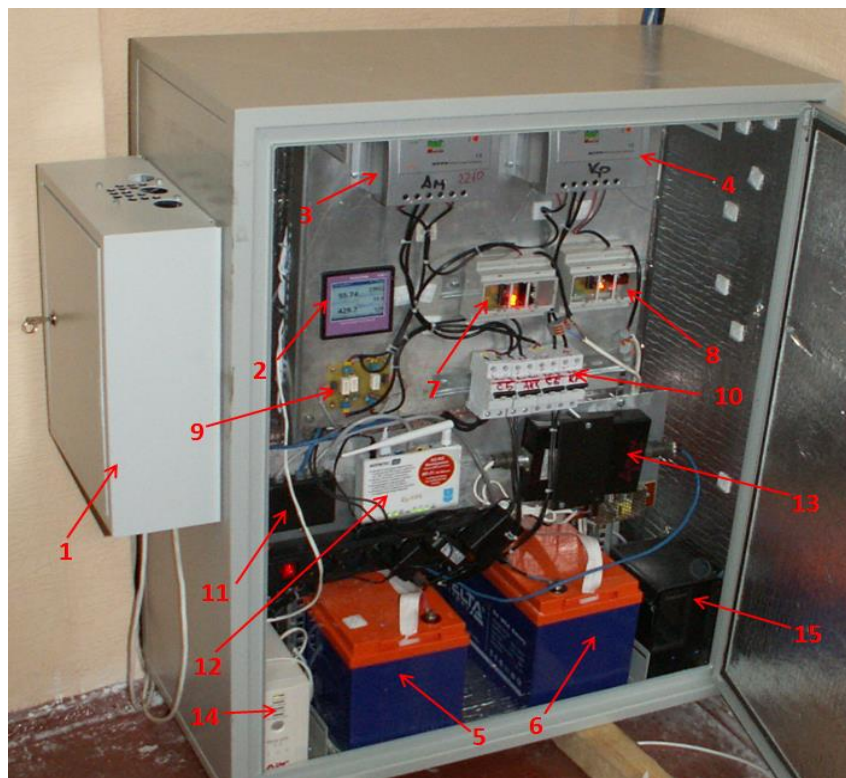


Рисунок 2.21 – Термошкаф с обозначениями размещенных в нем компонентов системы управления, регистрации и передачи данных

Обозначения:

- 1 – блок электрической нагрузки,
- 2 – электронный регистратор данных,
- 3 – регулятор заряда АКБ ФЭУ 1,
- 4 - регулятор заряда АКБ ФЭУ 2,
- 5 – АКБ ФЭУ 1,
- 6 – АКБ – ФЭУ 2,
- 7 – регулятор разряда АКБ ФЭУ 1,
- 8 – регулятор разряда АКБ ФЭУ 2,

- 9 – измерительная плата, 1
- 0 – предохранительные автоматы,
- 11 - сетевой коммутатор,
- 12 – роутер с поддержкой 3G модема,
- 13 – устройство согласования сигнала датчика ветра,
- 14 – блок бесперебойного питания,
- 15 - сетевой диск.

На основе полученных данных произведена верификация математической модели ФЭУ (рис. 2.22 и таблица 2.6).

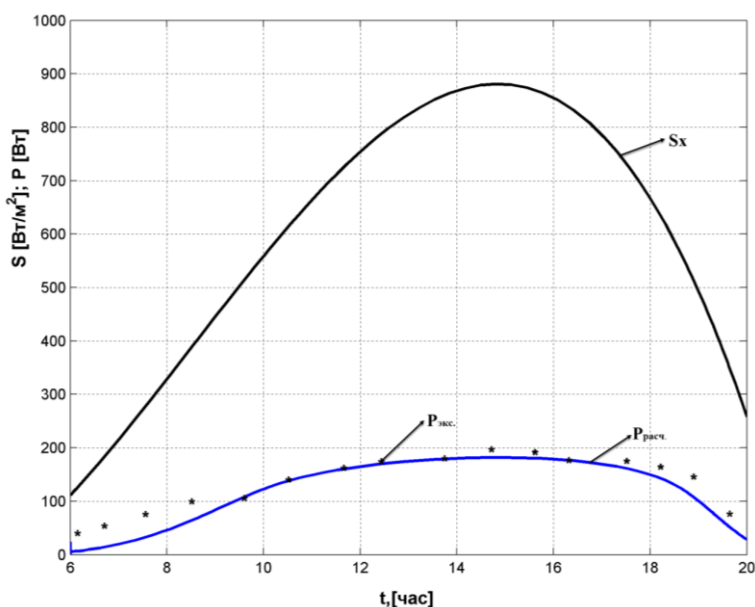


Рисунок 2.22 – Диаграмма изменения выходной мощности ФЭУ TCM-210SB в зависимости от уровня СИ за один день.

Из таблицы видно, что результаты модели совпадают с результатами эксперимента с точностью от 5% до 15%, большие отклонения получаются при малых значениях уровня СИ. Важно отметить, что диапазон работы данной модели при допустимых отклонениях (меньше 5%) действителен для уровня СИ более 300 Вт/м². При значениях $S_x < 300 \text{ Вт/м}^2$ модель дает большие отклонения от реальной ФЭМ, что является основным недостатком данной модели. Для устранения этого недостатка применяются специальные корректировочные коэффициенты в уравнениях (2.19).

$$\begin{cases} C_{SU} = 1 + \beta_T \alpha_s (S_x - S_c) + k_{SU} \\ C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_c} (S_x - S_c) + k_{SI} \end{cases} \quad (2.21)$$

Таблица 2.6. Сравнение экспериментальных и расчетных данных

$S, \text{Вт/м}^2$	$T, \text{°C}$	$I_{\text{вых.}}, \text{А}$		$U_{\text{вых.}}, \text{В}$		$P_{\text{вых.}}, \text{Вт}$	
		Расч.	Экс.	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.
302,3	21	2,2	1,6	22	35,5	48,4	56,5
408,8	25	2,9	2,5	26,5	35,4	76	76,1
505,5	36	3,3	2,6	30,1	35	103,7	94,2
607,1	33	3,7	3,3	33,7	35	123	115,2
717	32	4,2	3,9	34,5	34,7	146	133,4
794	33	4,4	4,4	35,5	34,5	157,1	152,8
911	32	4,9	4,6	36,7	34,3	169	161
1000	33	5,2	5,2	36,9	36,3	194	189

Расчет и выбор коэффициентов произведен по методу наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов дает возможность уменьшить квадрат ошибки между экспериментальными и теоретическими данными согласно следующему выражению [82-86]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n-1} (P_i - P_{xi})^2} \rightarrow \min \quad (2.22)$$

Согласно заданию метода наименьших квадратов составлен генетический алгоритм, который производит оптимизацию ФЭМ и рассчитывает коэффициенты k_{SU} , k_{SI} . Программа генетического алгоритма (ГА) расчета коэффициентов методом наименьших квадратов приводится в **приложении 4**. В результате расчета получаем следующие коэффициенты:

$$k_{SU} = k_{SI} = 0.247.$$

Результаты изменения выходной мощности ФЭМ от уровня СИ при значениях $S_x < 300 \text{ Вт/м}^2$ при корректировочных коэффициентах $k_{SU} = k_{SI} = 0.247$ приведены на рисунке 2.23.

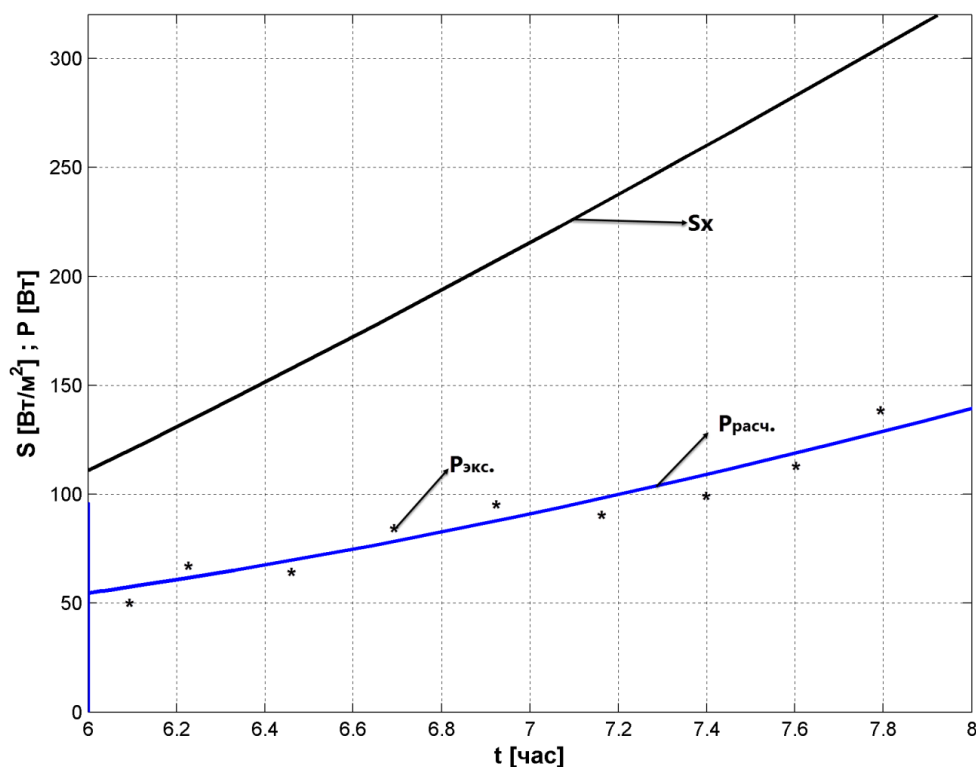


Рисунок 2.23 – Диаграмма изменения выходной мощности ФЭМ типа ТСМ-210SB в зависимости от уровня СИ

Анализ диаграммы показывает, что ошибка по мощности между расчетными и экспериментальными данными составляет менее 7%. Это означает, что математическая модель ФЭМ достаточно точно предсказывает мощность, генерируемую ФЭМ. Такая невеликая ошибка свидетельствует о хорошей сходимости модели с реальными данными. Дальнейшее использование

разработанной модели может быть полезно для исследования и проектирования солнечных электростанций. Модель позволит предсказывать и оптимизировать энергетическую эффективность и производительность ФЭМ в различных условиях. Это поможет разработчикам оптимизировать конструкцию и расположение ФЭМ, учитывая различные факторы, такие как географические условия, климатические факторы и технические параметры. Также модель может быть использована для оценки эффективности различных технологий и инноваций в солнечных электростанциях.

В целом, разработанная математическая и компьютерная модель ФЭМ является полезным инструментом для исследований и проектирования солнечных электростанций, позволяющим с достаточной точностью предсказывать и оптимизировать производительность ФЭМ.

2.3. Математическая модель DC/DC преобразователя

Импульсные преобразователи постоянного тока (DC/DC преобразователи) используются для регулирования напряжения постоянного тока [87-92]. Основная задача DC/DC преобразователей заключается в обеспечении нагрузки постоянным напряжением U_H , отличающимся от входного напряжения $U_{ВХ}$. Иногда требуется обеспечивать стабилизацию выходного напряжения U_H , при изменении входного напряжения $U_{ВХ}$ и тока нагрузки или изменять U_H по определенному закону независимо от $U_{ВХ}$.

Выходное напряжение таких преобразователей представлено последовательностью импульсов прямоугольной формы, где каждый импульс имеет длительность t_p и следует за паузой t_n (рис. 2.24). Амплитуда этих импульсов близка к входному напряжению $U_{ВХ}$, в то время как среднее значение выходного напряжения составляет U_H .

Основой работы DC/DC преобразователя является ключевой режим действия регулирующего полупроводникового компонента. В большинстве случаев в качестве полупроводникового компонента используются транзисторы. Они периодически подключают входное напряжение $U_{ВХ}$ к выходной цепи

преобразователя.

Одним из ключевых аспектов регулирования выходного напряжения DC/DC преобразователя является использование импульсных методов, которые позволяют изменять параметры выходных сигналов. В настоящее время используются методы широтно-импульсного регулирования (ШИР), частотно-импульсного регулирования (ЧИР) и их комбинация.

Метод ШИР заключается в изменении продолжительности выходных импульсов t_p при сохранении постоянного периода их последовательности.

$$T = t_p + t_n = \text{const}; f = \frac{1}{T} = \text{const} \quad (2.23)$$

Среднее значение выходного напряжения преобразователя при ШИР:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{t_p}{T} U_{\text{ВХ}} = D U_{\text{ВХ}} \quad (2.24)$$

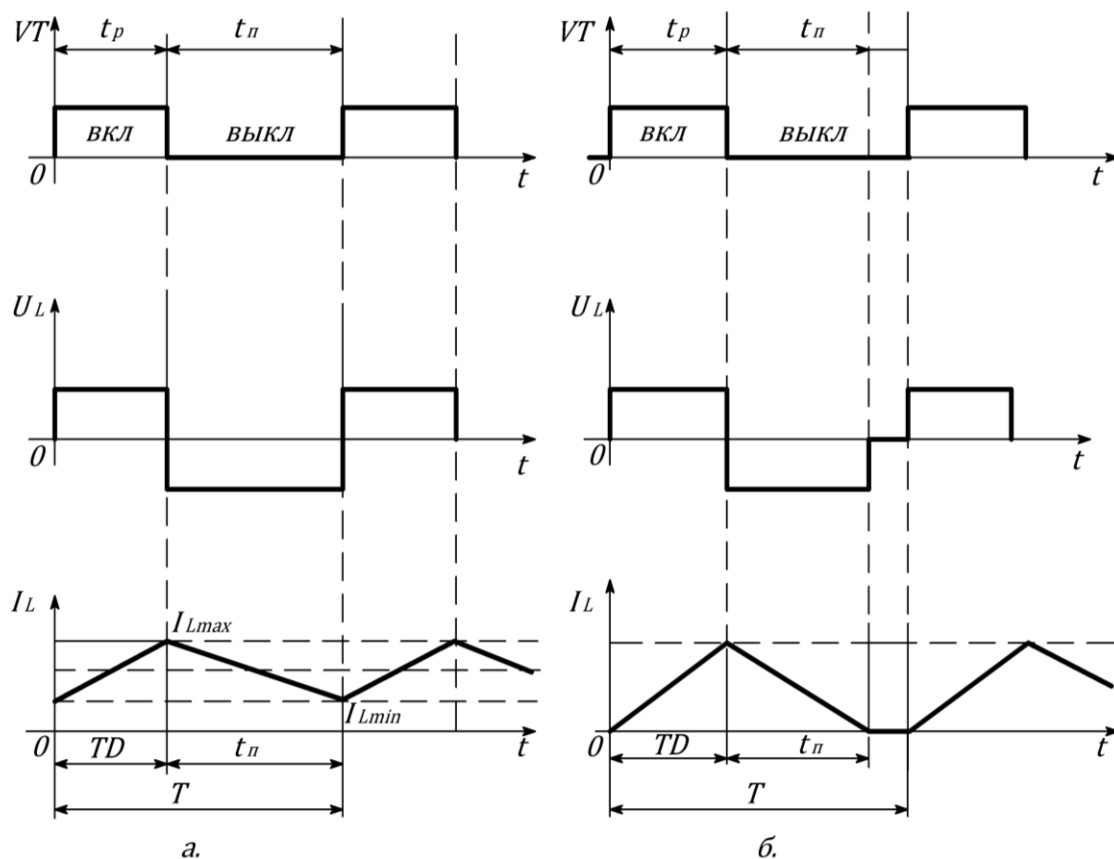


Рисунок 2.24 – Диаграмма выходного тока, напряжения на индуктивном элементе и состоянии транзисторного ключа DC/DC преобразователя; **а).** в режиме непрерывного тока; **б).** в режиме прерывистых токов

где $D = \frac{t_p}{T}$ - коэффициент регулирования или скважность импульсов.

Необходимо отметить, что уравнение (2.24) может меняться в зависимости от типа преобразователя.

Согласно данной формуле, диапазон изменения выходного напряжения DC/DC преобразователя с широтно-импульсной модуляцией составляет от нуля ($t_p = 0$; $D=0$) до значения входного напряжения $U_{вх}$ ($t_p = T$; $D=1$).

Регулирование частоты следования выходных импульсов при сохранении неизменной длительности $t_p = const$ осуществляется с помощью частотно-импульсного регулирования (ЧИР). Основная функция ЧИР заключается в изменении частоты выходных импульсов с целью достижения необходимых регулировочных возможностей преобразователя. Таким образом, ЧИР позволяет искусственно контролировать частоту импульсов, получаемых на выходе преобразователя, не изменяя их длительности. Это обеспечивает уникальность регулировочных возможностей преобразователя при соблюдении соотношения, определяющего его характеристики. Регулировочные возможности преобразователя характеризуются соотношением:

$$f = \frac{1}{T} = var; U_H = \frac{t_p}{T} U_{вх} = t_p f U_{вх} \quad (2.25)$$

Выходному напряжению $U_{вх}$ соответствует предельная частота следования импульсов, равная $\frac{1}{t_p}$, а нулевому выходному напряжению $f \rightarrow 0$.

Метод совместного использования широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) основан на изменении двух параметров выходных импульсов - длительности импульсов (t_p) и частоты их появления f и является эффективным и гибким подходом для управления электронными системами.

В зависимости от соотношения выходного напряжения к входному DC/DC преобразователи делятся на следующий вид:

1. Повышающий преобразователь (DC-DC boost)
2. Понижающий преобразователь (DC-DC buck)

3. Понижающе-повышающий преобразователь (DC-DC boost - buck)

2.3.1. Повышающий преобразователь

Повышающий преобразователь (DC-DC boost) — это преобразователь постоянного тока в постоянный, который повышает напряжение (одновременно понижая ток) от своего входа (питания) к выходу (нагрузке). Это класс импульсного источника питания (SMPS), содержащий как минимум два полупроводника (диод и транзистор) и как минимум один элемент накопления энергии: конденсатор, катушка индуктивности или оба в комбинации. Чтобы уменьшить пульсации напряжения, к выходу (фильтр на стороне нагрузки) и входу (фильтр на стороне питания) такого преобразователя обычно добавляются фильтры из конденсаторов (иногда в сочетании с катушками индуктивности).

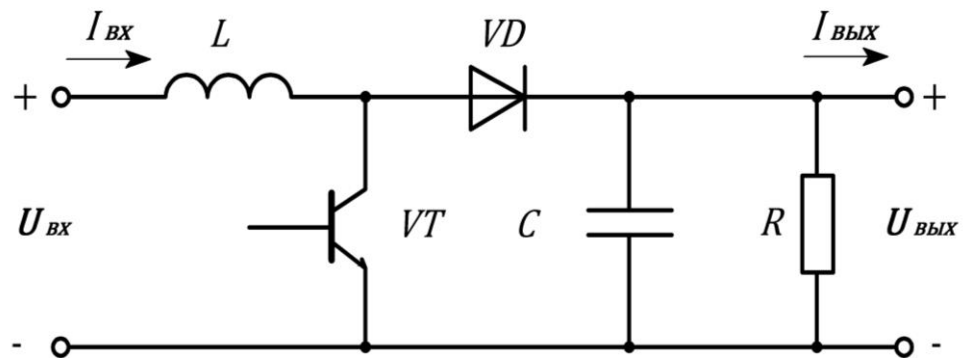


Рисунок 2.25 – Электрическая схема повышающего преобразователя

Вывод уравнений проведём с применением схем замещения преобразователя (рис. 2.25) для различных состояний транзисторного ключа.

Запишем уравнения по законам Кирхгофа:

Для схемы на рисунке 2.26.а

$$\begin{cases} L \frac{dI_{ВХ}}{dt} + U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \\ I_{ВЫХ} + C \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

Для схемы на рисунке 2.26.б

$$\begin{cases} L \frac{dI_{ВХ}}{dt} = U_{ВХ} \\ I_{ВЫХ} + C \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} = I_{ВХ} \end{cases} \quad (2.27)$$

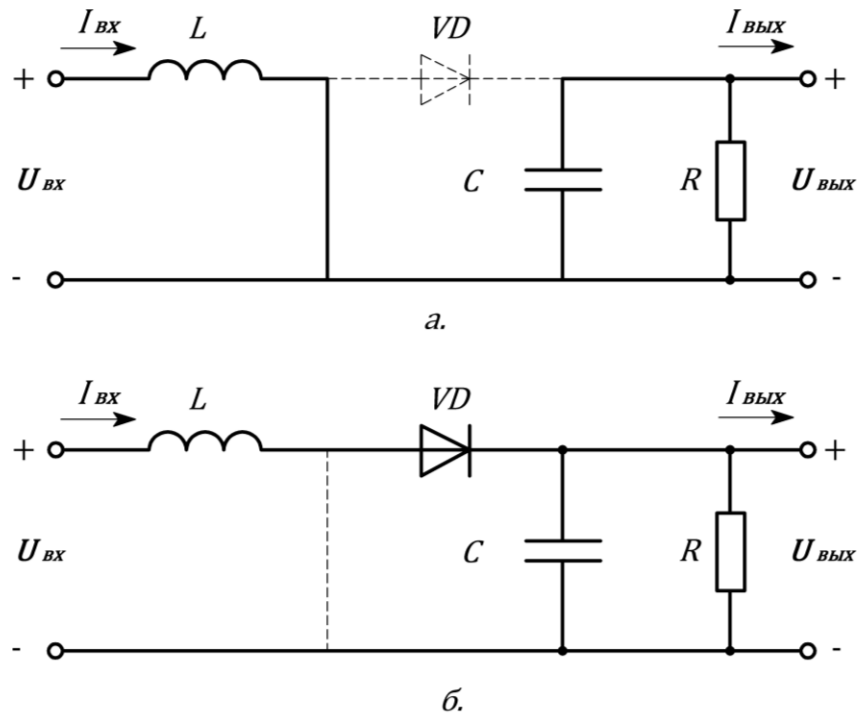


Рисунок 2.26 – Электрическая схема повышающего преобразователя при замкнутом (а) и разомкнутом ключе (б).

Объединим эти две системы уравнений в одну путём введения переменной D , которая представляет скважность импульсов. Таким образом, система дифференциальных уравнений для описания электромагнитных процессов в преобразователе будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{ВХ}}}{dt} = \frac{1}{L} (U_{\text{ВХ}} - (1 - D) \cdot U_{\text{ВЫХ}}) \\ \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{1}{C} ((1 - D) \cdot I_{\text{ВХ}} - I_{\text{ВЫХ}}) \end{cases} \quad (2.28)$$

Текущее значение скважности импульсов, обозначаемое как D , может быть представлено как непрерывная ($D=1$) или импульсная периодическая ($D < 1$) функция времени.

Система уравнений (2.28) в операторной форме примет следующий вид

$$\begin{cases} sI_{\text{ВХ}} = \frac{1}{L} (U_{\text{ВХ}} - (1 - D) \cdot U_{\text{ВЫХ}}) \\ sU_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{C} ((1 - D) \cdot I_{\text{ВХ}} - I_{\text{ВЫХ}}) \\ I_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R} \end{cases} \quad (2.29)$$

На основании уравнений математической модели повышающего преобразователя (2.28) построим структурную схему (рис. 27).

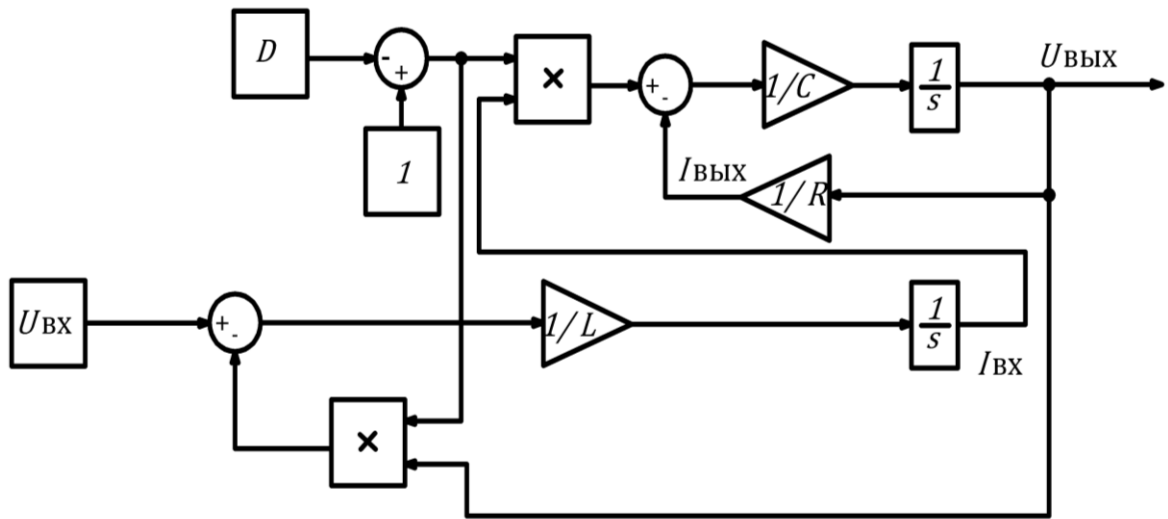


Рисунок 2.27 – Структурная схема повышающего преобразователя

Используя структурную схему преобразователя (рис. 2.27), мы можем получить передаточную функцию по входному току. Это обусловлено тем, что входной ток является формируемым током для нагрузки испытываемой солнечной электростанции (СЭС).

$$\begin{aligned}
 W_{\Pi}(s) &= \frac{I_{\text{вх}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{\frac{1}{Ls}}{1 + (1 - D)^2 \cdot \frac{R}{Ls(RCs + 1)}} = \\
 &= \frac{1}{(1 - D)^2 \cdot R} \cdot \frac{RCs + 1}{\frac{LC}{(1 - D)^2} \cdot s^2 + \frac{1}{(1 - D)^2} \cdot \frac{L}{R} \cdot s + 1} = \\
 &= \frac{RCs + 1}{LRCs^2 + Ls + (1 - D)^2 \cdot R} \quad (2.30)
 \end{aligned}$$

Передаточная функция (2.30) представлена в стандартной форме и имеет параметры, которые нелинейно зависят от скважности импульсов D . Эта функция применяется для описания динамики повышающего преобразователя в режиме непрерывного тока, который характеризуется определенным значением индуктивности [91].

$$L_{\text{гп}} = R \cdot \frac{D(1 - D)^2}{2f} \quad (2.31)$$

2.3.2. Понижающий преобразователь

Понижающий преобразователь — это электронное устройство, которое преобразует постоянный ток с понижением напряжения (с одновременным увеличением тока) от источника питания к нагрузке. Импульсные понижающие преобразователи обладают значительно более высокой энергоэффективностью в качестве преобразователей постоянного тока в постоянный по сравнению с линейными стабилизаторами. Линейные стабилизаторы имеют более простые схемы, которые снижают напряжение путем рассеивания энергии в виде тепла, однако они неспособны увеличивать выходной ток.

Коэффициент полезного действия понижающих преобразователей может быть очень высоким, часто более 90 %, что делает их полезными для таких задач, как преобразование основного напряжения питания компьютера, уменьшения выходного напряжения солнечной панели и т.п.

Понижающие преобразователи обычно содержат как минимум два полупроводника (диод и транзистор, хотя современные понижающие преобразователи часто заменяют диод вторым транзистором, используемым для синхронного выпрямления) и как минимум один элемент накопления энергии (конденсатор, катушка индуктивности или оба в комбинации). Чтобы уменьшить пульсации напряжения, к выходу (фильтр на стороне нагрузки) и входу (фильтр на стороне питания) такого преобразователя обычно добавляются фильтры из конденсаторов (иногда в сочетании с катушками индуктивности).

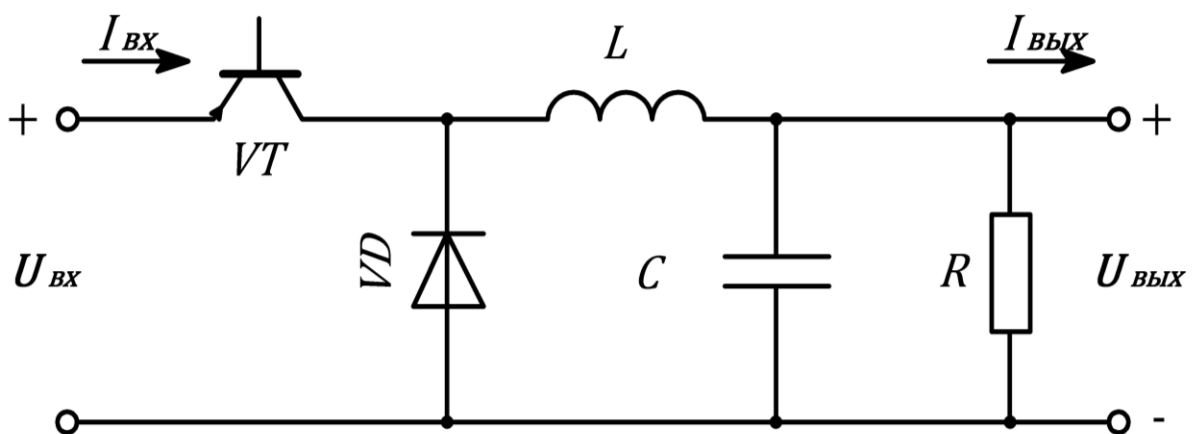


Рисунок 2.28 – Электрическая схема понижающего преобразователя напряжения

Применяемые в понижающих преобразователях переключения обычно варьируются в диапазоне от 100 кГц до нескольких МГц. Большая частота переключения позволяет использовать более компактные катушки индуктивности и конденсаторы, при этом, однако, возникает определенный недостаток – увеличение потерь эффективности в связи с более частыми переключениями транзисторов. Электрическая схема импульсного понижающего преобразователя представлена на рисунке 2.28

Из-за дискретности транзисторного ключа понижающий преобразователь имеет два режима при замкнутом (рис. 2.29.а) и разомкнутом ключе (рис.2.29. б).

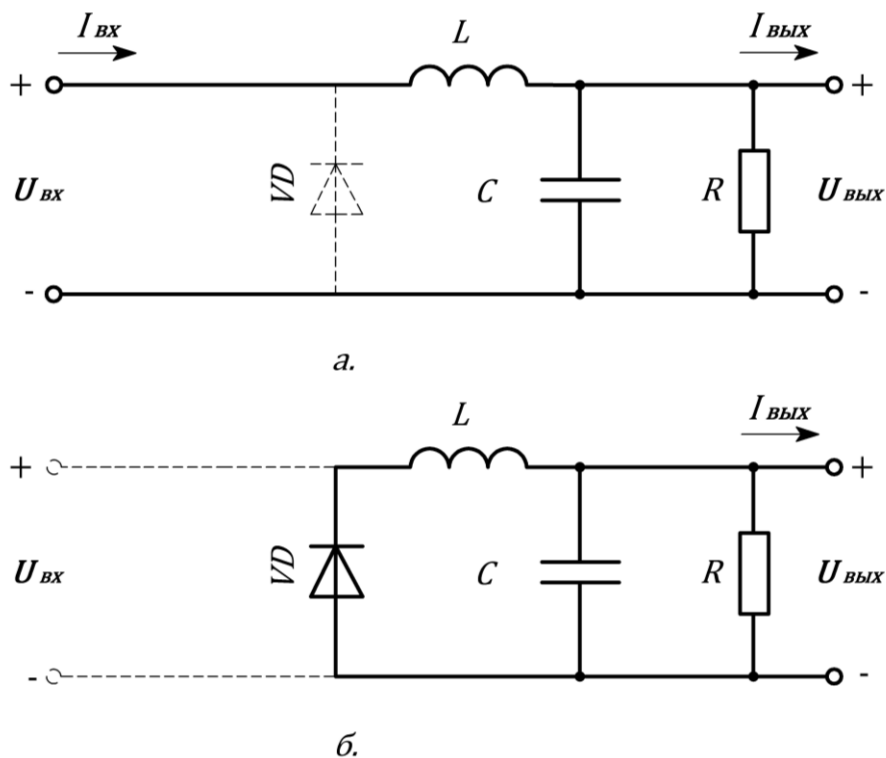


Рисунок 2.29 – Электрическая схема понижающего преобразователя при замкнутом (а) и разомкнутом ключе (б).

Электромагнитные переходные процессы в понижающем преобразователе описываются следующими уравнениями,

когда транзисторный ключ включен

$$\begin{cases} L \frac{dI_{BX}}{dt} = U_{BX} - U_{VЫX} \\ C \frac{dU_C}{dt} = I_{BX} - I_{VЫX} \end{cases} \quad (2.32)$$

когда транзисторный ключ выключен

$$\begin{cases} L \frac{dI_{\text{ВХ}}}{dt} = -U_{\text{ВЫХ}} \\ C \frac{dU_c}{dt} = I_{\text{ВХ}} - I_{\text{ВЫХ}} \\ I_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R} \end{cases} \quad (2.33)$$

Объединим эти две системы уравнений в одну путём введения переменной D , которая представляет скважность импульсов.

$$\begin{cases} L \frac{dI_{\text{ВХ}}}{dt} = U_{\text{ВХ}} \cdot D - U_{\text{ВЫХ}} \\ C \frac{dU_c}{dt} = I_{\text{ВХ}} - I_{\text{ВЫХ}} \\ I_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R} \end{cases} \quad (2.34)$$

Переводим систему уравнений (2.34) в операторную форму

$$\begin{cases} I_{\text{ВХ}} = \frac{1}{LS} (U_{\text{ВХ}} \cdot D - U_{\text{ВЫХ}}) \\ U_c = \frac{1}{CS} (I_{\text{ВХ}} - I_{\text{ВЫХ}}) \\ I_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R} \end{cases} \quad (2.35)$$

Используя математическую модель (2.16), построим структурную схему понижающего преобразователя (рис.2.30).

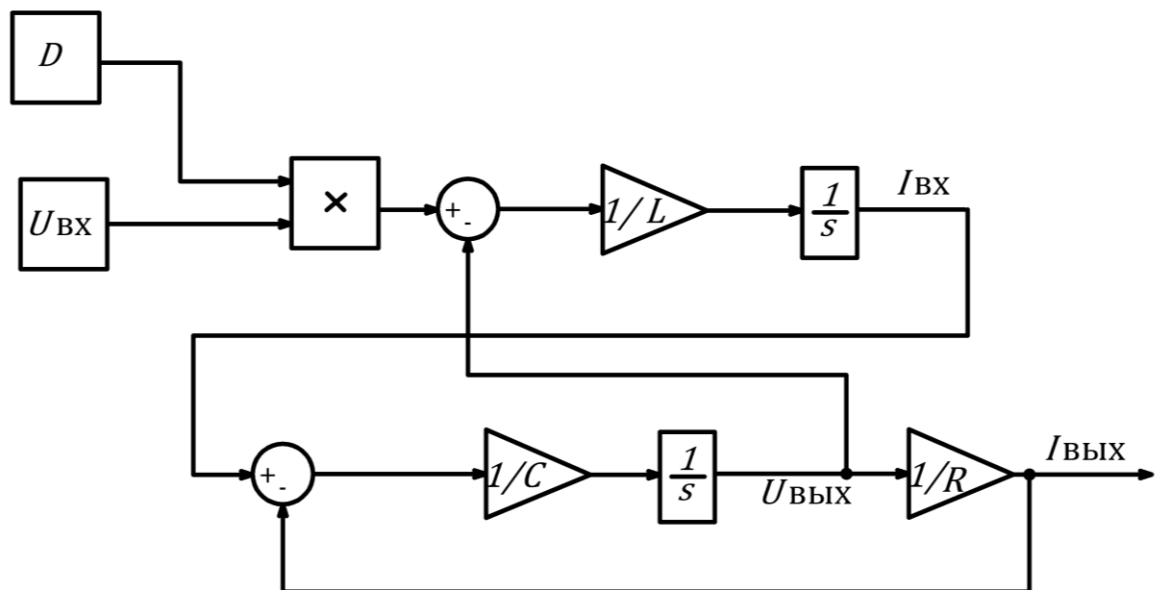


Рисунок 2.30 – Структурная схема понижающего преобразователя

На основании уравнения математической модели (2.29) и структурной схемы повышающего преобразователя построим имитационную модель данного преобразователя на платформе Matlab/Simulink (рис.2.21). При проведении данных вычислительных экспериментов использовалась повышающий DC-DC преобразователь со следующими параметрами элементов:

- повышающий преобразователь: $U_{in} = 100$ В; $L=5$ мГн; $C=12000$ мкФ; $f_{PWM}=10$ кГц; $R=1$ Ом; $D = 0.5$.

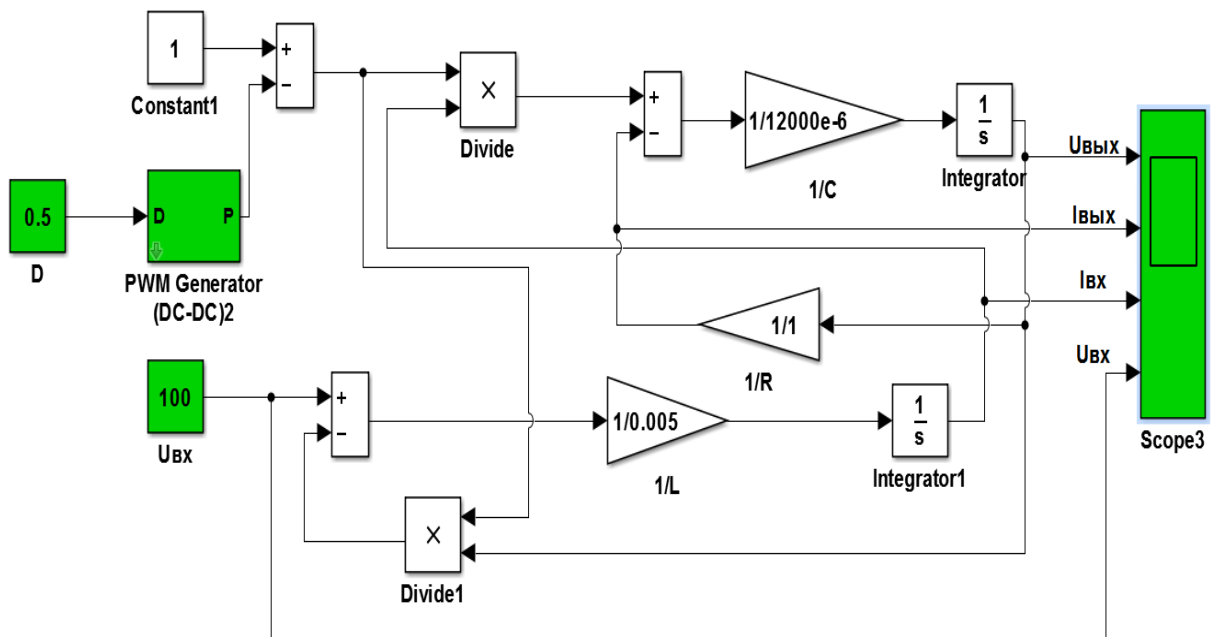


Рисунок 2.31 – Имитационная модель повышающего DC – DC преобразователя

Результаты моделирования, повышающего DC – DC преобразователя представлен на рисунке 2.32. Анализ рисунка показывает, что при заданных параметрах входного напряжения 100В и скважности импульсов модель повышает входное напряжение до 200 В и уменьшает ток.

Для проверки адекватности модели используем эталонную модель реализованная на базе элементов библиотеки SimPowerSystem в среде Matlab/Simulink и содержащая нелинейные элементы – транзисторный ключ VT и диод VD (рис.2.33). Эталонная модель DC-DC преобразователя позволяет исследовать его работу в условиях различных входных сигналов и параметров элементов, а также производить анализ и оптимизацию различных характеристик преобразователя без фактической реализации физической схемы.

Особенности моделирования и исследования устройств силовой электроники в среде Matlab/Simulink иллюстрируются в работе [99]

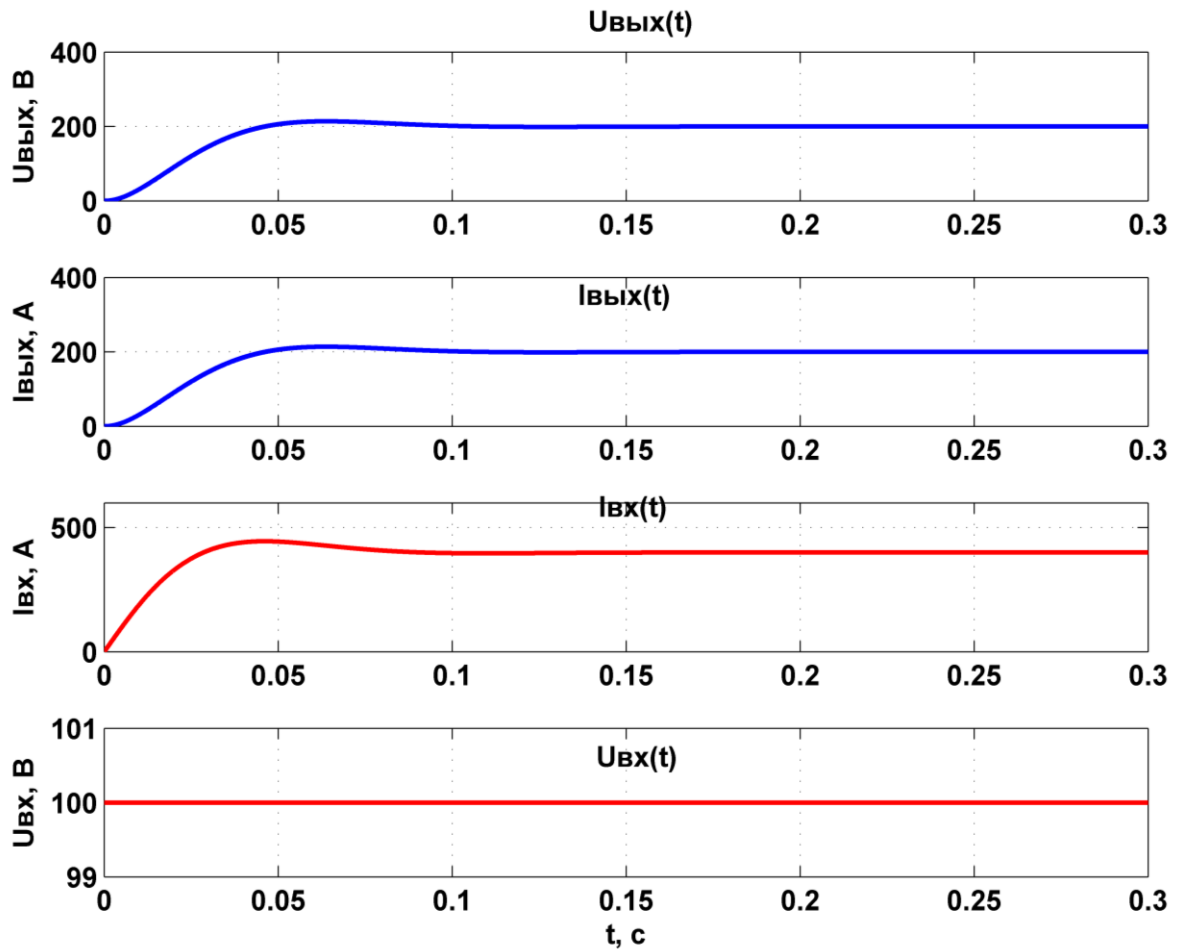


Рисунок 2.32 – Временная диаграмма параметров повышающего DC – DC преобразователя

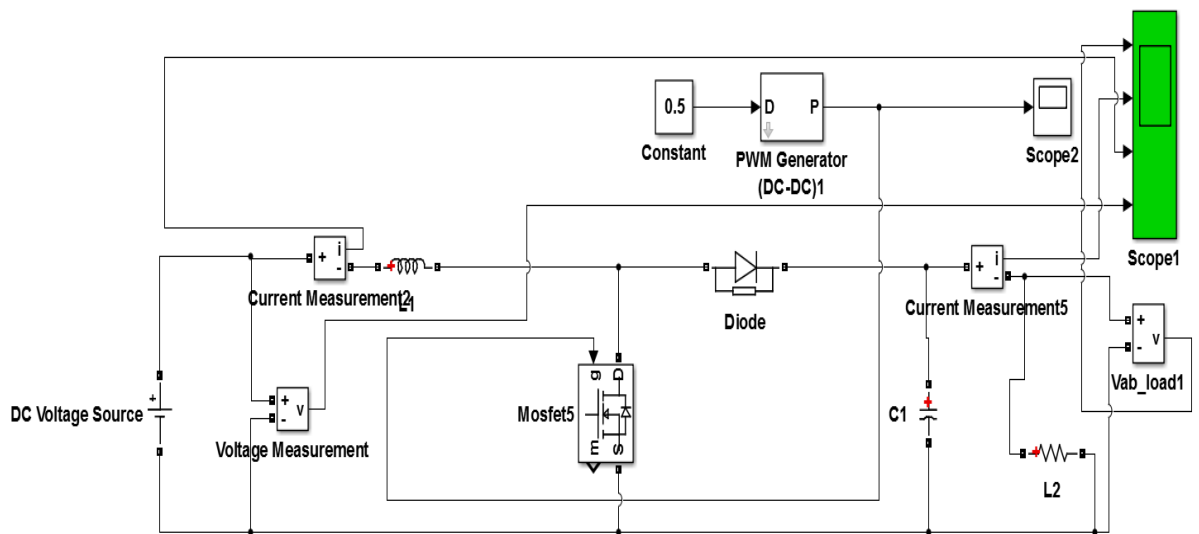


Рисунок 2.33 – Эталонная модель повышающего DC – DC преобразователя

Полученные диаграммы показали хорошее соответствие с эталонной моделью (рис. 2.34). Это открывает широкие возможности для использования математической и имитационной моделей, повышающего DC-DC преобразователя в решении поставленных задач исследований. Такие модели могут быть полезны для разработки и анализа эффективности преобразователей, а также для улучшения их характеристик.

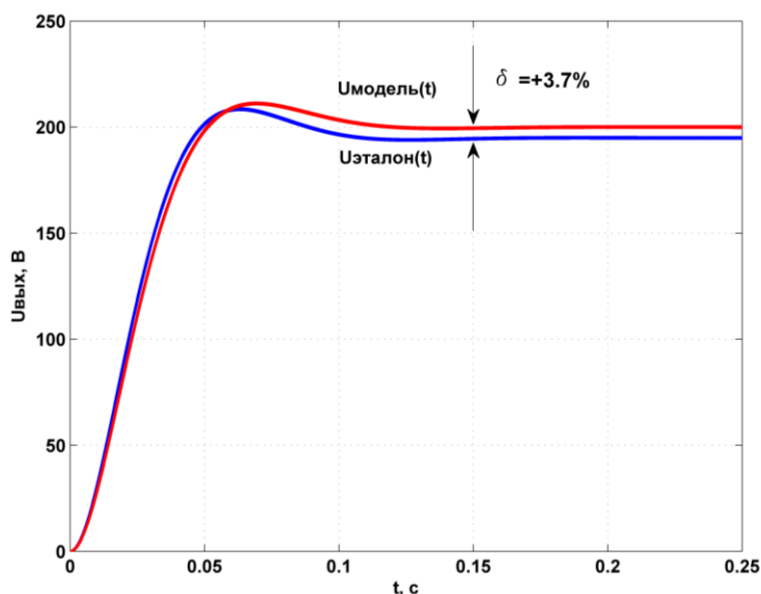


Рисунок 2.34 – Сравнение результатов модели с эталонной по выходному напряжению

2.3.3. Модель электрической нагрузки DC-DC преобразователя

Характер нагрузки преобразователя напряжения ФЭУ определяется схемой построения электростанции. Для ФЭС, построенной по схеме, приведенной на рисунке 1.11, режимы работы DC-DC преобразователя можно считать эквивалентными режимам работы на нагрузку с активным сопротивлением, в схеме, приведенной на рисунке 1.9 нагрузкой преобразователя, является аккумуляторная батарея.

При построении имитационной модели ФЭУ нагрузка преобразователя моделировалась в виде отдельного функционального блока (рис. 2.35), что позволяет легко изменять конфигурацию исследуемой системы. Это позволяет исследовать различные варианты конфигурации ФЭУ и их влияние на общую эффективность работы системы. Кроме того,

такой подход позволяет изучить влияние различных параметров нагрузки на работу ФЭУ, таких как напряжение и ток нагрузки.

Представление нагрузки в виде отдельного функционального блока также позволяет вносить изменения в модель без необходимости менять всю систему. Например, можно легко заменить нагрузку на другую модель или изменить ее параметры для исследования их влияния на производительность ФЭУ.

Имитационная модель ФЭУ должна учитывать все основные компоненты системы, включая ФЭМ, преобразователь и нагрузку. Поэтому представление нагрузки в виде отдельного функционального блока является важной составляющей модели и позволяет реалистично смоделировать работу всей системы.

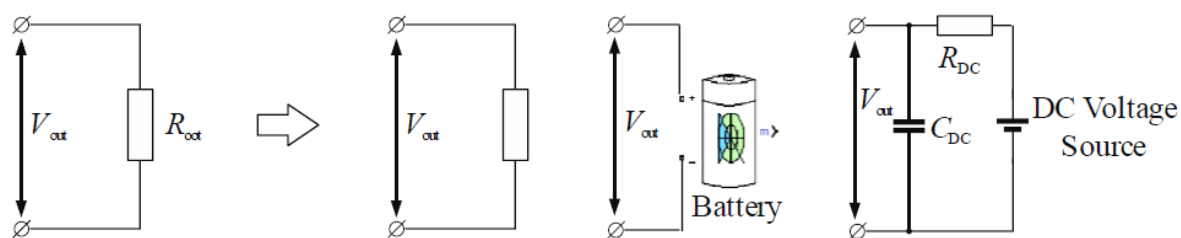


Рисунок 2.35 – Функциональные блоки нагрузки преобразователя напряжения имитационной модели ФЭУ

2.4. Модель контроллера поиска ТММ ФЭУ

Контроллер является важной составляющей систему управления фотоэлектрической системы и его основной задачей является обеспечение максимального сбора энергии с ФЭУ, учитывая изменения освещенности и температуры ФЭМ. Для выполнения этой функции контроллер должен использовать определенный алгоритм, который поможет определить оптимальное значение напряжения точки ТММ ФЭМ.

Алгоритм работы контроллера заключается в определении значения коэффициента D , при котором выходное напряжение ФЭМ будет соответствовать напряжению ТММ. Поддерживая постоянную измерительную и мониторинговую функцию, контроллер анализирует значения освещенности, температуры ФЭМ и соответствующим образом

регулирует значение коэффициента D , чтобы максимизировать выходную мощность ФЭУ.

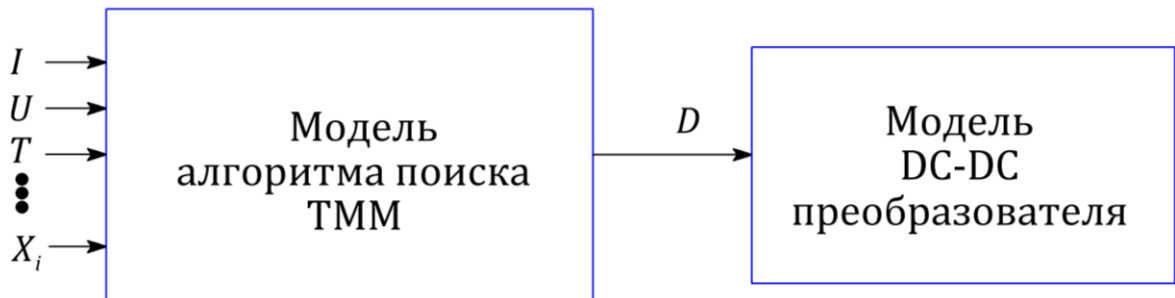


Рисунок 2.36 – Функциональная схема модели контроллера поиска ТММ

В первой главе диссертационной работы рассмотрены различные варианты и алгоритмы современных контроллеров поиска ТММ ФЭУ. Математические модели для этих алгоритмов могут быть представлены в виде уравнений и функций, описывающих зависимость между входными параметрами (такими как освещенность, напряжение, ток и тд.) и выходной мощностью ФЭУ (рис. 2.36). Эти модели могут быть представлены разными математическими уравнениями и графиками в зависимости от конкретной реализации алгоритмов.

Поскольку эффективность преобразования солнечной энергии в ФЭУ может зависеть от разработанной системы управления отслеживанием ТММ, поэтому, разработка математической модели соответствующей системы управления на основе алгоритмов нечеткой логики и моделирование данной системы рассматривается на 3- главе диссертационной работы.

Выводы и результаты по второй главе

Разработка математической модели и исследование характеристик ФЭУ, является важной частью диссертационной работы, поскольку она позволяет более глубоко понять принципы работы ФЭУ и оценить ее характеристики. В данной главе диссертационной работы выполнены следующие задачи

1. Разработана математическая модель, описывающая возможность получения прихода СИ на горизонтальную поверхность в условиях РТ. Такая модель может быть полезна для оценки потенциала солнечной энергии в данном регионе. Результаты моделирования позволят более точно определить приход СИ и спрогнозировать его вариации в зависимости от времени и условий.

2. Разработана математическая модель ФЭМ, позволяющая проводить исследование и оптимизацию выходных характеристик ФЭМ в различных климатических условиях.

3. Создана компьютерная модель ФЭМ с помощью программы Matlab, которая включает в себя солнечные элементы и активно-индуктивную нагрузку. Модель ФЭМ была разработана с использованием модульного принципа, обеспечивающего гибкость и эффективность в процессе работы.

4. Разработана математическая модель импульсного преобразователя постоянного тока на базе повышающего DC-DC преобразователя.

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 для оптимизации, проектирования и эксплуатации ФЭУ.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

3.1. Основные положения теории нечетких множеств

В контексте теории чётких множеств отношение принадлежности элемента x к множеству A может быть записано в формализованной форме:

$$x \in A \quad (3.1)$$

Уравнение (3.1), представленное с использованием характеристической функции, идентично системе (3.2) и показано на рисунке 3.1 (а).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \leftrightarrow x \in A \quad (3.2)$$

Предположим, что у нас есть арифметическое пространство R_1 , в котором задано подмножество A (как дискретное, так и непрерывное). В этом контексте характеристическая функция $\mu_A(x)$ отображает подмножество A на множество R_1 , которое содержит два элемента: 1 и 0.

$$\mu_A^*(x): A \rightarrow R_1 = \{0,1\} \quad (3.3)$$

Дополнительно предположим, что существует подмножество B (как дискретное, так и непрерывное), и важно отметить, что подмножества A и B не имеют общих элементов: $A \subseteq R_1$, $B \subseteq R_1$, и $A \cap B = \emptyset$, как показано на рисунке 3.1 (б).

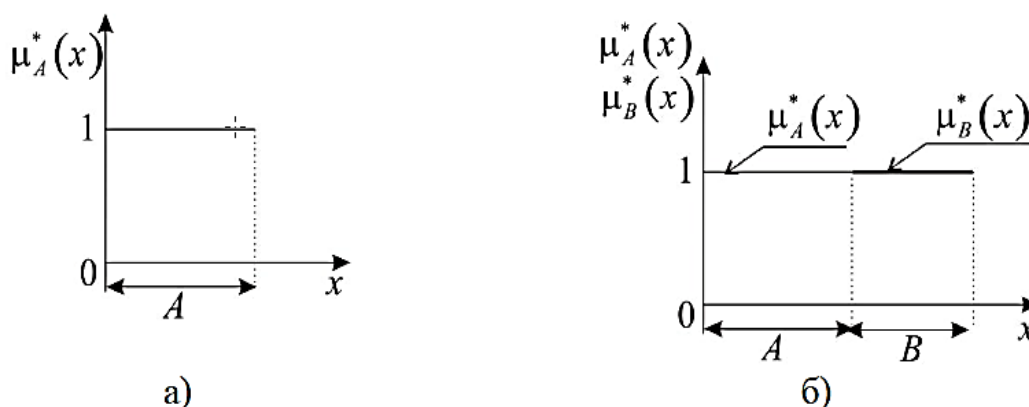


Рисунок 3.1 – Понятие принадлежности в четкой теории множеств, а) принадлежность к подмножеству A , б) совокупность принадлежностей к подмножеству A и B .

В данном контексте на рисунке 3.1 б визуально представлены графические отображения функции принадлежности. Эти представления состоят из двух прямоугольников с четко разделенными границами. Переход из одного множества в другое происходит резким образом.

В рамках концепции нечетких множеств считается, что функция принадлежности $\mu_a(x)$ является одномерной в случае, когда она оперирует только в одномерном пространстве значений.

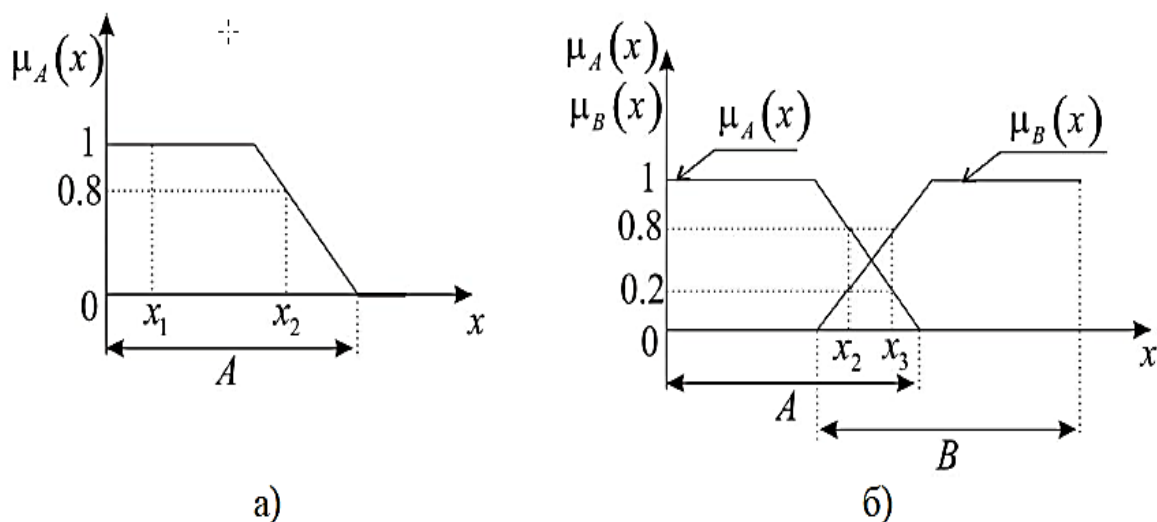


Рисунок 3.2 – Понятие принадлежности в нечеткой теории множеств, а) принадлежность к подмножеству А, б) совокупность принадлежностей к подмножеству А и В.

Рисунок 3.2 иллюстрирует визуальное отображение одномерной функции принадлежности. Подмножество $A \subseteq \mathbb{R}$ имеет функцию принадлежности $\mu_A(x)$, представленную на рисунке 3.2 а. Предположим, есть элементы $x_1 \in A$ и $x_2 \in A$ с соответствующими функциями принадлежности $\mu_A(x_1) = 1$ и $\mu_A(x_2) = 0.8$. В контексте теории нечетких множеств утверждается, что элемент x_1 полностью принадлежит множеству А, в то время как x_2 частично принадлежит с весом, равным 0.8, рисунок 3.2 б демонстрирует пересечение двух функций принадлежности $\mu_A(x)$ и $\mu_B(x)$ (где $B \subseteq \mathbb{R}$). Элемент x_1 полностью принадлежит множеству А с функцией принадлежности $\mu_A(x) = 1$, в то время как элемент x_2 частично принадлежит множеству (А) с весом (0.8), как показано на рисунке 3.2 б. Этот вес указывает, что элемент x_2 принадлежит также множеству В с весом

0.2. Граница между множествами А и В нечеткая, и переход элементов между этими множествами происходит постепенно с соблюдением условия нормировки $\mu_A(x) + \mu_B(x) = 1$ [100].

Для одномерного нечеткого подмножества $A \subset R_1$, являющегося совокупностью упорядоченных пар $\{x, \mu_A(x)\}$, $x \in R_1$, справедливо следующее представление нечетких множеств:

$$\{x, \mu_A(x)\} \leftrightarrow \{\mu_A(x), x\} \leftrightarrow \begin{cases} \sum_i \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} & \text{— дискретное множество} \\ \int_A \frac{\mu_A(x)}{x} & \text{— непрерывное множество} \end{cases} \quad (3.4)$$

Описание нечеткого отображения φ включает нечеткую область с функцией принадлежности $\mu_\varphi(x, y)$, где каждому элементу x из множества R_1 (входного множества) соответствует элемент y из множества A_2 (выходного множества). Геометрическое представление нечеткого отображения φ может быть представлено на рисунке 3.3, где нечеткая область изображена в виде графика функции принадлежности. Суть графика состоит в том, что каждому элементу из входного множества присваивается степень принадлежности к выходному множеству

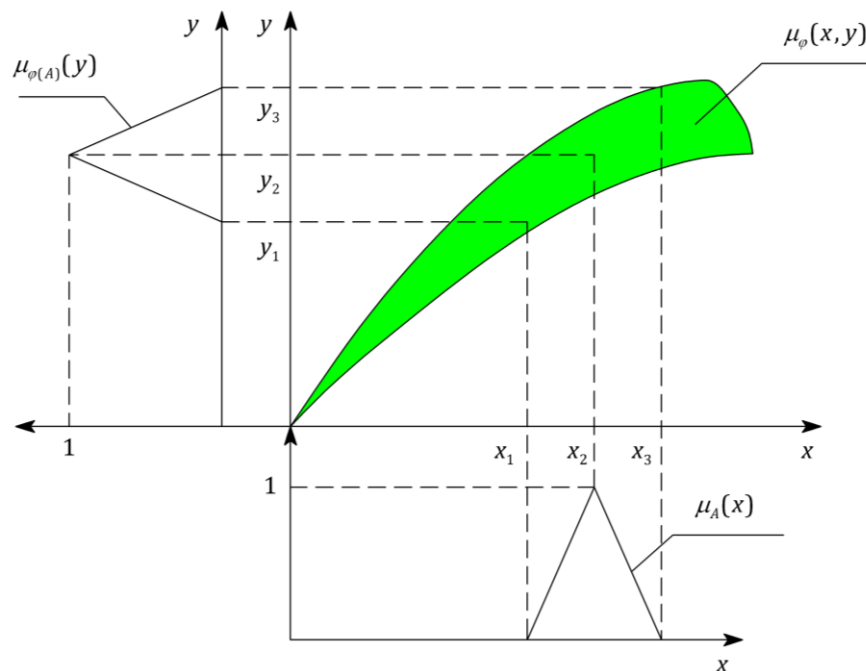


Рисунок 3.3 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

Таким образом, нечеткое отображение φ позволяет представить и решать традиционные задачи теории управления, используя нечеткую логику и нечеткие множества. Это позволяет учитывать неопределенность и размытость входных данных и повышает точность и эффективность управляющих систем.

На рисунке 3.3 запечатлен график функции принадлежности нечеткого отображения φ .

Построение функции принадлежности нечеткого множества A осуществляется проекцией на горизонтальную ось, соответствующей множеству x . Функция принадлежности нечеткого образа $\varphi(A)$ строится проекцией на ось, соответствующей множеству y , как показано на рисунке 3.3.

Каждое нечеткое множество в системах управления ассоциируется с лингвистической переменной. Например, нечеткому множеству $\mu_A(x)$ ставится в соответствие лингвистическая переменная «Отрицательное». При введении лингвистической переменной «Большое Отрицательное» возникает модифицированное нечеткое множество с функцией принадлежности $m_p(A)$.

Степенная связанность нечеткого множества A с $\mu_A(x)$ и $m_p(A)$ определяется выражением $m_p(A) = \int_x \frac{\mu_A^p(x)}{x}$, где p -параметр модификации.

Например, для лингвистической переменной "Большое Отрицательное" $A^2 = \int_x \frac{\mu_A^2(x)}{x}$

На практике для решения задач систем управления наиболее распространены треугольные, трапецидальные и колоколообразные функции принадлежности, приведенные на рис.3.4. На рисунке приняты следующие обозначения:

- Треугольная функция принадлежности: обозначается треугольником, а его параметры определяются тремя числами - a , b и c . Значение функции принадлежности равно 0, когда x меньше a или x больше c , и функция достигает максимального значения 1 при x равном b . Функция между a и b возрастает линейно, а между b и c убывает линейно.

- Трапецеидальная функция принадлежности: обозначается трапецией, а ее параметры определяются четырьмя числами - a , b , c и d . Функция принимает значение 0, когда x меньше a или x больше d , значение 1 достигается при x равном b или c . Функция между a и b возрастает линейно, между b и c остается на уровне 1, а между c и d убывает линейно.

- Колоколообразная функция принадлежности: обозначается колокольчиком (иногда также называется гауссовой функцией), и ее форма имеет вид колокола. Она определяется двумя параметрами - пиком (максимальным значением) и шириной. Значение функции принадлежности максимально в пике и убывает симметричным образом с обеих сторон.

Обычно эти функции используются для определения степени принадлежности входных или выходных переменных в системах управления.

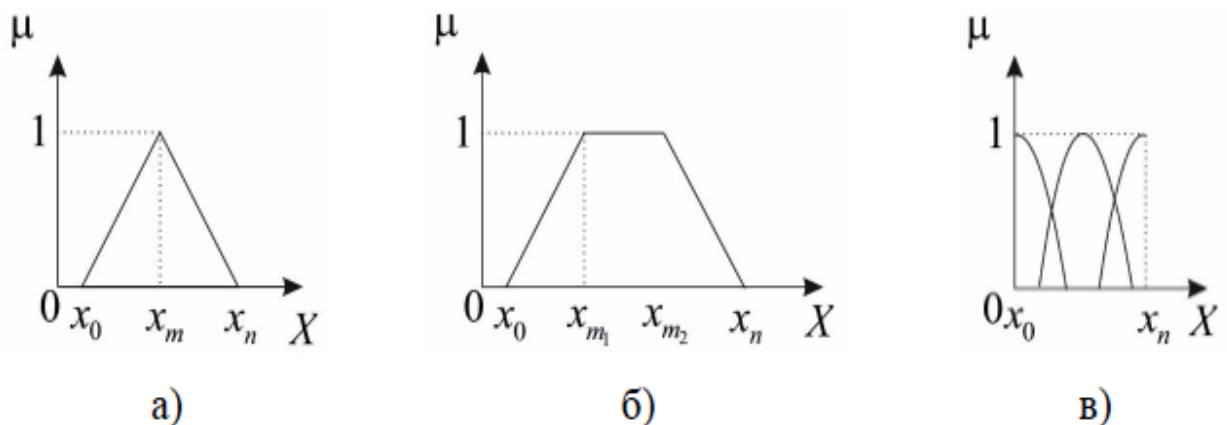


Рисунок 3.4 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

X – значение функции принадлежности μ , x_0 - начальное значение диапазона,

x_n - конечное значение диапазона, x_m - значение, при котором значение функции принадлежности максимально.

В теории нечетких множеств для управления параметрами большое значение имеют нечеткие предложения (высказывания типа «рг: x есть A », где x - физическая величина (напряжение, ток), A – лингвистическая переменная, рг - предложение. Например, «напряжение есть высокий» - «рг: $x = A$ ». Нечеткие предложения дополняются связками «И» и «ИЛИ», которые реализуются с помощью T- и S- норм, соответственно. Логические связки «И» и «ИЛИ»

приведены в таблице 3.1.

Метод Заде является предпочтительным при использовании логических связок "И" и "ИЛИ" (T- и S-нормы), поскольку он не обладает избыточностью; другими словами, комбинация двух равных нечетких высказываний идентична.

$$\begin{cases} \mu_{A \cap A} = \min(\mu_A(x), \mu_A(x)) = \mu_A(x) \\ \mu_{A \cup A} = \max(\mu_A(x), \mu_A(x)) = \mu_A(x) \end{cases} \quad (3.5)$$

Таблица 3.1. Логические связки «И» и «ИЛИ»

Логическая Связка	«И»	«ИЛИ»
Метод		
Заде	$\min(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x))$	$\max(\mu_{A_1}(x) \cdot \mu_{A_2}(x))$
Лукашевич	$\max(\mu_{A_1}(x) + \mu_{A_2}(x) - 1; 0)$	$\min(\mu_{A_1}(x) + \mu_{A_2}(x) - 1; 0)$
Бандлер, Кохоут	$\mu_{A_1}(x) \cdot \mu_{A_2}(x)$	$\mu_{A_2}(x) + \mu_{A_1}(x) - \mu_{A_1}(x) \cdot \mu_{A_1}(x)$

Нечеткие предложения, дополненные логическими связками «И» и «ИЛИ» называют условиями и дополняются условием «ЕСЛИ»

«Если $pr_1: x_1 = A_1$ и $pr_2: x_2 = A_2$

Совокупность условий дополняется заключением «ТОГДА» и называется выводом.

Совокупность условий и выводов называется нечетким правилом R_i :

R_i : Если $x_1 = A_1$ и $x_2 = A_2$, тогда $y_1 = B_1$ и $y_2 = B_2$,

Совокупность нечетких правил образует нечеткую базу правил $\{R_i\}_{i=1}^k$: R_i : ЕСЛИ ..., ТОГДА ..., $i = 1, k$. Нечеткая база правил имеет следующие свойства –непрерывность, непротиворечивость, полнота данных.

Нечеткой импликацией называется логическая операция «ЕСЛИ ...ТОГДА...». Результатом нечеткой импликации является значение в результате выводов нечеткого высказывания.

Пусть правило содержит один вывод. База правил запишется следующим образом:

$$R_i: \mu_{B_{i1}} = \mu_{A_{i1}}(x_1) \rightarrow \mu_{A_{i2}}(x_2); i = \overline{1, k}, \quad (3.6)$$

В формуле 3.6 приняты следующие обозначения:

\rightarrow -нечеткая импликация,

A_{1i}, A_{2i} -нечеткие множества (условий)

B_{i1} -нечеткое множество (вывода)

$\mu_{A_{1i}}(x_1), \mu_{A_{2i}}(x_2), \mu_{B_{i1}}$ -функции принадлежности.

Возможны следующие обозначения нечеткой импликации:

$$\mu_B(y) = I(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) \equiv \mu_{A_1}(x) \rightarrow \mu_{A_2}(x) \quad (3.7)$$

Различают несколько типов нечетких импликаций:

1. Нечеткая импликация S-типа.

$$y = I(u_1, u_2) = S(u_1^-, u_2) \quad (3.8)$$

Где S-норма.

Примером является нечеткая импликация Клине (рис.3.5):

$$y = I(u_1, u_2) = u_1^{(-)} \vee u_2 = (1 - u_1) \vee u_2 \quad (3.9)$$

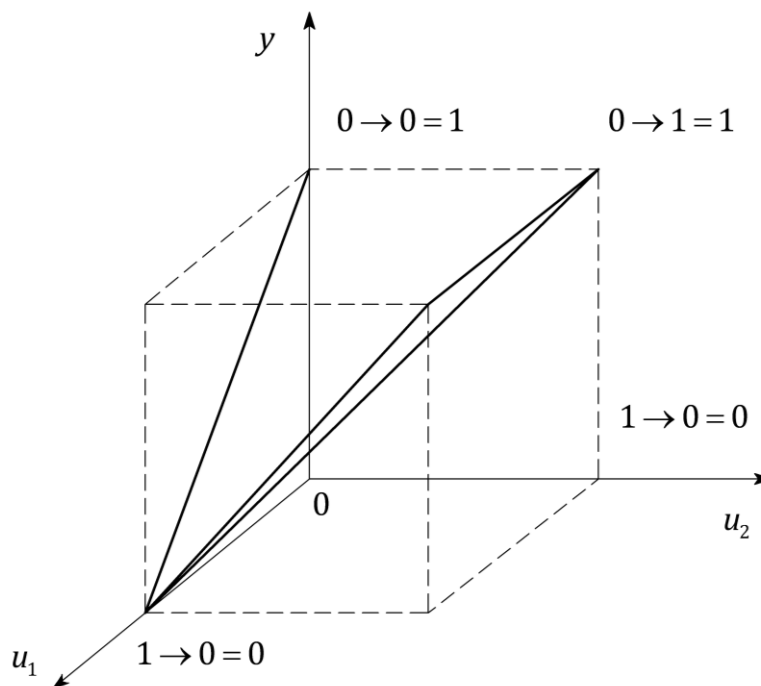


Рисунок 3.5 – Граничные условия импликации S-типа.

2. Нечеткая импликация QL-типа.

$$y = I(u_1, u_2) = S(u_1^{(-)}, T(u_1, u_2)) \quad (3.10)$$

Примерами являются

2.1). Нечеткая импликация Рейшенбах:

$$y = I(u_1, u_2) = S(u_1^{(-)}, T(u_1, u_2)) = u_1^{(-)} + u_1 \cdot u_2 = 1 - u_1 + u_1 \cdot u_2 \quad (3.11)$$

2.2). Нечеткая импликация Ли:

$$y = I(u_1, u_2) = S\left(T\left(u_1^{(-)}\right), u_1^{(-)}, u_2\right) \quad (3.12)$$

2.3) Нечеткая импликация QL-типа:

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 1 - u_1, & \text{если } u_2 = 0, \\ u_2, & \text{если } u_1 = 1, \\ 1, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (3.13)$$

3. Нечеткая импликация R-типа.

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } u_1 \leq u_2, \\ 0, & \text{если } u_1 = 1 \wedge u_2 = 0, \\ \in (0; 1), & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (3.14)$$

Примером являются

3.1). Нечеткая импликация Гогаена:

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } u_1 = 0 \\ \min\left(\frac{u_2}{u_1}; 1\right), & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3.15)$$

3.2). Нечеткая импликация R-типа (рис.3.5):

$$y = I(u_1, u_2) = \sup \left\{ \frac{\gamma = [0,1]}{T(u_1, \gamma) \leq u_2} \right\} \quad (3.16)$$

или

$$I(u_1, u_2) = 1 - \inf \left\{ \frac{\gamma = [0,1]}{S(u_1, \gamma) \leq u_2} \right\}$$

4. Нечеткая импликация T-типа.

$$y = I(u_1, u_2) = T(u_1, u_2) \quad (3.17)$$

где T – норма

Примером являются

4.1). Нечеткая импликация Мамдани

$$y = I(u_1, u_2) = u_1 \wedge u_2 = \min(u_1, u_2) \quad (3.18)$$

4.2). Нечеткая импликация Ларсена

$$y = I(u_1, u_2) = u_1 \cdot u_2 \quad (3.19)$$

5). Нечеткая импликация, отражающая частичный порядок

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } u_1 + u_2 \leq 1 \\ 1, & \text{если } u_1 = 1 \wedge u_2 = 1 \\ \in (0,1), & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3.20)$$

Примером является нечеткая импликация Ягера:

$$y = I(u_1, u_2) = u_2^{u_1} \quad (3.21)$$

3.2. Принцип построения РНЛ слежения за ТММ ФЭУ

В настоящее время существует следующая классификация регуляторов на основе нечеткой логики [93 - 101] (рис.3.6).



Рисунок 3.6 – Классификация интеллектуальных систем управления на базе нечеткой логики

Для того чтобы полностью описать работу блока с нечеткой логикой (БНЛ) в РНЛ, необходимо рассмотреть процессы фаззификации и дефаззификации, а также алгоритм функционирования БНЛ.

БНЛ является основой РНЛ и выполняет преобразование входных сигналов в нечеткие величины в процессе фаззификации, а затем преобразование нечетких величин обратно в выходные сигналы в процессе дефаззификации.

Фаззификация – это процесс преобразования входных сигналов в нечеткие величины, которые характеризуют степень принадлежности значения входного

сигнала каждому из определенных нечетких множеств. Нечеткое множество состоит из определенных функций принадлежности, которые определяются экспертным путем или на основе обучающих данных.

Дефаззификация – это процесс преобразования нечетких величин обратно в числовые значения для выходных сигналов. Для этого используются методы, такие как центр тяжести или максимум принципа.

Алгоритм функционирования БНЛ представляет собой модель вида “вход-выход”, которая связывает входные нечеткие величины с выходными сигналами. Эту модель можно представить с помощью системы уравнений.

Математическая модель БНЛ, описанная системой уравнений (3.22), обеспечивает связь между нечеткими величинами, представляющими входные значения, и выходными сигналами. Ее основной смысл заключается в описании взаимосвязи между этими значениями и сигналами, позволяя точно определить, как воздействия на входах сказываются на выходах системы. Процессы фаззификации и дефаззификации осуществляются посредством БНЛ в РНЛ. Алгоритм работы БНЛ представляет собой модель "вход-выход", которая может быть описана системой уравнений (3.22). Эта система уравнений определяет связь между входными нечеткими значениями и выходными сигналами. Для осуществления перехода от конкретных физических переменных к нечетким применяется метод фаззификации. Этот метод преобразует точные числовые значения входных переменных в нечеткие величины, представленные в виде нечетких функций принадлежности. Существует разнообразие форм нечетких функций принадлежности, таких как треугольники, трапеции, колоколообразные и другие. Каждая из этих форм определяет степень принадлежности конкретного значения входной переменной к определенному нечеткому множеству.

Обратный переход к физическим переменным выполняется с помощью дефаззификации. Она преобразует нечеткие величины, полученные после фаззификации, обратно в точные значения выходных переменных. Существует несколько методов дефаззификации, включая метод центра тяжести (МЦТ), метод центра области (МЦО), метод среднего максимума (МСМ) и другие.

$$A_i(i = \overline{1, k}) = fuzz(x_i), A_{jl} = fuzz(x_i, x_l); \quad (3.22)$$

$$B = \bigcup_{i=1}^k B_i, z = dfzB$$

Таким образом, БНЛ (рис.3.10) состоит из 3 ключевых компонентов: блок фаззификации, блок формирования логического решения и блок дефаззификации.

Блок фаззификации отвечает за преобразование входных данных в нечеткие множества, что позволяет учесть неопределенность и нечеткость при описании переменных. Следующим шагом является блок формирования логического решения, который осуществляет обработку этих нечетких множеств и определяет способы задания нечеткой импликации и композиции. Это позволяет определить логическое правило, которое будет применяться для принятия решений на основе входных данных.

Наконец, блок дефаззификации преобразует полученные нечеткие выводы в конкретные числовые значения или категории, которые можно использовать для принятия окончательного решения. В результате, благодаря БНЛ мы можем использовать нечеткую логику для эффективного решения сложных проблем.

Входной вектор E и выходной вектор Y БНЛ определяются на основе выражения (3.23):

$$E = \{(\varepsilon_i, L_i, \{T_{\varepsilon_i}^1, T_{\varepsilon_i}^2, \dots, T_{\varepsilon_i}^{k_i}\}, \{\mu_{\varepsilon_i}^1, \mu_{\varepsilon_i}^2, \dots, \mu_{\varepsilon_i}^{k_i}\}) | i = 1, \dots, n\} \quad (3.23)$$

$$Y = \{(u_i, V_i, \{T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{k_i}\}, \{\mu_{y_i}^1, \mu_{y_i}^2, \dots, \mu_{y_i}^{k_i}\}) | i = 1, \dots, m\}$$

Где ε_i -входные переменные;

L_i -нечеткое лингвистическое множество входов $L = L_1 \times L_2 \times \dots \times L_n$;

y_i -выходные переменные;

V_i -нечеткое лингвистическое множество выходов $V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n$, $T(\varepsilon_i) = \{T_{\varepsilon_i}^1, T_{\varepsilon_i}^2, \dots, T_{\varepsilon_i}^{k_i}\}$, $T(y_i) = \{T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{k_i}\}$ -множество термов входной и выходной величин соответственно. Мера эффективности регулятора в реальных устройствах управления существенно зависит от степени детализации объекта,

определяемой количеством его термов или разбиений на подмножества. Продуманная декомпозиция данного объекта играет важную роль в достижении высокой производительности регулятора. На рисунке 3.8 иллюстрирована первоначальная грубая декомпозиция с использованием трех термов и трех нечетких подмножеств (рис. 3.8а). После этого была разработана более детальная декомпозиция (рис. 3.8б), которая содержит уже семь подмножеств.

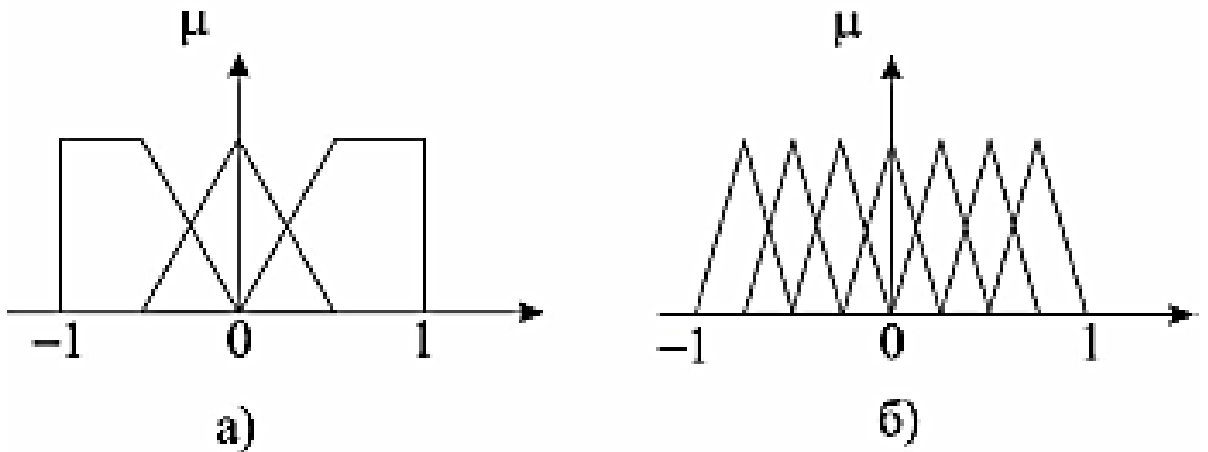


Рисунок 3.8 – Нечеткая декомпозиция, а) грубая, б) детальная

Структура РНЛ, построенного из условия компенсирования статической ошибки и демпфирующего колебания, приведена на рисунках 3.9 - 3.10.

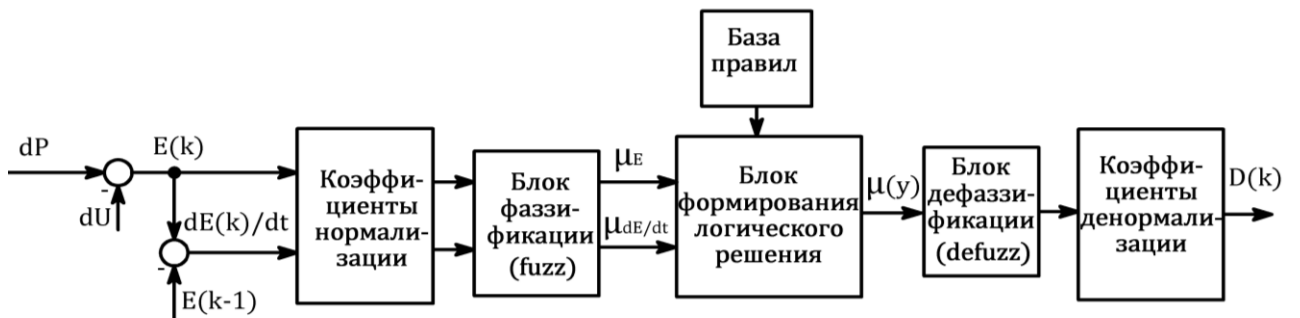


Рисунок 3.9 – Функциональная схема РНЛ

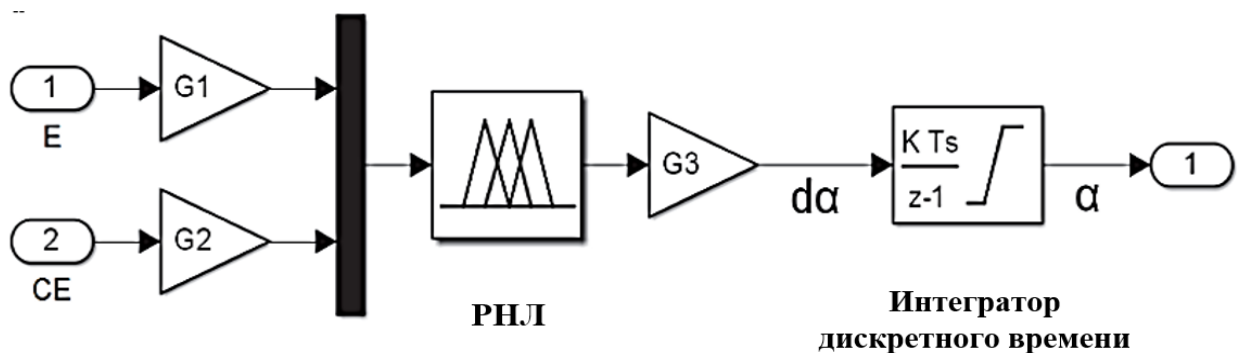


Рисунок 3.10 – Структурная схема РНЛ

Оба входа и выход нормализуются с использованием коэффициентов усиления $G1$, $G2$ и $G3$. Для получения коэффициента заполнения α используется интегратор дискретного времени с прямым методом Эйлера (по умолчанию), где значение усиления K и время расчета Ts интегратора устанавливаются равными 1 и 0,01 соответственно

3.3. Разработка РНЛ слежения за ТММ ФЭУ

Обеспечение точки максимальной мощности в ВВХ ФЭУ достигается введением двух входных переменных – ошибки и скорости изменения ошибки [95,96,105], рассчитывающихся по формуле (3.24) в которых первая переменная (ошибка) отвечает за расхождение между текущим значением выходной мощности ФЭУ и желаемым значением, а вторая переменная (скорость изменения ошибки) отвечает за скорость изменения данной ошибки. Обеспечение точки максимальной мощности достигается путем оптимального управления системой, которое зависит от значений ошибки и скорости изменения ошибки. Входные переменные могут быть использованы для определения оптимального управления системой, используя соответствующие алгоритмы и регуляторы. Эти переменные могут быть измерены и обработаны с помощью датчиков и контролеров, чтобы достичь оптимального управления и обеспечить максимальную мощность в ФЭУ.

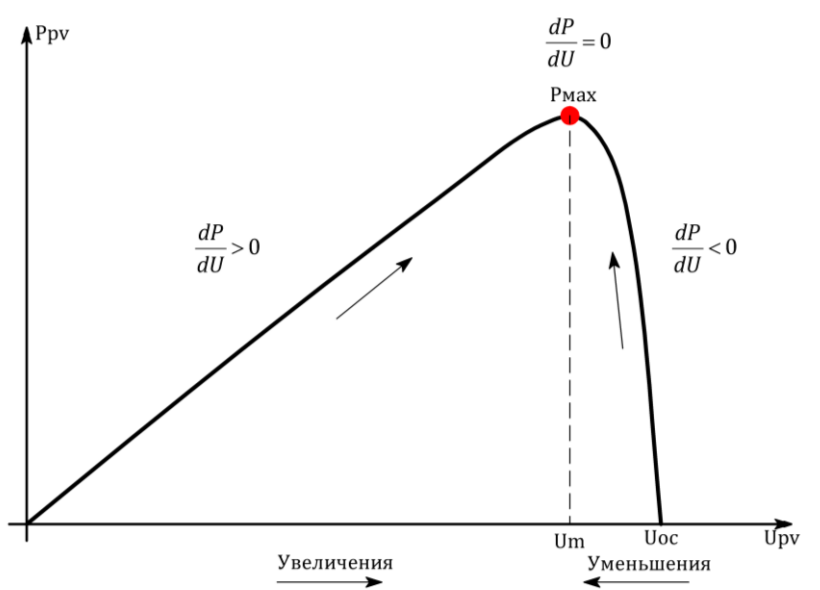


Рисунок 3.11 – ВВХ при работе нечеткого алгоритма.

Фактическое значение напряжения (U) и тока (I) фотоэлектрической установки можно измерять непрерывно и рассчитывать мощность ($P=U \times I$). Выходная мощность фотоэлектрической панели 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 $\frac{dP}{dU} = 0$ (рис.3.11), 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.).

Управление определяется на основе удовлетворения двух критериев, относящихся к двум входным переменным предлагаемого регулятора, а именно ошибки E (которая представляет собой наклон ВВХ) и скорости изменения этой ошибки (C_E) в момент выборки k . Переменные E и C_E выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \\ C_E(k) = E(k) - E(k-1) \end{cases} \quad (3.24)$$

где $P(k)$ и $U(k)$ — мощность и напряжение ФЭУ соответственно. Вход $E(k)$ показывает, находится ли рабочая точка в момент k слева или справа от ТММ на ВВХ, а вход $C_E(k)$ выражает направление смещения этой точки. Управление осуществляется путем изменения коэффициента заполнения DC-DC- преобразователя в соответствии с наклоном $E(k)$, чтобы вернуть рабочую точку в оптимальную точку, где наклон равен нулю.

При выполнении фазификации входные лингвистические переменные, а именно ошибка системы и скорость изменения ошибки, качественно описываются терм-множествами. Эти терм-множества характеризуются

функциями принадлежности (ФП), которые описываются на универсальном множестве E . Функция принадлежности для описания ошибки обозначается как μ_E , а ФП для описания скорости изменения ошибки обозначается как μ_{C_E} . Функция принадлежности играет важную роль в определении, насколько каждый элемент относится к множеству E . Она выражается числом, лежащим в диапазоне от 0 до 1, и называется степенью истинности для данного термина лингвистической переменной. С учетом разнообразных вариаций входных параметров их текущие значения можно отобразить на единое универсальное множество. Следовательно, каждое текущее значение входной переменной определяет, насколько оно соответствует тем нечетким подмножествам, которые описывают конкретную лингвистическую переменную. В силу перекрывающихся ФП различные функциональные выходы могут представлять разные уровни истинности для одной и той же входной переменной, которые могут отличаться от нуля. В процессе формирования логического решения на основе матрицы знаний (базы правил) $\{R_i\}_{i=1}^k$ заполняются лингвистические правила следующего типа: ЕСЛИ имеется исходная ситуация, ТО возникает соответствующая ответная реакция. Импликация, или логическая связка, обозначает взаимодействие между входными и выходными ФП, когда используется условие типа "ЕСЛИ-ТО". В результате, данный процесс создает своеобразную связь между входными и выходными данными.

Учитывая, что преобразователь DC-DC требует на своем входе точного управляющего сигнала D , необходимо предусмотреть преобразование этой нечеткой информации в детерминированную информацию, такое преобразование называется дефаззификацией. Наиболее часто используемый метод дефаззификации — это МЦТ окончательного комбинированного нечеткого множества. Окончательный объединенный нечеткий набор определяется объединением всех выходных нечетких наборов правил.

$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D) \cdot \Delta D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j)} \quad (3.25)$$

Как только выходной сигнал нечеткого регулятора, который представляет собой изменение коэффициента заполнения ΔD дефаззифицируется с помощью (3.25) и масштабируется с помощью коэффициента усиления, $S_{\Delta D}$ преобразуется в фактический коэффициент заполнения $D(k)$ по формуле:

$$D(k) = D(k - 1) + S_{\Delta D} \cdot \Delta D(k) \quad (3.26)$$

Таким образом, алгоритм, реализуемый для построения нечеткого регулятора, приведен на рис.3.12а, функциональная схема замкнутой системы управления с РНЛ на рис. 3.12б.

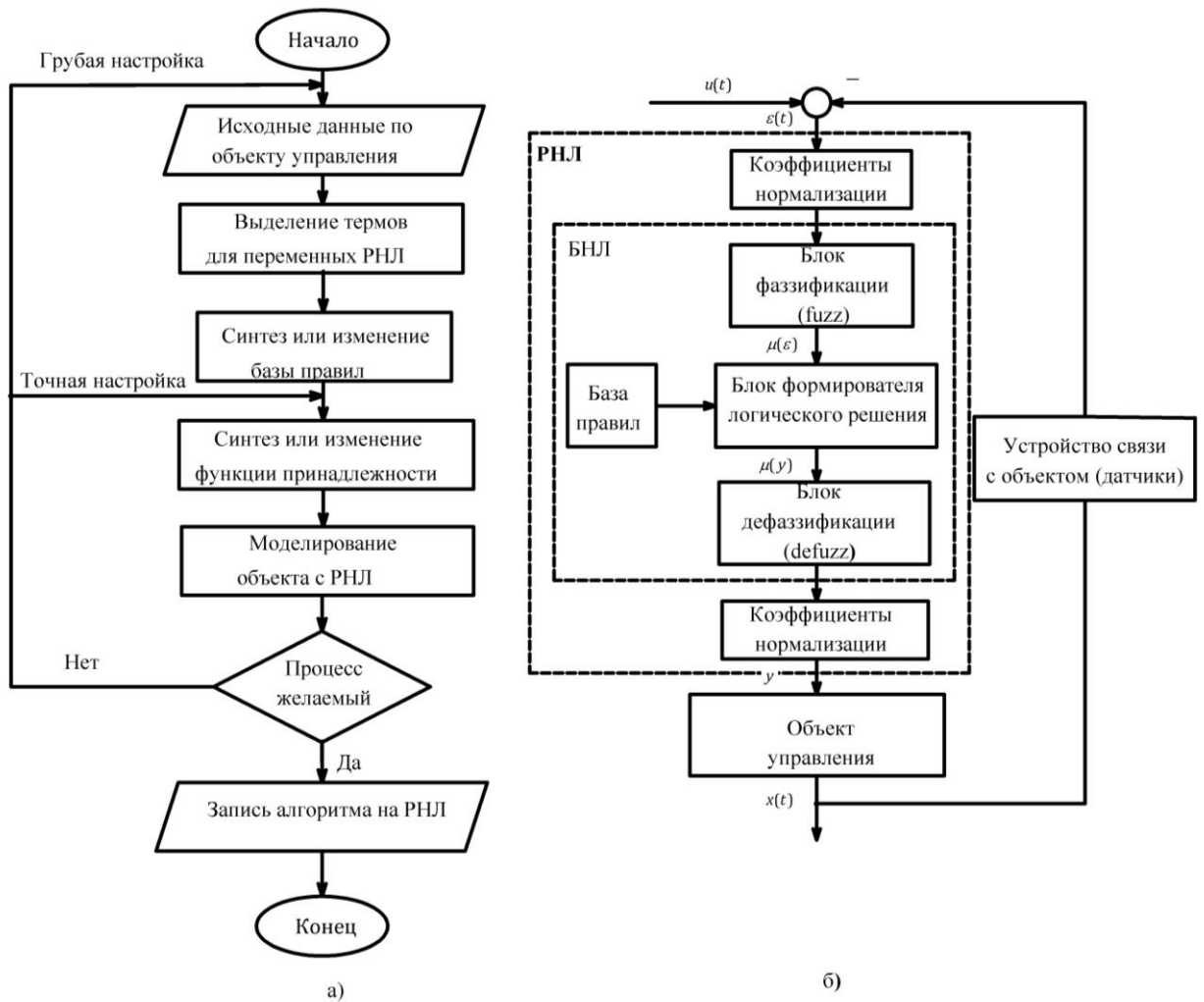


Рисунок 3.12 – Алгоритм реализации нечеткого регулятора – а). блок схема алгоритма, б). функциональная схема замкнутой системы управления

Исходя из случая, показанного на рисунке 3.11, 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.

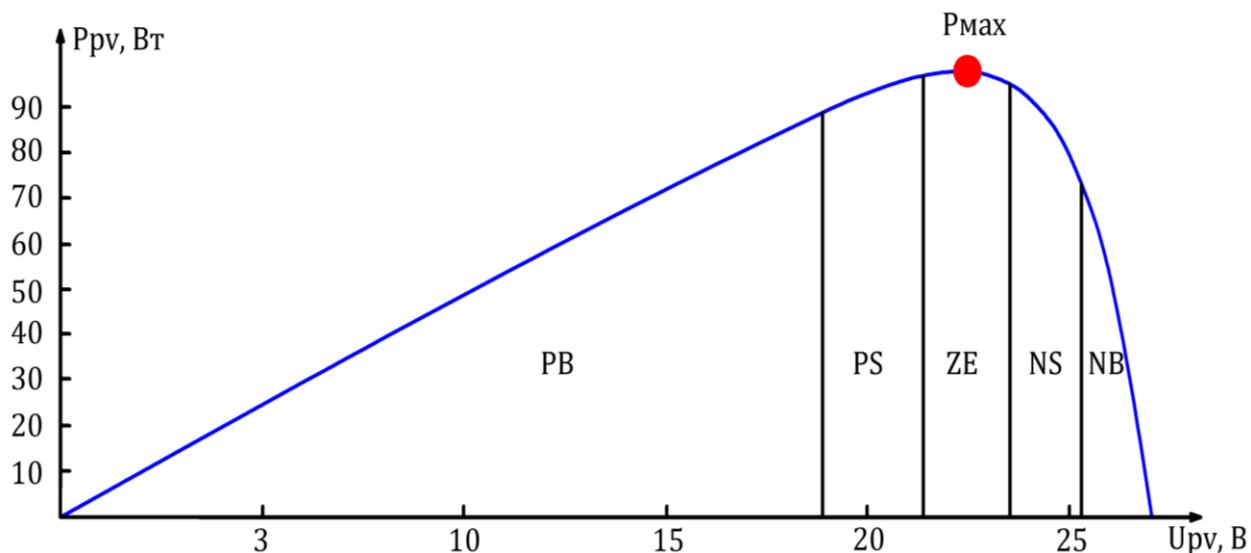


Рисунок 3.13 – Принцип работы РНЛ на ВВХ

На рисунке 3.13 кривая демонстрирует относительную линейность в диапазоне $U_{pv} \in (0,18)$. Наклон кривой ВВХ нелинейно уменьшается к нулю в диапазоне $U_{pv} \in (18,23)$ и отклоняется от нуля в сторону 78 в диапазоне $U_{pv} \in (23,27,03)$. Основываясь на вышеперечисленных особенностях, кривую ВВХ можно намеренно разделить на секции, как показано на рисунке 3.13.

PB - «Положительно большой»;

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 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.

Исходя из вышеизложенных соображений, определяются функции принадлежности каждой нечеткой переменной (рисунки 3.14-3.16).

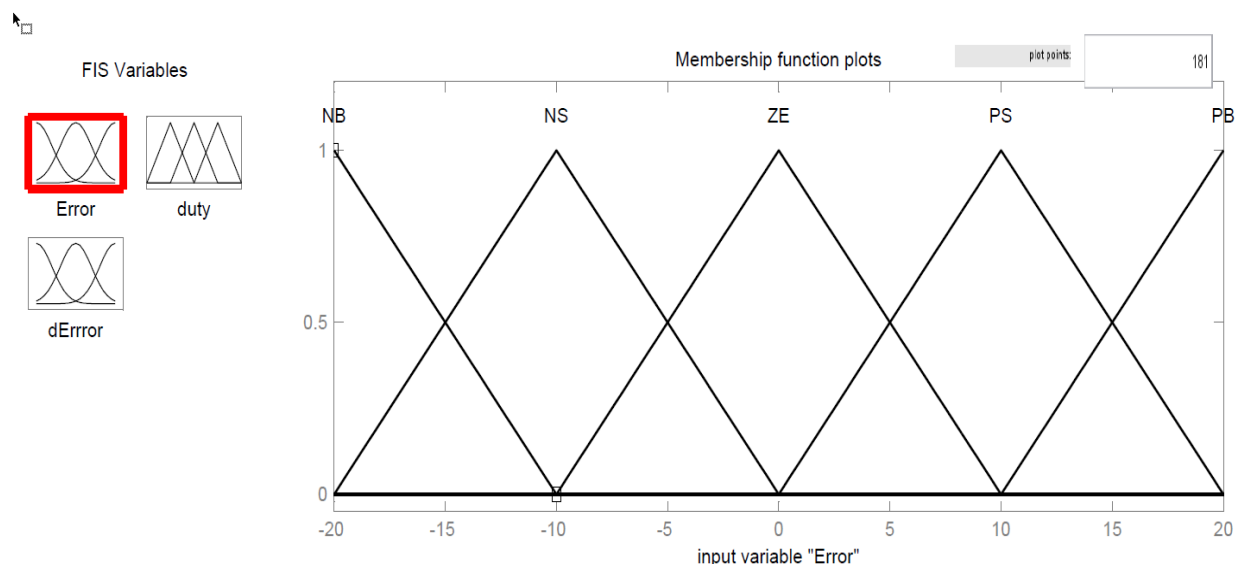


Рисунок 3.14 – Функция принадлежности ошибки E

Функция принадлежности входных переменных ошибки E и скорости изменения ошибки C_E является треугольной и меняется в пределах $(-20, 20)$.

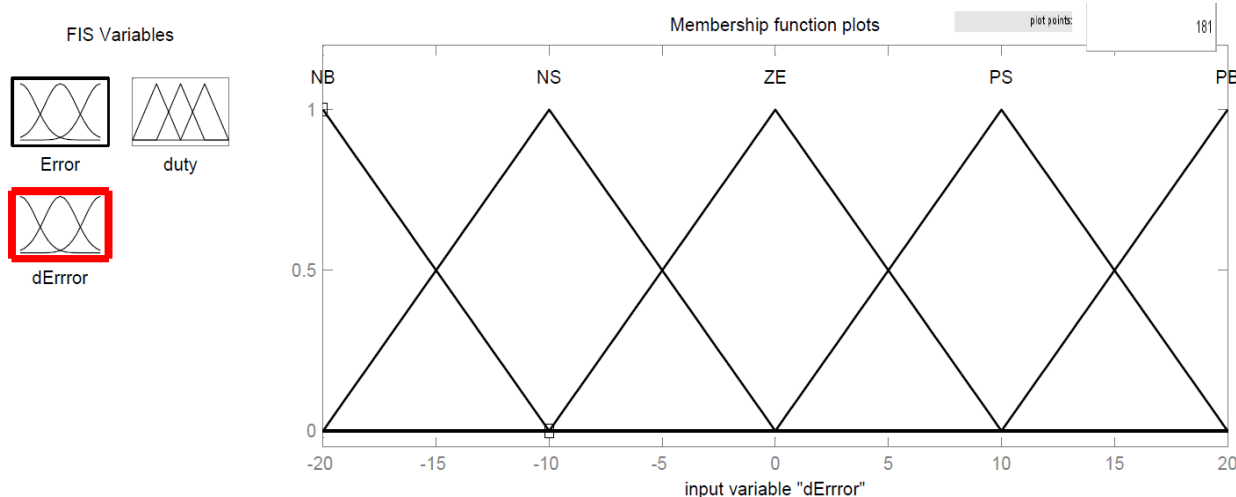


Рисунок 3.15 – Функция принадлежности скорости изменения ошибки C_E

Функция принадлежности выходной переменной РНЛ является треугольной, которая меняется в диапазоне $(-1,1)$. Таким образом, для всех лингвистических переменных использовались треугольные функции принадлежности со следующими термами: NB, NS, ZE, PS, PB.

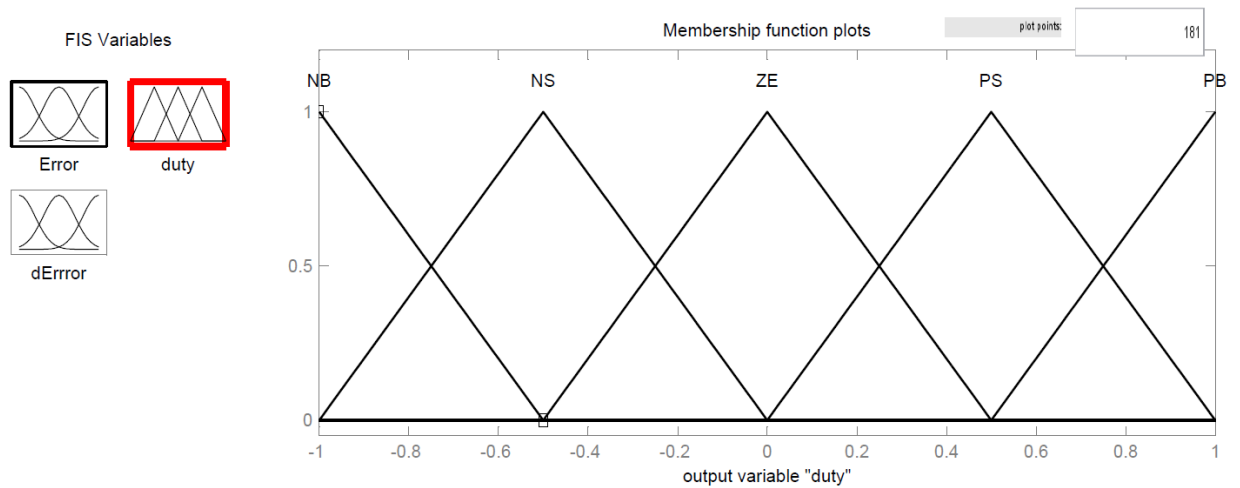


Рисунок 3.16 – Функция принадлежности логического выхода.

Для нечеткого вывода формулируются правила следующего вида: **ЕСЛИ** ошибка E «Отрицательный большой» и скорость изменения ошибки C_E «Отрицательный большой», **ТО** управляющее воздействие (логический выход) «Нулевое». Все 25 правил сведем в таблицу 3.2.

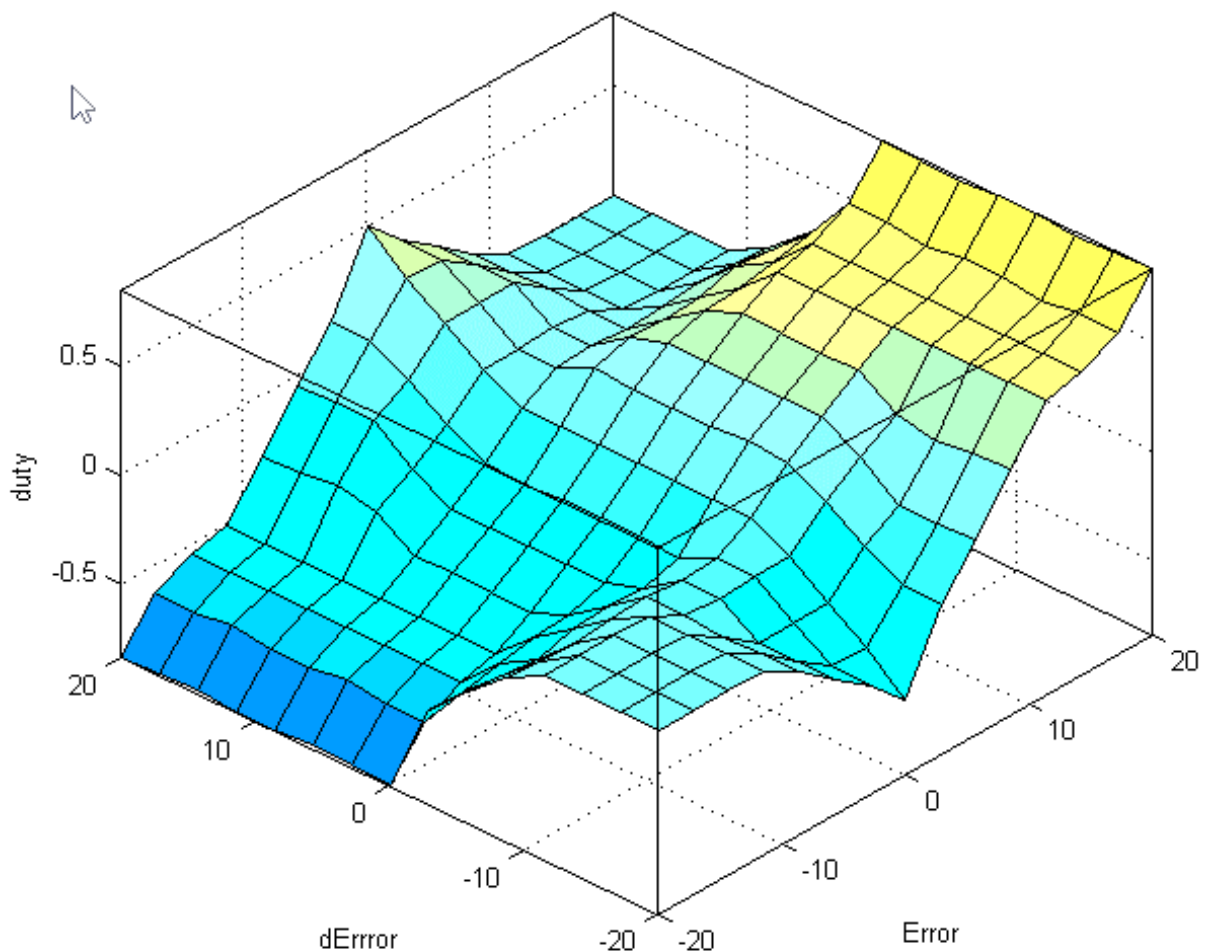


Рисунок 3.17 – Поверхность нечеткого регулятора.

Таблица 3.2. Представление нечетких правил

E C_E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NS	PS	PB
NS	ZE	ZE	ZE	PS	PB
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NB	NS	ZE	ZE	ZE
PB	NB	NS	PS	ZE	ZE

На рисунке 3.17 показана поверхность правил нечеткого регулятора, которая является графическим представлением базы правил.

3.4. Модельное исследование переходных процессов в ФЭУ

Программный комплекс MatLab/Simulink представляет собой наиболее перспективный и мощный комплекс прикладных программ, который полностью обеспечивает потребности инженеров, занимающихся разработкой и управлением электроэнергетическими системами и электроприводами [84,85]. Благодаря своей уникальной функциональности и многообразию инструментов, MatLab/Simulink становится незаменимым инструментом для моделирования, анализа, синтеза и оптимизации различных систем электроэнергетики и электроприводов. Основным преимуществом MatLab/Simulink является его возможность удобного и эффективного моделирования сложных электротехнических систем. Пользователи имеют доступ к широкому спектру инструментов и библиотек, которые позволяют создавать высокодетализированные модели электроэнергетических сетей, электромеханических систем и различных типов электроприводов. Благодаря этому инженеры могут проводить разнообразные анализы, включая статический и динамический, а также оптимизационные исследования, что позволяет значительно сократить время и затраты на проектирование и анализ различных систем. MatLab/Simulink также обладает удобным интерфейсом, который упрощает процесс моделирования и управления проектами. Инженеры могут

быстро и эффективно создавать, изменять модели, настраивать параметры, анализировать результаты и взаимодействовать с другими инженерами. Расширенные возможности подключения и совместной работы позволяют инженерам обмениваться знаниями и опытом, а также повышают эффективность работы в команде.

MatLab/Simulink также предлагает большое количество специализированных инструментов и пакетов расширения, которые позволяют инженерам моделировать и анализировать различные аспекты электроэнергетики и электроприводов, включая управление энергопотреблением, электрическую безопасность, оптимальное управление потоком энергии и многое другое. Таким образом, MatLab/Simulink предоставляет полный набор инструментов, необходимых для исследования, разработки и оптимизации различных систем, связанных с электроэнергетикой и электроприводами. В одной из библиотек *Simulink – Sim Power Systems* выполняется имитационное моделирование электротехнических устройств.

Sim Power Systems включает в себя набор инструментов и специальных блоков для построения виртуальных имитационных моделей устройств силовой электроники, электрических цепей, источников вторичного электропитания, а также обладает полным набором средств моделирования автоматических систем управления. *Simulink – Sim Power Systems* позволяет имитировать работу фотоэлектрической установки во временной области.

Таким образом, пакет MatLab/Simulink представляет собой незаменимый инструмент для инженеров, работающих в области электроэнергетики и электроприводов. Его мощные возможности моделирования, анализа и оптимизации систем позволяют значительно повысить эффективность работы, сокращая время и затраты на проектирование и исследования. MatLab/Simulink становится гарантированным выбором для инженеров, стремящихся достичь высоких результатов в электроэнергетике и электроприводах.

Имитационная модель ФЭУ на базе РНЛ показана на рисунке 3.18. Представленная модель состоит из следующих основных частей:

- датчик уровня СИ и температуры (**signal builder 3**);
- ФЭМ номинальной мощности 100 кВт (**PV array 2**);
- понижающий DC-DC преобразователь;
- система управления ФЭУ на основе РНЛ.

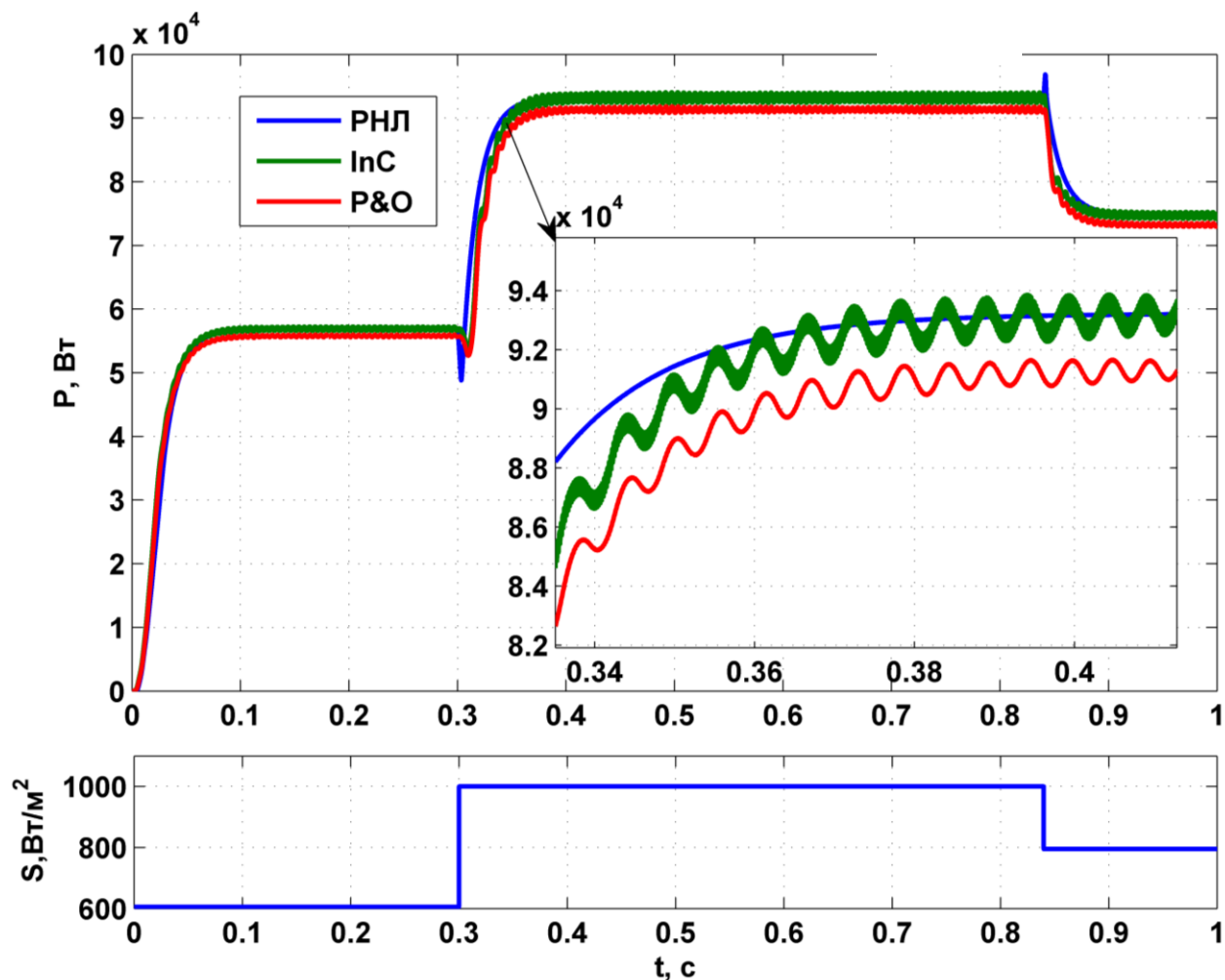


Рисунок 3.19 – Переходный процесс изменения выходной мощности ФЭУ при изменении уровня СИ

Переходные процессы изменения параметров ФЭУ при различных условиях окружающей среды (уровня СИ и температуры) приведены на рисунках 3.19 и 3.20. Переходные процессы были смоделированы при использовании алгоритмов «возмущение и наблюдение» (P&O), «возрастающая проводимость» (InC) и РНЛ. Анализируя приведенных рисунков можно сделать следующие выводы:

1. Отработка максимальной мощности ФЭУ при использовании РНЛ характеризуется более стабильным и плавным значением выходной мощности во

времени. Это означает, что система способна плавно реагировать на изменения в уровне СИ.

2. Колебания выходной мощности ФЭУ при использовании РНЛ значительно меньше, чем при использовании классических алгоритмов InC и P&O. Это может быть связано с более точной оценкой и управлением максимальной мощности ФЭУ при использовании РНЛ.

3. Скорость отработки максимальной мощности ФЭУ при использовании РНЛ значительно выше, чем при использовании классических алгоритмов InC и P&O. Это означает, что система способна быстро реагировать на изменения условий окружающей среды и подстраиваться под оптимальную точку работы ФЭУ.

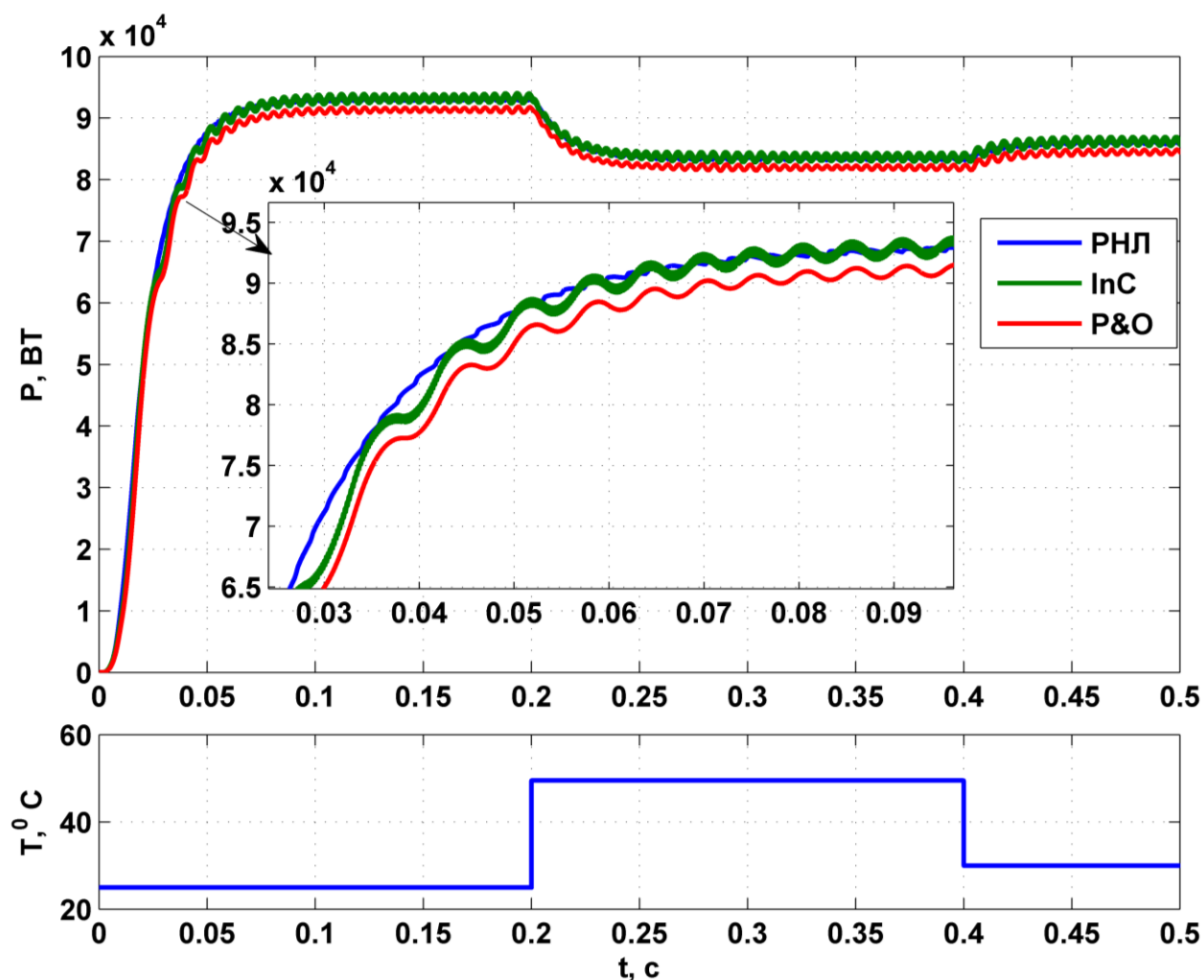


Рисунок 3.20 – Переходный процесс изменения выходной мощности ФЭУ при изменении температуры

Кроме того, на рисунке 3.21 приведены ВВХ ФЭУ при различных уровнях СИ. Из рисунка видно, что при увеличении уровня СИ форма и амплитуда ВВХ ФЭУ

несколько изменяются. В частности, наблюдается снижение амплитуды и увеличение положения пика мощности при увеличении СИ. Это говорит о том, что эффективность преобразования солнечной энергии ФЭУ с РНЛ при данном диапазоне составляет около 93-95%.

Для более детального анализа проверки работоспособности РНЛ и эффективности преобразователя были собраны показания выходной мощности (таблица 3.3). Мощность на ТММ ФЭУ при уровнях СИ (1000 Вт/м^2 , 800 Вт/м^2 , 600 Вт/м^2) и рабочий цикл были отмечены при одинаковых уровнях СИ.

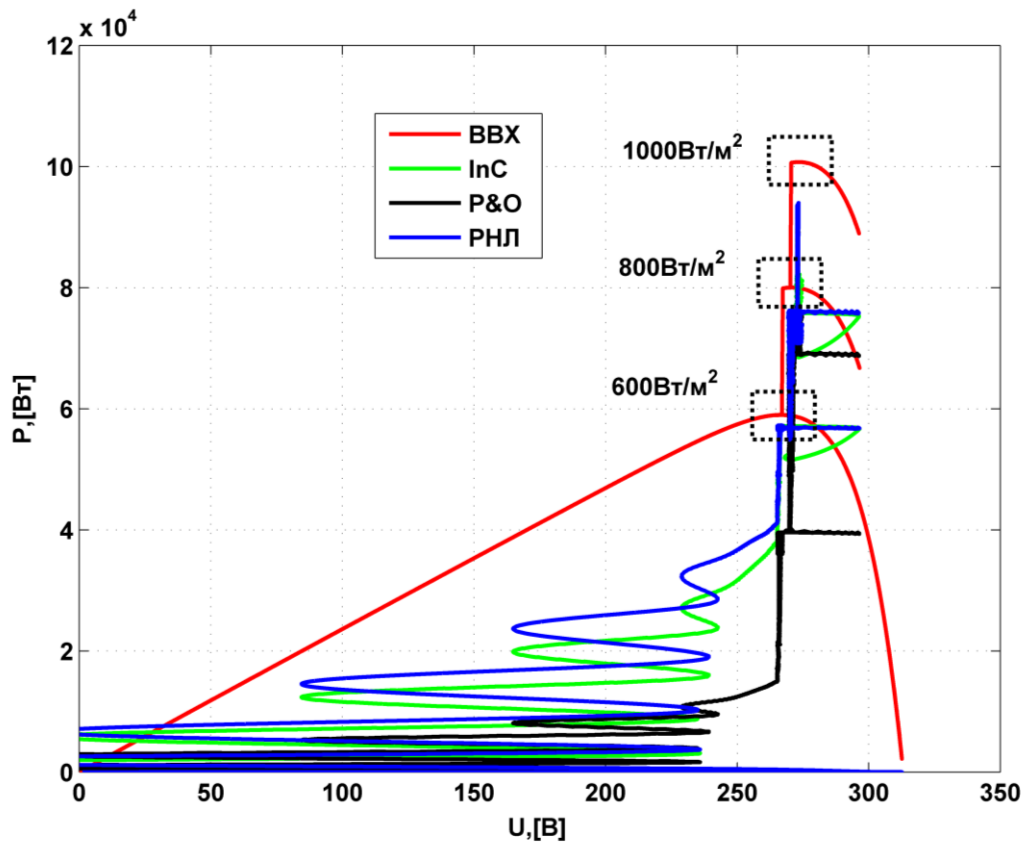


Рисунок 3.21 – Работа алгоритмов на ВВХ ФЭУ при различных уровнях СИ

Таблица 3.3. Результаты моделирования ФЭУ

S , Вт/м^2	P_{max} , Вт	$P_{вых}$, Вт			Эффективность, %		
		P&O	InC	РНЛ	P&O	InC	РНЛ
600	58985	55500	56600	57000	94.09	95.95	96.63
800	80050	73500	75225	74750	91.81	93.37	93.37
1000	100000	91300	93105	93210	91.3	93.1	93.21

Подробная информация о результатах моделирования представлена в таблице 3.3. Необходимо отметить, что эффективность преобразования ФЭУ на основе РНЛ регулятора, настроенного классическим путем проб и ошибок, отличается от классических регуляторов на 0.5-0.7% в положительную сторону.

Применение РНЛ регулятора позволяет достичь более точного и стабильного управления процессом преобразования, что может быть особенно важно в современных системах управления, где точность является ключевым фактором успеха. Более высокую эффективность преобразования солнечной энергии можно достичь путем оптимизации РНЛ. Оптимизация РНЛ с использованием интеллектуальных алгоритмов является процессом настройки параметров регулятора 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) [102-105]. 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 их них. Это позволяет достичь более высокой производительности системы управления и упростить процесс настройки регулятора.

3.5. Оптимизация РНЛ с помощью генетических алгоритмов

Нечеткое управление, основанное на принципах нечеткой логики, позволяет учитывать различные степени неопределенности и нечеткости входных данных и процессов. Поэтому для достижения желаемых результатов необходимо правильно настроить коэффициенты нормализации и денормализации. Нормализация позволяет привести данные к единому масштабу и диапазону значений, тогда как денормализация восстанавливает исходные

значения из нормализованных.

На сегодняшний день оптимизация РНЛ является одним из ключевых вопросов в интеллектуальных системах управления, базирующихся на методах нечеткой логики. Для достижения наилучших результатов в этой области было разработано множество методов. Однако наиболее точным и эффективным подходом является применение адаптивного метода поиска, представленного в виде ГА.

Генетический алгоритм – это математический инструмент, основанный на принципах эволюции в природе. Его целью является решение сложных задач, связанных с поиском экстремумов или минимумов нелинейных функций, учитывая влияние нескольких переменных. Применение данного алгоритма позволяет эффективно и точно оптимизировать данные переменные, что является ключевым фактором в процессе улучшения показателей ФЭУ. Преимуществом генетического алгоритма является его способность работать с большим набором переменных и учитывать их взаимодействие.

Адаптивность метода заключается в его способности самостоятельно находить наиболее оптимальное решение, а также приспосабливаться к изменяющейся среде и изменениям в исходных данных. Это позволяет генетическому алгоритму успешно решать сложные задачи, которые требуют взаимодействия нескольких переменных и достижения экстремальных значений функций. Однако, несмотря на преимущества, некоторые недостатки свойственны генетическому алгоритму (ГА). Основным из них является большой объем вычислений, которые требуют значительную вычислительную мощность. Это обусловлено тем, что ГА работает параллельно на каждом шаге измерений, а такая многозадачность требует больших ресурсов.

В таблице 3.4. приведены параметры используемого генетического алгоритма. Блок - схема работы ГА приведена на рисунке 3.22.

Реализованный ГА работает по следующей схеме:

1) Создается произвольная начальная популяция «хромосом». «Хромосомы» создаются путем кодирования методом Грея.

Таблица 3.4. Параметры генетического алгоритма

1	Количество поколений	150
2	Количество «хромосом» в каждом поколении	12
3	Количество переменных в каждой «хромосоме»	3
4	Длина «хромосомы»	361 бит
5	Метод селекции	Stochastic Universal Selection (SUS).
6	Метод кроссинговера	Double point
7	Метод мутации	Constrain dependent

Коэффициенты нормализации и денормализации представляются в виде (3.26)-(3.28)

$$k_{\varepsilon_1} = k_{\varepsilon_{2n-1}} = \overline{k_{\varepsilon}}; k_{\varepsilon_2} = k_{\varepsilon_{2n-2}} = \chi_1 k_{\varepsilon}; \dots; k_{\varepsilon_n} = \prod_{j=1}^{n-1} \chi_j k_{\varepsilon} \quad (3.26)$$

$$k_{d\varepsilon/dt} = k_{d\varepsilon/dt_{2n-1}} = \overline{k_{d\varepsilon/dt}}; k_{d\varepsilon/dt_2} = k_{d\varepsilon/dt_{2n-1}} = \beta_1 \overline{k_{d\varepsilon/dt}}; \dots; \\ ; \dots; k_{d\varepsilon/dt_{2n}} = \prod_{j=1}^{n-1} \beta_j \overline{k_{d\varepsilon/dt}} \quad (3.27)$$

$$k_{u_1} = k_{u_{2n-1}} = \overline{k_u}; k_{u_2} = k_{u_{2n-2}} = \delta_1 \overline{k_u}; \dots; k_{u_n} = \prod_{j=1}^{n-1} \delta_j \overline{k_u} \quad (3.28)$$

Где $\chi_j \in [0, 1]$, $\beta_j \in [0, 1]$, $\delta_j \in [0, 1]$, $j = 1 \dots n$

Мы используем $r = 2n - 1$ нечетких правил, соответственно нам необходимо $N = 5n - 4$ параметров в каждой «хромосоме». Количество «хромосом» в каждом поколении выбирается и составляет $N=12$. Пример формирования популяции и состав «хромосомы» приведены на рисунке 3.23

«Хромосома» имеет 361 ген, например, для «хромосомы» c_i имеем матрицу

1x361, представленную формулой (3.29)

$$c_i = [\chi_{i1} \chi_{i2} \dots \chi_{i120} \beta_{i1} \beta_{i2} \dots \beta_{i120} \delta_{i1} \delta_{i2} \dots \delta_{i120}] \quad (3.29)$$

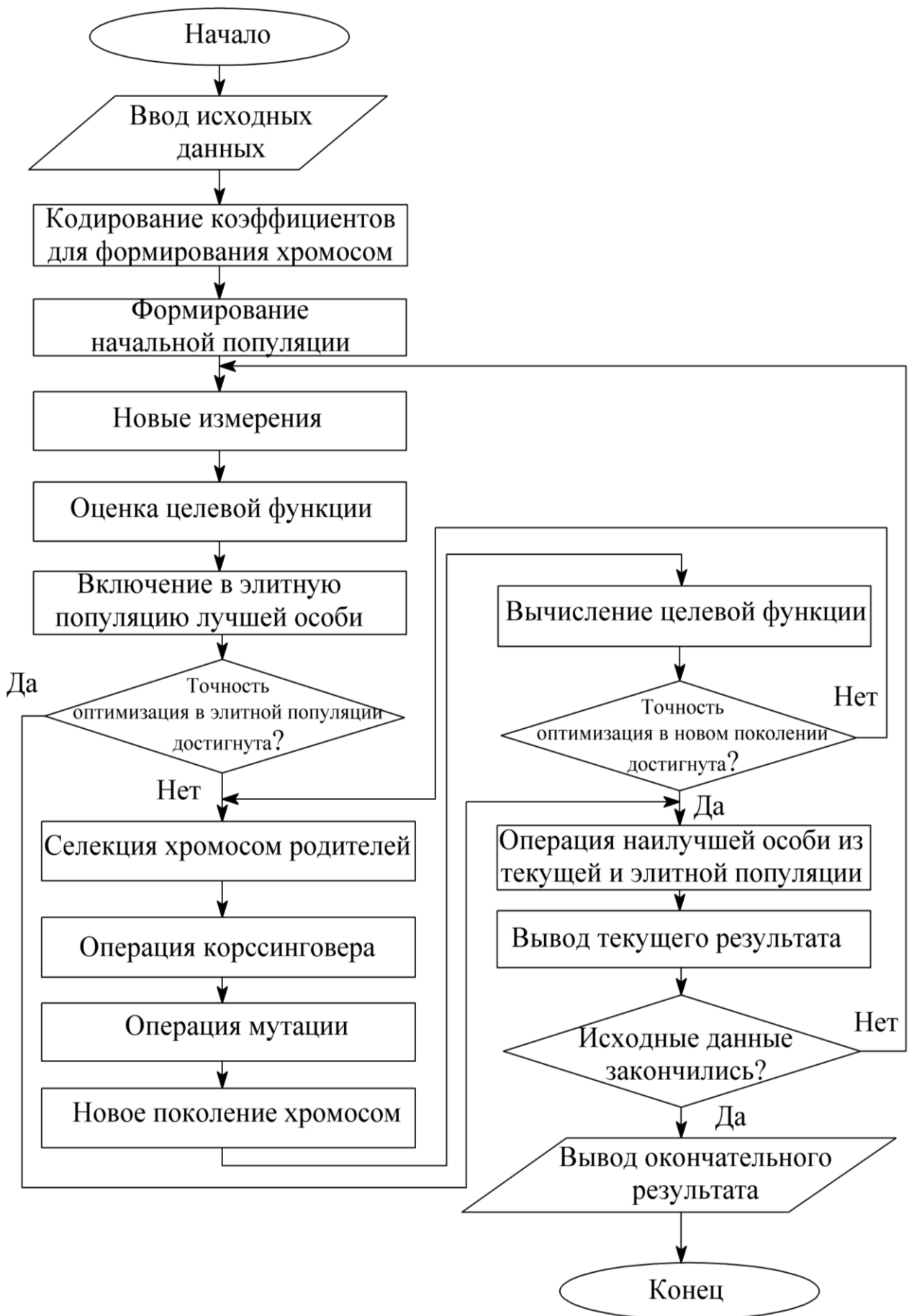


Рисунок 3.22 – Блок- схема работы ГА

$$N = 5n - 4$$

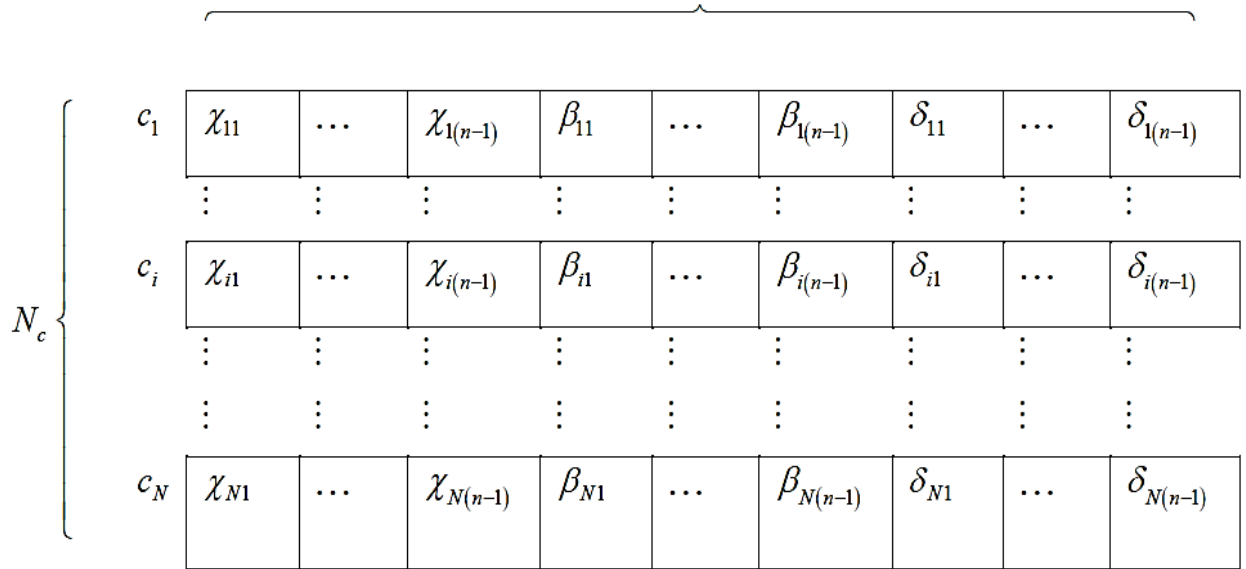


Рисунок 3.23 – Графическое представление «хромосомы» и «популяции»

следовательно, «популяция» P_c представляется матрицей 12×361 (формула (3.30))

$$P_c = \begin{bmatrix} \chi_{1_1} & \chi_{1_2} & \dots & \chi_{1_{120}} & \beta_{1_1} & \beta_{1_2} & \dots & \beta_{1_{120}} & \delta_{1_1} & \delta_{1_2} & \dots & \delta_{1_{120}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \chi_{12_1} & \chi_{12_2} & \dots & \chi_{12_{120}} & \beta_{12_1} & \beta_{12_2} & \dots & \beta_{12_{120}} & \delta_{12_1} & \delta_{12_2} & \dots & \delta_{12_{120}} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Схема кодирования с использованием действительных чисел повышает скорость обработки данных.

2) Новые измерения и оценивание целевой функции.

Новые измерения выполняются для уточнения текущих значений целевой функции в режиме реального времени.

Целевой функцией (3.31) является суммарная средняя квадратная ошибка оптимизации по выходной мощности ФЭУ согласно методу наименьших квадратов.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n-1} (P_{max} - P_{вых})^2} \rightarrow \min \quad (3.31)$$

Где,

P_{max} - максимальная мощность ФЭУ на ВВХ

$P_{\text{вых}}$ -выходная мощность ФЭУ

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

N -количество обучающей пары P_{max} и $P_{\text{вых}}$

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

3). В процессе своей работы ГА формирует резервную группу, которая также называется "элитной популяцией". Эта группа состоит из переменных, обладающих наилучшими целевыми функциями. На самом начальном этапе работы алгоритма "элитная популяция" заполняется переменными из первоначальной популяции, которые обладают наилучшими значениями целевых функций. Однако по мере продвижения алгоритма дальше, если переменная из нового поколения оказывается с лучшей целевой функцией, она заменяет переменную с наихудшей функцией принадлежности из "элитной популяции". Процедура поиска решения на конкретном шаге завершается и результаты выводятся только, если в "элитной популяции" присутствуют искомые переменные с минимальным значением целевой функции.

4). Метод селекции Stochastic Universal Selection (SUS) является стохастическим алгоритмом выбора, который обеспечивает равномерную селекцию. В данном методе "хромосомы" представлены отрезком прямой, длина которого пропорциональна значению целевой функции. Для перемещения по этой прямой используется постоянный шаг, который выбирается произвольно в начале алгоритма. После каждого шага происходит выбор "хромосомы" в пределах точки, где был совершен этот шаг.

5). Double point (двухточечный кроссинговер) – это метод кроссинговера, при котором две точки скрещивания выбираются случайным образом. В результате скрещивания в пределах этих двух точек образуется «хромосома»-потомок. Пример такого кроссинговера представлен в таблице 3.5.

6). Проверка окончательного условия оптимизации — это важный этап в работе ГА. Цель этого этапа заключается в определении, было ли достигнуто

оптимальное решение задачи оптимизации или нет.

Таблица 3.5. Метод кроссинговера Double point

«Хромосомы»- родители	Точки скрещивания	«Хромосома»- потомок
$X=(a\ b\ c\ d\ e\ f\ g\ h\ e)$	$\lambda_1=2$	$P=(a\ b\ c\ 4\ 5\ 6\ 7\ h\ e)$
$Y=(1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9)$	$\lambda_2=7$	

Условием остановки работы ГА заключается в следующем, если:

Условие окончания работы генетического алгоритма предусматривает следующую ситуацию: когда как минимум одна искомая переменная в текущем поколении достигает минимального значения целевой функции, это является доказательством того, что популяция алгоритма сходится к оптимальному решению. В таком случае полное выполнение поставленной задачи достигнуто, и работа генетического алгоритма завершается. Также, если на каждом шаге достигнуто максимальное число поколений, это означает, что ГА завершил свою работу. При выполнении данных условий происходит вывод результата. Это означает, что ГА возвращает оптимальные значения искомым переменных, соответствующие минимальному значению целевой функции. Этот результат является результатом успешной оптимизации, которая позволяет найти наилучшее решение в рамках задачи оптимизации.

Таким образом, проверка окончательного условия оптимизации играет важную роль в работе ГА. Она позволяет определить, нужно ли продолжать работу алгоритма или было ли достигнуто наилучшее решение. В случае успешной сходимости популяции ГА или достижения максимального числа поколений алгоритм выводит оптимальный результат, что является завершением процесса оптимизации.

7). Окончательный результат достигается путем выбора лучшего решения из элитной и текущей популяций. Этот выбор основан на переменной с наименьшей целевой функцией и принимается либо в качестве текущего результата алгоритма, либо в виде окончательного результата. Этот процесс

знаменует завершение работы алгоритма и подтверждает достижение наиболее оптимального результата по заданному критерию.

3.5.1. Алгоритм и программная реализация предложенного метода оптимизации

Внедрения интеллектуальных систем управления способствуют повышению эффективности и надёжности ФЭУ. Поэтому руководствуясь Национальной Стратегией развития Республики Таджикистан на период до 2030 года для энергетического сектора, в котором поставлена задача повышения энергетической эффективности и управляемость всех секторов национальной экономики, разработана автоматизированная программа (приложение 5) для оптимизации РНЛ поиска ТММ ФЭУ методом ГА [105].

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, полученный 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 каждого ФП в переменные оптимизации алгоритма.

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 на рисунке 3.24 пятью областями: $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ (рис.2).

$x(1)$ – 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.

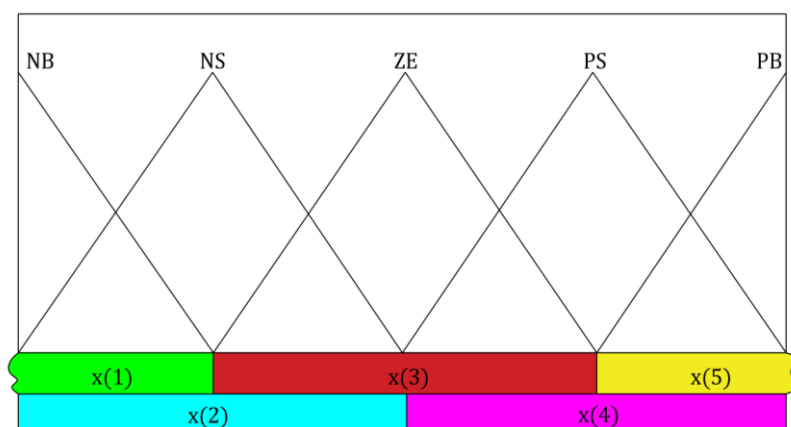


Рисунок 3.24 – Структура оптимизации параметров РНЛ

Блок-схема программы оптимизации параметров РНЛ представлена на рисунке 3.25. Блок-схема, приведенная на рисунке 3.25, работает следующим образом. Сначала вводятся параметры РЛН (функции принадлежности и предел изменений входных переменных). После этого задается предел 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.

После минимизации целевой функции ГА выводит оптимизируемые параметры РНЛ $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$. На рисунке 3.26 представлены графики наилучшей и средней пригодности "хромосом". Анализируя данные графики,

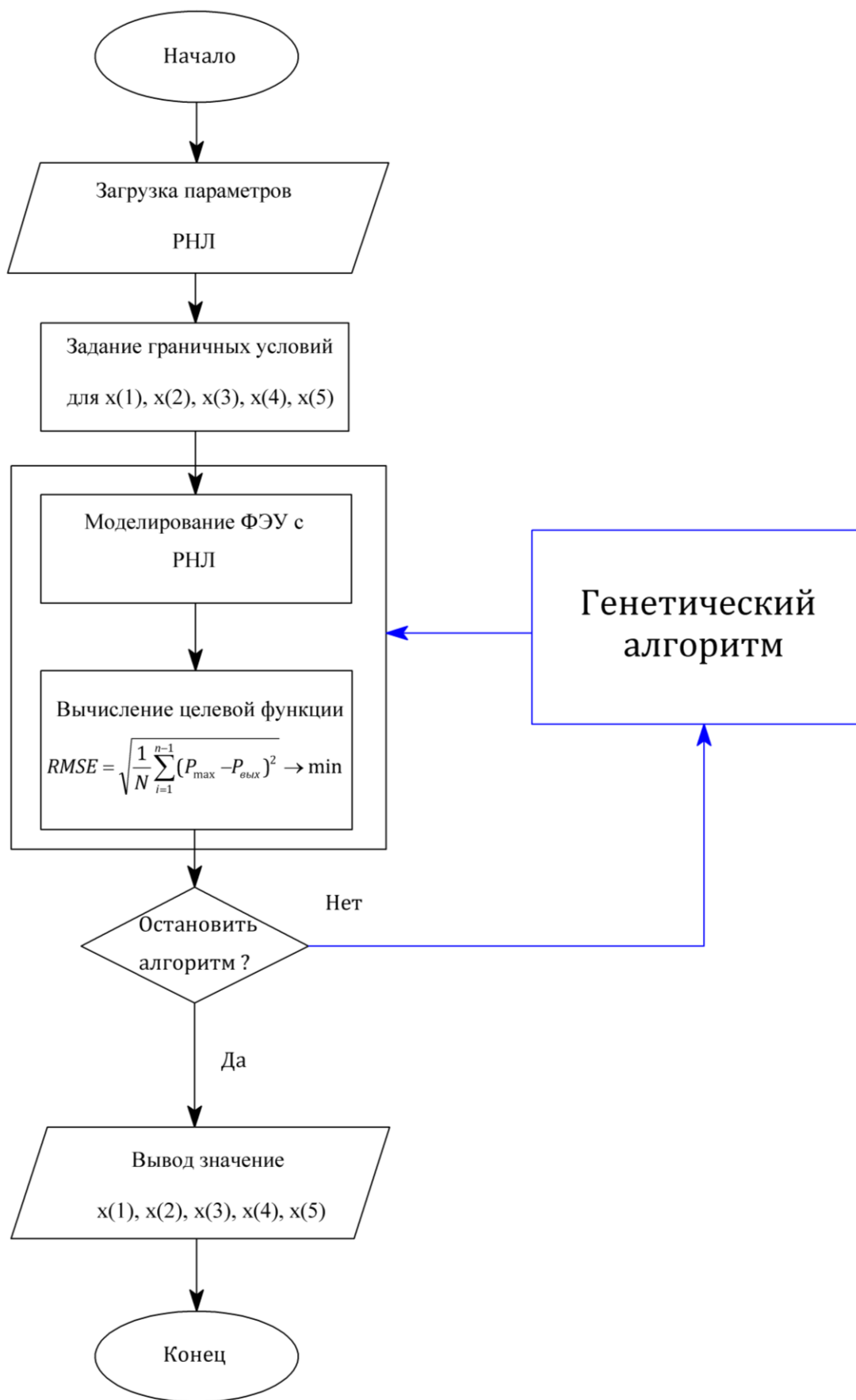


Рисунок 3.25 – Блок – схема оптимизации параметров РНЛ генетическим алгоритмом

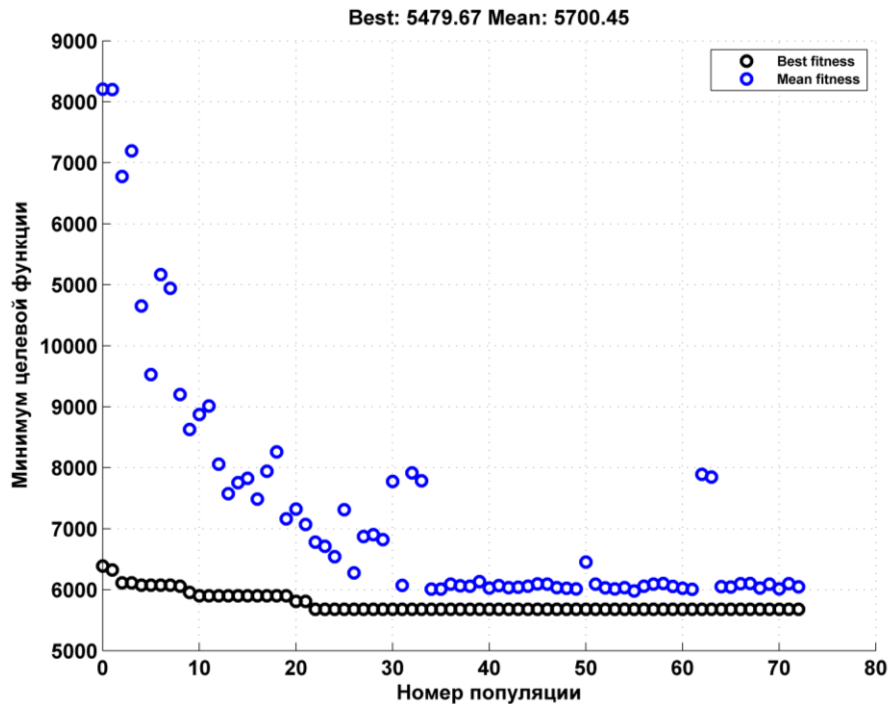


Рисунок 3.26 – График наилучшей и средней пригодности

можно сделать следующие выводы. Вначале процесс минимизации целевой функции происходит достаточно быстро, однако уже после 30-го поколения скорость снижения значения становится замедленной. При этом по итогам 74-го поколения достигается оптимальное решение при оптимизации переменных. Это означает, что на данном этапе итераций удалось найти такие значения переменных, которые обеспечивают минимальное значение целевой функции. Важно отметить, что при этом прошло значительное количество поколений, что может свидетельствовать о сложности оптимизационной задачи и необходимости продолжить исследования в данном направлении. В целом, представленные графики предоставляют важную информацию о процессе оптимизации и его результате.

3.6. Моделирование РНЛ с оптимизированными параметрами

Модельное исследование РНЛ с оптимизированными параметрами (РНЛО) проводится на имитационной модели (рис.3.18) в программе MatLab. В таблице 3.1. приведена база правил РНЛ. Функции принадлежности ошибки E , скорости изменения ошибки C_E и логического выхода оптимизированных ГА приведены на рисунках 3.27-3.29.

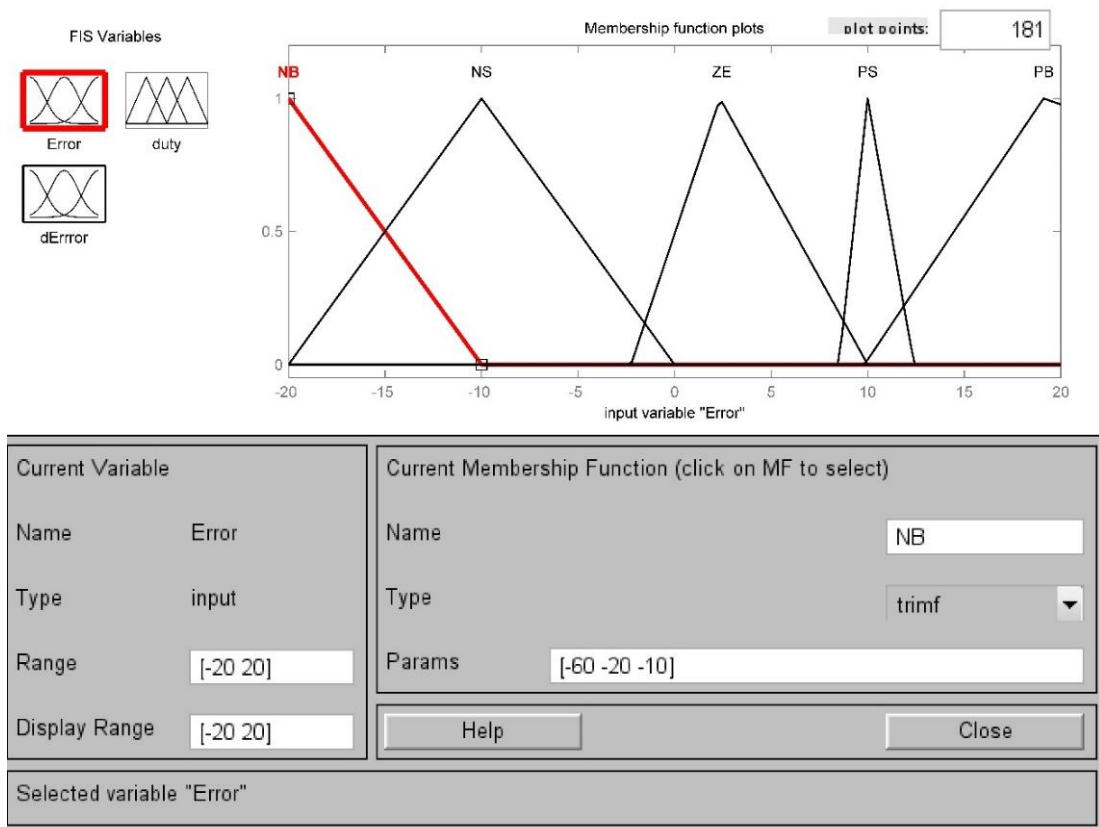


Рисунок 3.27 – Оптимизированная функция принадлежности ошибки E

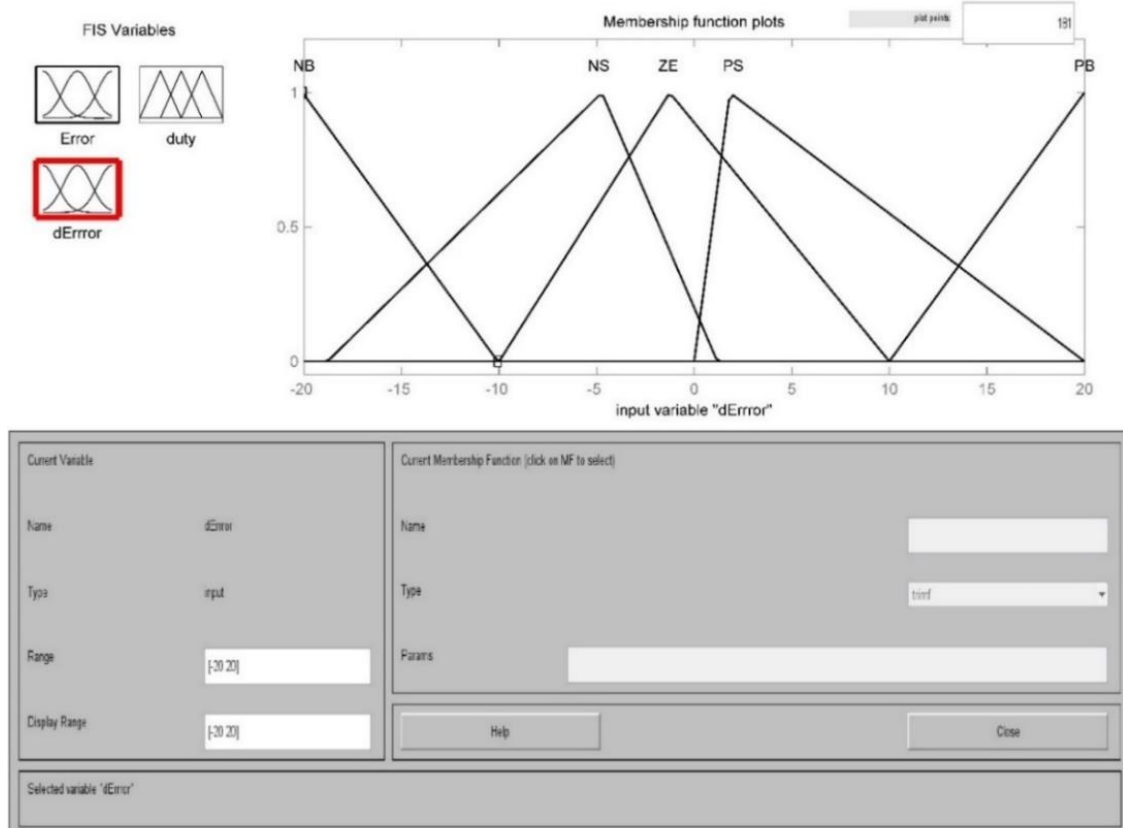


Рисунок 3.28 – Оптимизированная функция принадлежности скорости изменения ошибки C_E .

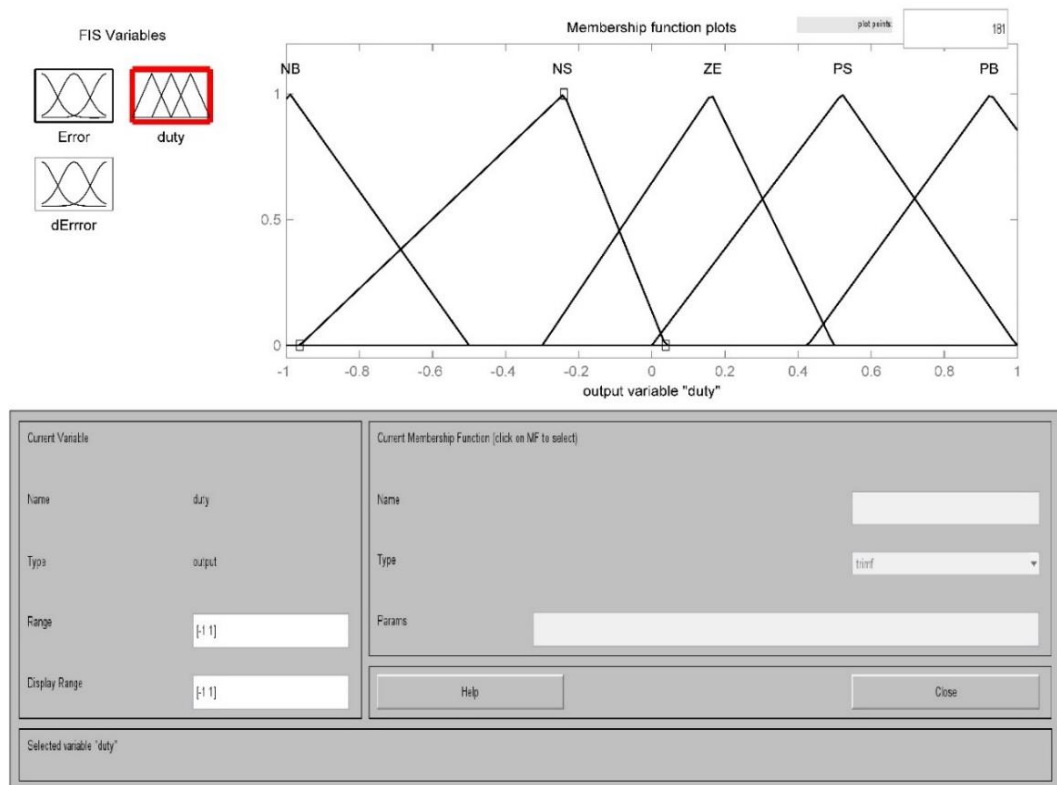


Рисунок 3.29 – Оптимизированная функция принадлежности логического выхода

Анализ влияния оптимизированной РНЛО на эффективность системы рассмотрим при изменении условий окружающей среды (температуры и уровня СИ). На рисунке 3.30 приводятся переходные процессы выходной мощности ФЭУ при изменении уровня СИ. На данном рисунке приводятся переходные процессы алгоритмов возмущения и наблюдения P&O, возрастающей проводимости InC, простого нечеткого регулятора РНЛ и оптимизированного РНЛО. Анализ рисунка показывает, что при уровне СИ 800 Вт/м^2 поиск и обработка ТММ регулятором РНЛО производится быстрее относительно других регуляторов. Кроме того, регулятор РНЛО имеет низкое колебание и относительно высокую эффективность по сравнению с классическими регуляторами. При увеличении уровня СИ от 800 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 отчетливо видно, что оптимизированный регулятор РНЛО имеет преимущество по быстродействию на 0.05с , по колебанию выходной мощности $\mp 10 \text{ Вт}$, в то время как другие регуляторы колеблются в пределах $\mp 50 - 70 \text{ Вт}$ (рис.3.19) и по эффективности слежения ТММ $1-1.5\%$.

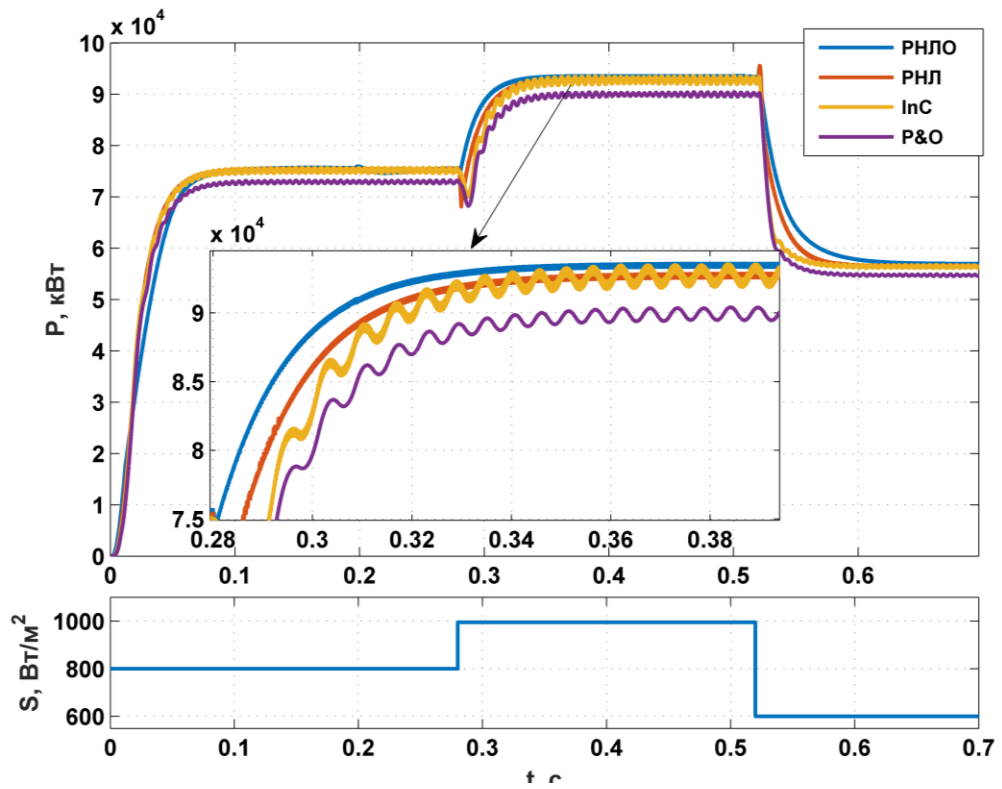


Рисунок 3.30 – Переходный процесс изменения выходной мощности ФЭУ при различных значениях СИ.

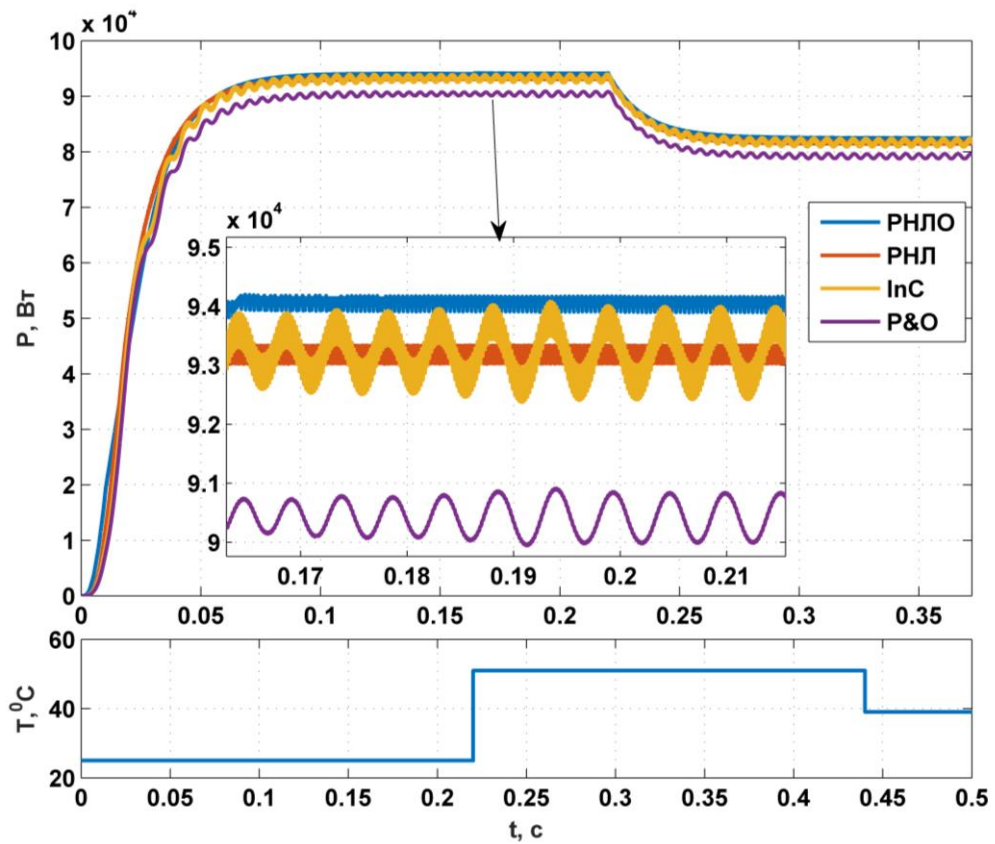


Рисунок 3.31 – Временная диаграмма изменения выходной мощности ФЭУ при различных значениях температуры.

Необходимо отметить, что температура окружающей среды является немаловажным фактором, влияющим на выходные характеристики ФЭУ. Поэтому на рисунке 3.31 представлена временная диаграмма изменения мощности ФЭУ при различных значениях рабочей температуры. Оценка временной диаграммы изменения мощности ФЭУ показывает, что при изменении уровня температуры окружающей среды в пределах 25°C-50°C регулятор РНЛО имеет высокую эффективность и низкое колебание мощности.

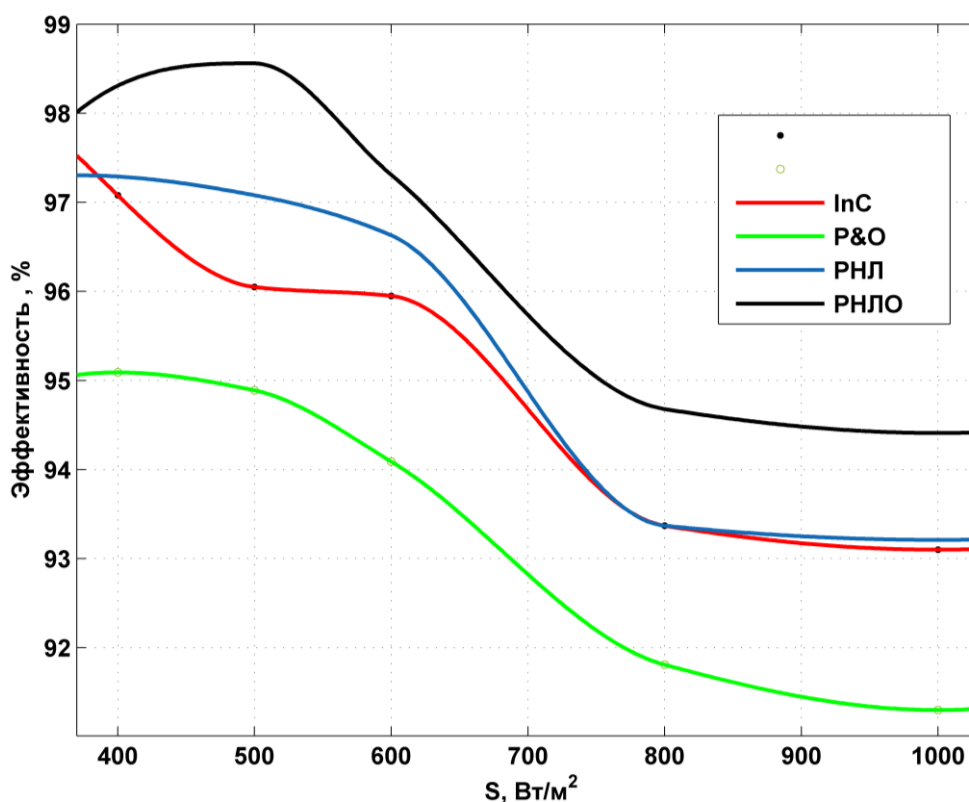


Рисунок 3.32 – Эффективность работы различных алгоритмов

Важно отметить, что при работе алгоритмов P&O и InC на рисунке 3.31 можно увидеть волнообразные колебания мощности при скачкообразном изменении температуры. Это наглядное подтверждение того, что во время работы классических алгоритмов поиска ТММ 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 ТММ, поскольку колебания очевидно ухудшают эффективность МРРТ. Однако без таких колебаний алгоритм не может

обнаружить изменения кривых ВВХ из-за изменений условий окружающей среды. В данном контексте разработанный РНЛО на основе генетического алгоритма позволяет поддерживать колебание рабочей точки вокруг ТММ с крайне малым отклонением при переходе рабочей точки в зоны «ZE».

Детальный анализ работы алгоритмов приведен в таблице 3.6. Из таблицы видно, что алгоритм **РНЛО** при значениях солнечной инсоляции 600 Вт/м², 800 Вт/м², 1000 Вт/м² имеет самую высокую эффективность по сравнению с классическими алгоритмами. На рисунке 3.32 иллюстрирована зависимость эффективности ФЭУ от уровня СИ.

Таблица 3.6. Результаты моделирования ФЭУ

S , Вт/м ²	P_{max} , Вт	$P_{вых}$, Вт				Эффективность, %			
		P&O	InC	РНЛ	РНЛ GA	P&O	InC	РНЛ	РНЛ GA
600	58985	55500	56600	57000	57400	94.09	95.95	96.63	97.31
800	80050	73500	75225	74750	75750	91.81	93.37	93.37	94.68
1000	100000	91300	93105	93210	94.414	91.3	93.1	93.21	94.41

Анализ рисунка показывает, что максимум эффективности РНЛО достигается при значениях уровня СИ 500 Вт/м². 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, как это было сделано в п 3.4 для базовой настройки параметров нечеткой логики.

Выводы и результаты по третьей главе

В третьей главе в результате выполненных исследований разработана и описана методика создания интеллектуальной системы управления ФЭУ на основе РНЛ, которая позволяет повысить эффективность ФЭУ в различных условиях окружающей среды.

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.

ФЭУ с РНЛ демонстрирует высокую точность работы. РНЛ способен адаптироваться к различным условиям и изменениям внешних параметров, что позволяет системе эффективно контролировать и управлять процессом генерации энергии. Такая точность работы становится особенно важной в ситуациях, когда требуется максимальное использование солнечной энергии и достижение высокой эффективности работы системы.

Кроме того, в рамках диссертационной работы проведен эксперимент по оптимизации РНЛ с помощью ГА. Коэффициенты нормализации и денормализации, а также начальные значения коэффициентов РНЛ рассчитывались методом поиска локального минимума. Как показали результаты моделирования, отслеживание ТММ нечетким регулятором, оптимизированным с помощью ГА, производится с эффективностью 96%. Следовательно, полученные результаты свидетельствуют об эффективности данного метода регулирования.

Таким образом разработанная система управления ФЭУ на основе регуляторов нечеткой логики позволяет высокой эффективности процесса преобразования солнечной энергии в ФЭУ при изменяющихся условиях окружающей среды.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФЭУ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

4.1. Постановка задачи

В этой главе представлена реализация в реальном времени системы отслеживания ТММ ФЭУ на основе РНЛЮ. С этой целью создается физическая модель ФЭУ для исследования работоспособности разработанного регулятора. Функциональная схема физической модели, представленной на рисунке 4.1, 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 ФЭМ на нагрузку с помощью повышающего преобразователя. В качестве регулятора применяется запрограммированный **ARDUINO**, который будет действовать как регулятор МРРТ на основе нечеткой логики. 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 ФЭМ используются датчики тока и напряжения. Сигналы от датчиков передаются контроллеру и после обработки контроллер отправляет 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 фотоэлектрической установки. Далее на контроллер

загружается оптимизированный алгоритм на основе нечеткой логики и производится сравнение производительности ФЭУ.

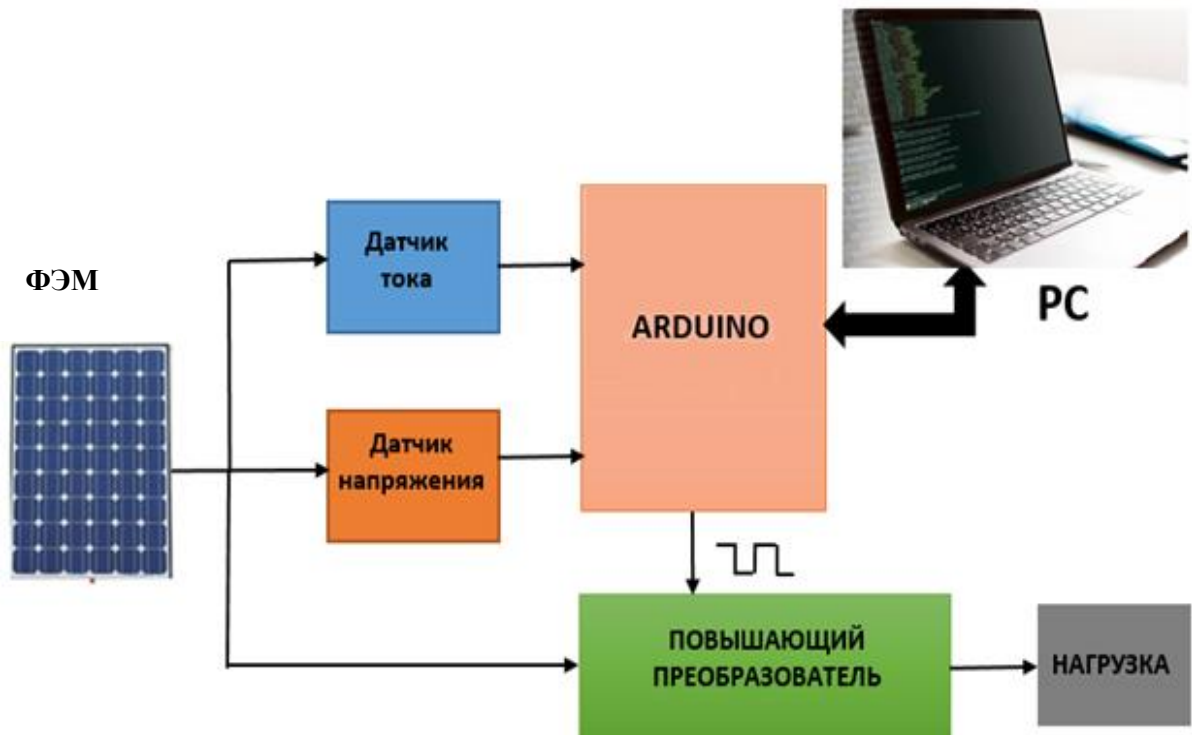


Рисунок 4.1 – Функциональная схема физической модели ФЭУ

4.2. Аппаратные компоненты физической модели ФЭУ

4.2.1 Фотоэлектрический модуль

Данный компонент является основной частью физической модели, которая была изучена и смоделирована в предыдущих главах диссертационной работы.



Рисунок 4.2 – Внешний вид ФЭМ.

Фотоэлектрический модуль представляет собой генератор электроэнергии, вырабатывающий мощность под действием СИ, которую предлагаемый контроллер на основе регулятора нечеткой логики будет регулировать для извлечения максимальной выходной мощности. На рисунке 4.2 показан внешний вид ФЭМ, характеристики которого представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Основные характеристики ФЭМ.

	Тип ФЭМ	монокристаллическая
1	Максимальная выходная мощность, Вт	8
2	Напряжение в ТММ, В	6
3	Ток в ТММ, А	1.43
4	Напряжение холостого хода, В	7.2
5	Ток короткого замыкания, А	1.62
6	КПД, %	17

4.2.2 Программируемый контроллер ARDUINO

Это устройство представляет собой тип микроконтроллеров, которые являются мозгом регулятора слежения ТММ. Более того, их работа зависит от кода, который уже запрограммирован и загружен в плату с помощью программного обеспечения Arduino с открытым исходным кодом (IDE). На рисунке 4.3 показаны базовая плата Arduino Uno и окно кода Arduino. Также технические характеристики Arduino Uno показаны в таблице 4.2.

Данный контроллер обладает 20-ю портами ввода-вывода, из которых 6 способны работать в качестве исходного источника ШИМ-сигнала, предназначенного для плавной регулировки мощности, тока, скорости, яркости и всего остального, что требует регулирования с помощью широтно-импульсной модуляции. Кроме того, 6 аналоговых портов способны обрабатывать сигналы от датчиков и использоваться в качестве цифрового выхода. Один из портов направлен на USB с помощью микроконтроллера ATmega328P, который здесь используется вместо стандартного регулятора USB-TTL, присутствующего на

более старых платформах. Прошивка данного контроллера доступна для свободного скачивания.

Программируемый микроконтроллер ATmega имеет в своей структуре следующие компоненты:

1. Процессор (CPU): Отвечает за выполнение программ и управление остальными компонентами микроконтроллера.

2. Тактовый генератор (GCK): Генерирует тактовые сигналы, которые синхронизируют работу микроконтроллера.

3. Постоянное запоминающее устройство по технологии Flash (FlashROM): Используется для хранения программного кода микроконтроллера. Программы могут быть записаны и стерты множество раз.

4. Постоянное запоминающее устройство по технологии EEPROM: Используется для хранения данных, которые должны сохраняться при отключении питания микроконтроллера. Данные могут быть записаны и стерты множество раз.

5. Оперативное запоминающее устройство статического типа (SRAM): Используется для временного хранения данных во время работы микроконтроллера. Содержимое SRAM теряется при отключении питания.

6. Набор периферийных устройств: Включает в себя различные внешние устройства, такие как таймеры, счетчики, аналогово-цифровые преобразователи (ADC), цифрово-аналоговые преобразователи (DAC), интерфейсы коммуникации (например, UART, SPI, I2C), порты ввода-вывода (GPIO) и другие компоненты, которые расширяют возможности микроконтроллера для подключения внешних устройств и выполнения различных задач управления.

Микроконтроллер ATmega является мощным и гибким инструментом для разработки систем управления, включая использование в качестве системы управления преобразователем, такого как генератор управляющих импульсов для транзисторного ключа G1.

Для связи с различными дисплеями и другими исполнительными устройствами предусмотрены SPI и I2C технологии.

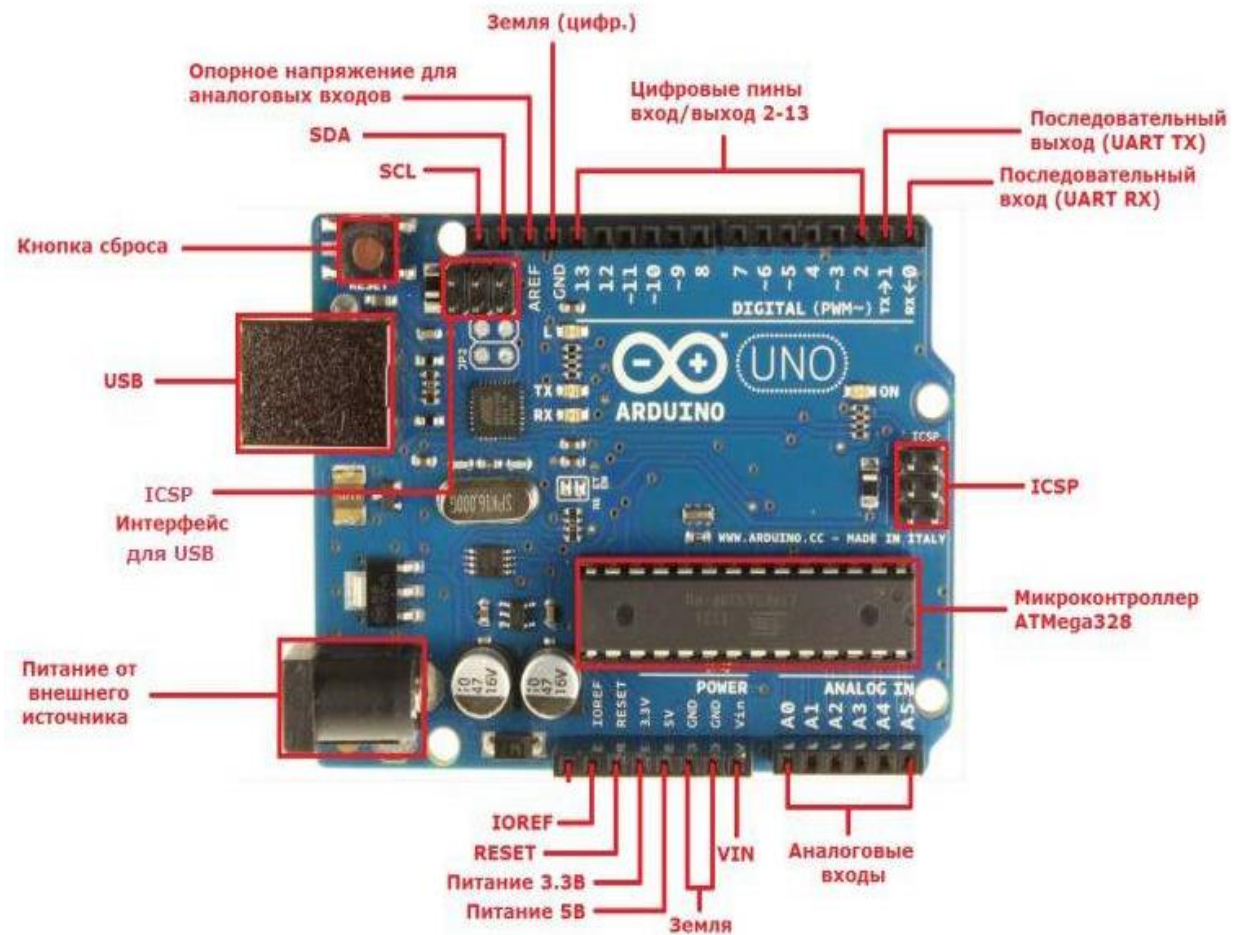


Рисунок 4.3 – Внешний вид программируемого контроллера Arduino

```

// Count of member function for each Input
int fis_gIMFCount[] = { 5, 5 };

// Count of member function for each Output
int fis_gOMFCount[] = { 5 };

// Coefficients for the Input Member Functions
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff1[] = { -60, -20, -10 };
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff2[] = { -20, -10, 0 };
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff3[] = { -10, 0, 10 };
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff4[] = { 0, 10, 20 };
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff5[] = { 10, 20, 60 };
FIS_TYPE* fis_gMFI0Coeff[] = { fis_gMFI0Coeff1, fis_gMFI0Coeff2, fis_gMFI0Coeff3, fis_gMFI0Coeff4, fis_gMFI0Coeff5 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff1[] = { -60, -20, -10 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff2[] = { -20, -10, 0 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff3[] = { -10, 0, 10 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff4[] = { 0, 10, 20 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff5[] = { 10, 20, 60 };
FIS_TYPE* fis_gMFI1Coeff[] = { fis_gMFI1Coeff1, fis_gMFI1Coeff2, fis_gMFI1Coeff3, fis_gMFI1Coeff4, fis_gMFI1Coeff5 };

```

Печать завершена

Рисунок 4.4 – Окно кода Arduino.

Таблица 4.2. Характеристики контроллера Arduino

Тип микроконтроллера	ATmega328P
Напряжение питания микроконтроллера	5 В
Рекомендуемое напряжение питания платы	7 – 12 В
Предельно допустимое напряжение питания платы	6 – 20 В
Цифровые входы-выходы	14 (из них 6 поддерживают ШИМ)
Выходы ШИМ модуляции	6
Аналоговые входы	6
Допустимый ток цифровых выходов	20 мА
Допустимый ток выхода 3,3 В	50 мА
Объем флэш-памяти (FLASH)	32 кБ
Объем оперативной памяти (SRAM)	2 кБ
Объем энергонезависимой памяти (EEPROM)	1 кБ
Частота тактирования	16 МГц

4.2.3 Датчики напряжения и тока

Датчик напряжения и тока является неотъемлемой составляющей процесса измерения выходного напряжения и тока фотоэлектрической установки. Это устройство обладает способностью точно определять значения напряжения и тока, которые генерируются фотоэлектрической установкой во время ее работы. Одна из ключевых функций датчика напряжения и тока заключается в том, чтобы предоставить оператору или системе управления полную информацию о работе фотоэлектрической установки. Это позволяет в реальном времени контролировать и анализировать производимую энергию, на основе которой можно принимать соответствующие решения или вносить корректировки в работу установки. Для достижения точности и надежности измерения датчик напряжения и тока должен быть калиброван и соответствовать требованиям диапазона измеряемых значений. Это обеспечивает достоверность получаемой информации и помогает предотвратить нежелательные сбои или ошибки,

которые могут возникнуть в процессе работы фотоэлектрической установки. Применение датчика напряжения и тока в фотоэлектрической установке имеет ряд значимых преимуществ. Во-первых, он помогает в оптимизации работы установки, так как позволяет контролировать и управлять производимой энергией. Таким образом, оператор может осуществлять более эффективное использование энергии и получать максимальную выходную мощность. Кроме того, датчик напряжения и тока также улучшает безопасность работы фотоэлектрической установки. За счет постоянного мониторинга напряжения и тока датчик способен выявить и предупредить о возможных проблемах, таких как короткое замыкание или перегрузка. Это позволяет оператору принять соответствующие меры предосторожности и своевременно устранить потенциальные угрозы. Выбранные датчики совместимы с платой Arduino и не требуют внешнего источника питания. Кроме того, они были выбраны в соответствии с вырабатываемым фотоэлектрическим напряжением и током, который в данном случае не превышает 25 В и 20 А, чтобы гарантировать идеальную работу.

Датчик напряжения типа DC0-25V (рисунок 4.5) представляет собой электронный модуль, способный измерять входное напряжение в диапазоне от 0 до 25 вольт постоянного тока. Он представляет собой простейший резистивный делитель с электронной обвязкой, размещенной на печатной плате. Важным аспектом работы данного модуля является то, что поступающее напряжение уменьшается в 5 раз, что позволяет плате Arduino измерять его через аналоговый вход. Встроенный в плату Arduino 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) обеспечивает точность измерений на уровне $\pm 0,02445$ В.

Однако стоит отметить, что при использовании этого датчика в связке с регулятором с 3,3-вольтовой логикой, таким как ESP8266 и NodeMCU, а также версиями Arduino Pro Mini на 3,3 вольта и аналогичными платами, максимальное измеряемое значение напряжения не должно превышать 16,5 вольт.

Таким образом, датчик напряжения типа DC0-25V представляет собой полезный инструмент для измерения постоянного напряжения в широком

диапазоне, обеспечивая при этом высокую точность измерений и совместимость с различными устройствами на базе плат Arduino.

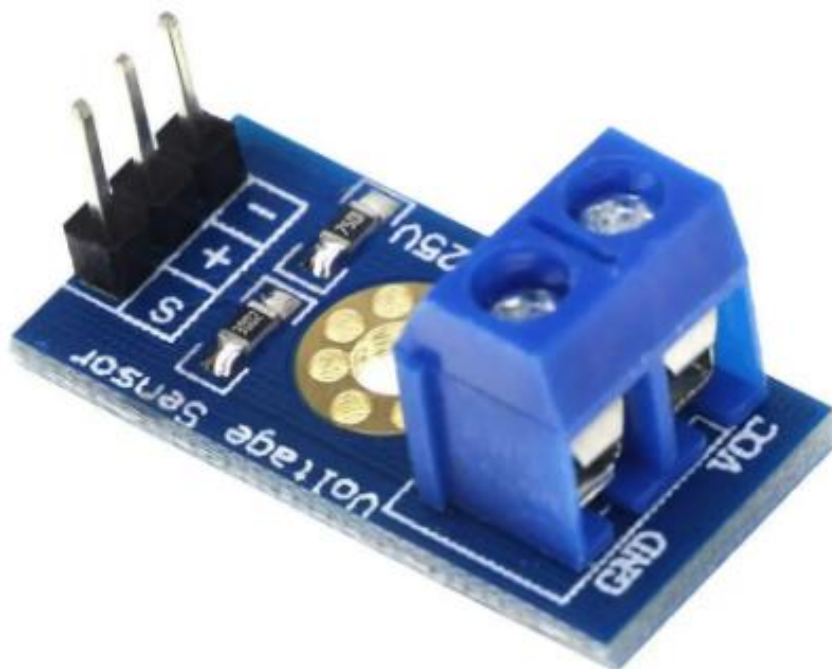


Рисунок 4.5 – Внешний вид датчика напряжения

Датчик тока ACS712 (рисунок 4.6) представляет собой устройство, состоящее из датчика Холла и медного проводника. Важно отметить, что уровень выходного напряжения сенсора пропорционален измеряемому току. Диапазон измерения данного датчика составляет от -5 А до 5 А, а его чувствительность составляет 185 мВ/А.

Интересно, что при отсутствии тока выходное напряжение датчика будет равняться половине напряжения питания. Отмечено также, что датчики ACS712 и ACS713 питаются от $+5$ В и имеют выход по напряжению. При токе, равном нулю, напряжение на выходе для датчика ACS712 составляет $2,5$ В и может отклоняться в сторону нуля или ближе к напряжению питания – это зависит от направления протекания тока. Значительно удобно то, что датчик ACS712 представляет экономное и прецизионное решение для измерения переменного и постоянного тока в промышленных, автомобильных, коммерческих системах и системах связи. Кроме того, устройство обеспечивает удобную реализацию для пользователя благодаря своему корпусу.

Основой устройства является прецизионный линейный датчик тока,

основанный на эффекте Холла, с медным проводником на нижней части. Когда ток протекает через медный проводник, создается магнитное поле, которое затем улавливается датчиком и преобразуется в пропорциональное напряжение. Точность работы устройства достигается за счет непосредственной близости магнитного сигнала к самому датчику.

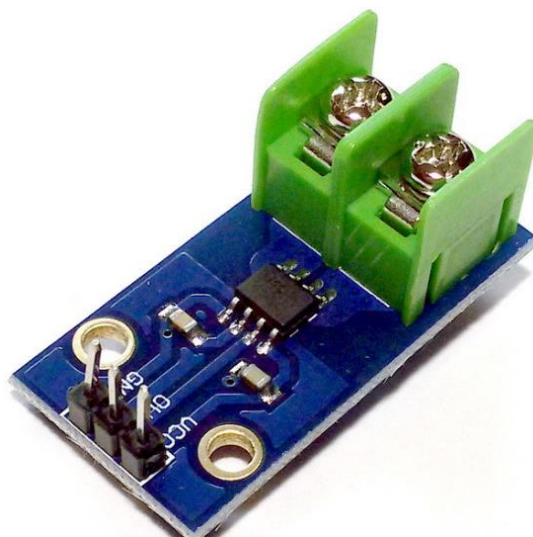


Рисунок 4.6 – Внешний вид датчика тока

Необходимо отметить, что напряжение в устройстве обеспечивается BiCMOS Hall микросхемой с низким смещением и заводскими настройками точности. Это дополнительно повышает точность и надежность работы датчика тока ACS712.

4.2.4. Импульсный повышающий преобразователь

Повышающий преобразователь DC-DC 400W 12A CC/CV на базе регулятора TL494 обладает независимой регулировкой тока и напряжения, что делает его идеальным решением для создания источников питания светодиодных модулей или зарядных устройств аккумуляторов с напряжением от 10В до 60В. Также этот преобразователь подходит для использования в регулируемых лабораторных блоках питания, для увеличения напряжения в автомобильных аудио-усилителях, в солнечной энергетике, проектах Arduino или DIY-устройствах, а также для других целей. Благодаря своим функциональным возможностям и высокой надежности этот преобразователь является основой для эффективной работы в различных сферах применения.

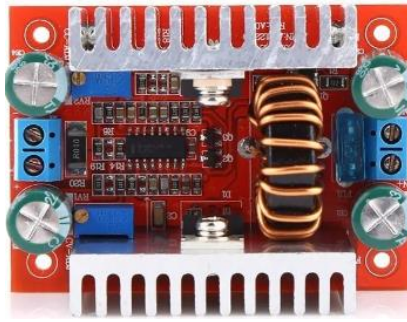


Рисунок 4.7 – Внешний вид повышающего преобразователя

У повышающего модуля DC-DC 400W (SN:A14122110 REV:A0) выходное напряжение не может быть меньше, чем входное.

При определенных параметрах рекомендуется дополнительное охлаждение в виде вентилятора:

- при выходном токе более 7 А
- при входном токе более 8 А
- при выходной мощности более 250 Вт
- при окружающей температуре свыше 40°C

Основные характеристики повышающего преобразователя DC-DC 400W 12A CC/CV на TL494 (SN: A14122110 REV: A0):

- Тип преобразователя: повышающий (*step-up DC-DC*)
- Маркировка: SN: A14122110 REV: A0
- Регулятор: TL494 (TL494CN)
- Входное напряжение: 8,5...50 В
- Максимальный входной ток: 15 А
- Регулируемое выходное напряжение: 10...60 В
- Регулируемый выходной ток: 0,2...12 А
- Рекомендуемая выходная мощность: ≤ 250
- Максимальная выходная мощность: 400 Вт (*с доп. охлаждением*)
- Эффективность преобразования КПД: $\leq 96\%$
- Частота преобразования: 150кГц
- Ток потребления покоя: 10 мА

- **Функции защиты:**
 - от перегрузки по току: есть (*15 А предохранитель на входе*)
 - от обратной полярности (от переплюсовки): нет (*рекомендуется обезопасить мощным диодом*)
 - от короткого замыкания на выходе: нет (*рекомендуется ставить предохранитель*)
- Рабочая температура: -40...+85 °С
- Габаритные размеры (Д×Ш×В): 67×48×27 мм

Назначение контактов повышающего DC-DC 400W 12A CC/CV на TL494 (SN:A14122110 REV:A0):

- IN+: + входного напряжения питания
- IN-: – входного напряжения питания
- +: + выходного напряжения
- -: – выходного напряжения

Регулировка параметров:

- CV adj: регулировка выходного напряжения
- CC adj: регулировка выходного тока.

4.3. Программное обеспечение физической модели ФЭУ

Разрабатываемая модель ФЭУ обладает широким спектром функций, обеспечиваемых программным обеспечением (ПО). Это ПО было разработано с использованием современных технологий и инструментов, включая интерфейс Arduino и интегрированные алгоритмы работы регулятора. Интерфейс Arduino является ключевым компонентом данного программного обеспечения. Он позволяет обмениваться данными между фотоэлектрической установкой и другими устройствами, такими как компьютеры или микроконтроллеры, обеспечивая стабильную и эффективную передачу информации и выполнение различных операций. Алгоритм работы регулятора представляет собой инновационный и высокоэффективный алгоритм на основе нечеткой логики,

специально разработанный для оптимального функционирования фотоэлектрической установки. Он контролирует и регулирует работу установки, обеспечивая оптимальное использование ресурсов и максимальную эффективность при преобразовании солнечной энергии в электрическую. В результате, благодаря программному обеспечению, разработанная модель фотоэлектрической установки обладает широкими возможностями и высокой надежностью. Благодаря использованию интерфейса Arduino и интегрированных алгоритмов установка способна эффективно работать и достигать оптимальной производительности в любых условиях и с различными нагрузками.

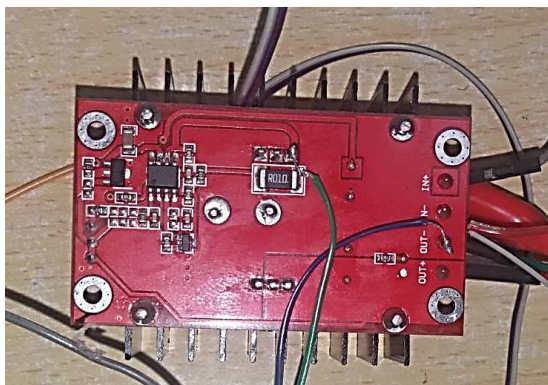


Рисунок. 4.8 – Модифицированный управляемый импульсный преобразователь

В качестве входных параметров алгоритмы, заложенные в представленный код, используют сигналы с датчиков тока и напряжения, реализация которых была рассмотрена ранее. Внутри алгоритмов реализуется алгоритм нечеткой логики, подробно изложенного в предыдущих главах, модифицированного с помощью генетических алгоритмов.

Изначально файл нечеткого регулятора, разработанный в MATLAB (mppt3.fis)), преобразуется в код Arduino (это было сделано с помощью веб-сайта:<http://www.makeproto.com>) Полный код включен в приложения к диссертации. Чтобы применить предложенный нечеткий алгоритм к реальному МРРТ, необходимо использовать управляемый DC-DC преобразователь регулятором Arduino С этой целью был изменен повышающий DC-DC преобразователь путем удаления контакта ШИМ с платы регулятора DC-DC и замены контакта ШИМ Arduino. Другими словами, вывод ШИМ Arduino был

подключен к выводу на плате, который подает сигнал ШИМ в транзистор повышающего преобразователя, а также записывает данные от ФЭУ. На рис. 4.8. показан процесс модификации повышающего преобразователя, где есть два внешних провода: зеленый для контакта ШИМ Arduino и синий для контакта заземления Arduino.

После завершения модификации преобразователя регулятор подключается к фотоэлектрической системе для регистрации данных от ФЭМ. Модифицированный повышающий преобразователь управлялся сигналом ШИМ, который вырабатывался Arduino в соответствии с изменением напряжения и тока ФЭМ. Изменение напряжения и тока ФЭУ зависит от изменения погодных условий, таких как освещенность и температура.

4.4. Результаты экспериментального исследования физической модели ФЭУ

Результаты аппаратной реализации (рис.4.9) представлены в виде выходной мощности, напряжения и тока ФЭУ, которые были получены в результате анализа работы регуляторов отслеживания ТММ (InC и РНЛО). Полученные значения тока, напряжения и мощности представлены в таблице 4.2. и рисунках 4.10-4.11.

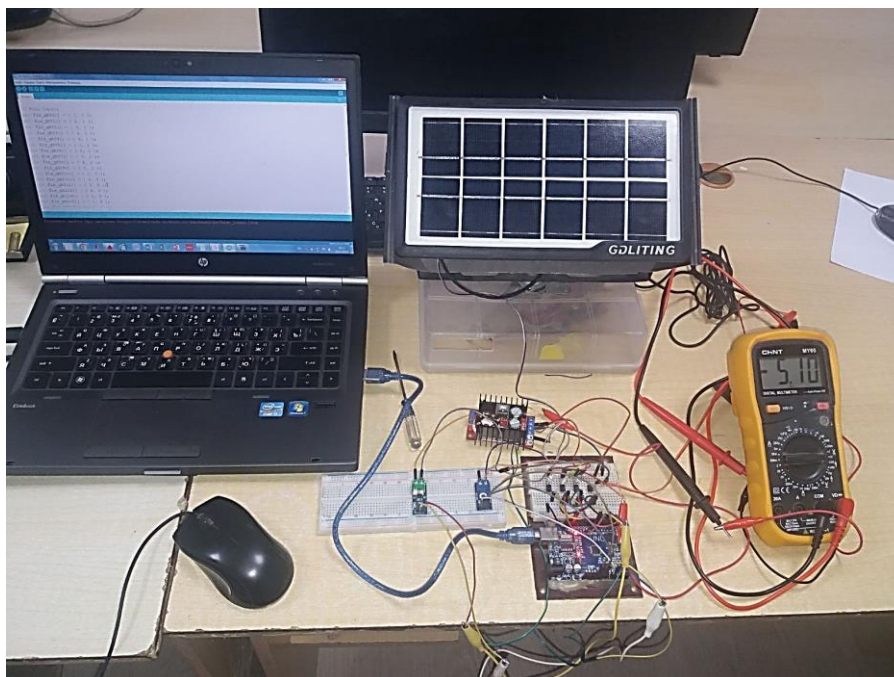


Рисунок 4.9 – Общий вид экспериментальной установки

На рисунках 4.10-4.11 показаны результаты экспериментальных исследований на физической модели ФЭУ, проведенных на кафедре автоматизированного электропривода и электрических машин ТГУ имени академика М.С. Осими (23 Октябрь 2023 г).

Рисунок 4.10 иллюстрирует временные диаграммы изменения мощности $P(t)$, тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ в ФЭУ. Анализ рисунка показывает, что разработанный РНЛО имеет высокую эффективность слежения за точкой ТММ ФЭУ по сравнению с классическим алгоритмом (InC).

Таблица 4.3. Результаты экспериментальных исследований

InC MPPT			РНЛ GA MPPT			Время	Дата
U_{pv} В	I_{pv} А	P_{pv} Вт	U_{pv} В	I_{pv} А	P_{pv} Вт		
2.20	2.01	4.422	1.98	2.25	4.4662	10:35	23/11/23
2.19	2.02	4.4238	2.06	2.17	4.4768	10:37	23/11/23
2.20	1.98	4.356	2.01	2.20	4.4126	10:39	23/11/23
2.21	2.01	4.4421	2.14	2.09	4.4865	10:41	23/11/23
2.22	1.93	4.4286	2.14	2.09	4.4684	10:44	23/11/23
2.22	1.93	4.4286	2.18	2.06	4.4684	10:50	23/11/23
2.19	1.8	3.942	1.91	2.08	3.9864	10:55	23/11/23
2.19	1.8	3.942	1.91	2.08	3.9864	11:00	23/11/23
2.19	1.8	3.942	1.91	2.08	3.9864	11:05	23/11/23
2.19	1.8	3.942	2.01	2.09	4.2144	11:15	23/11/23
2.23	2.01	4.4823	2.16	2.09	4.5144	11:25	23/11/23
2.23	2.01	4.4823	2.17	2.11	4.5787	11:35	23/11/23
2.22	1.97	4.3734	2.09	2.11	4.4171	11:50	23/11/23
2.22	1.95	4.2624	2.11	2.12	4.5216	12:00	23/11/23
2.24	2.01	4.5024	2.17	2.11	4.5787	12:05	23/11/23

Результаты экспериментальных исследований показали, что эффективность слежения за ТММ улучшается в среднем на 1.5% при

использовании разработанного РНЛО по сравнению с классическим алгоритмом. Это подтверждает достоверность предполагаемой теории разработки регуляторов на основе нечеткой логики.

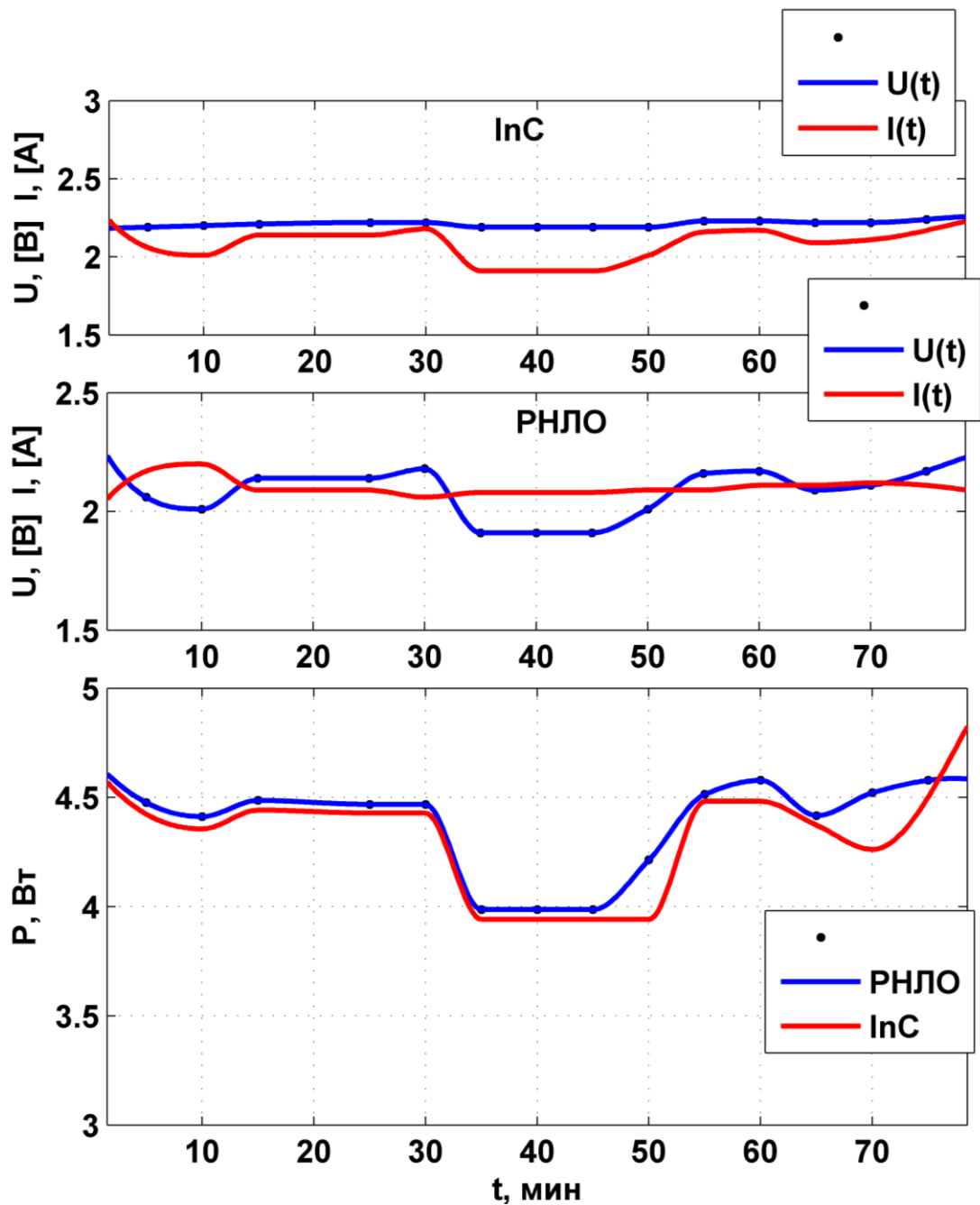


Рисунок 4.10 – Временная диаграмма изменения мощности $P(t)$, тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ ФЭУ

На рисунке 4.11 показаны экспериментальные результаты мощности ФЭУ в течение обычного дня (23 Октябрь 2023 г.), с РНЛО и классическим алгоритмом (InC). Как видно на рисунке 4.11, энергия, получаемая с помощью интеллектуальной системы слежения, на 1.5 % выше по сравнению с

классическими алгоритмами в системе управления. Это означает, что интеллектуальная система слежения способна повысить эффективность системы и обеспечить более высокий уровень производства электроэнергии.

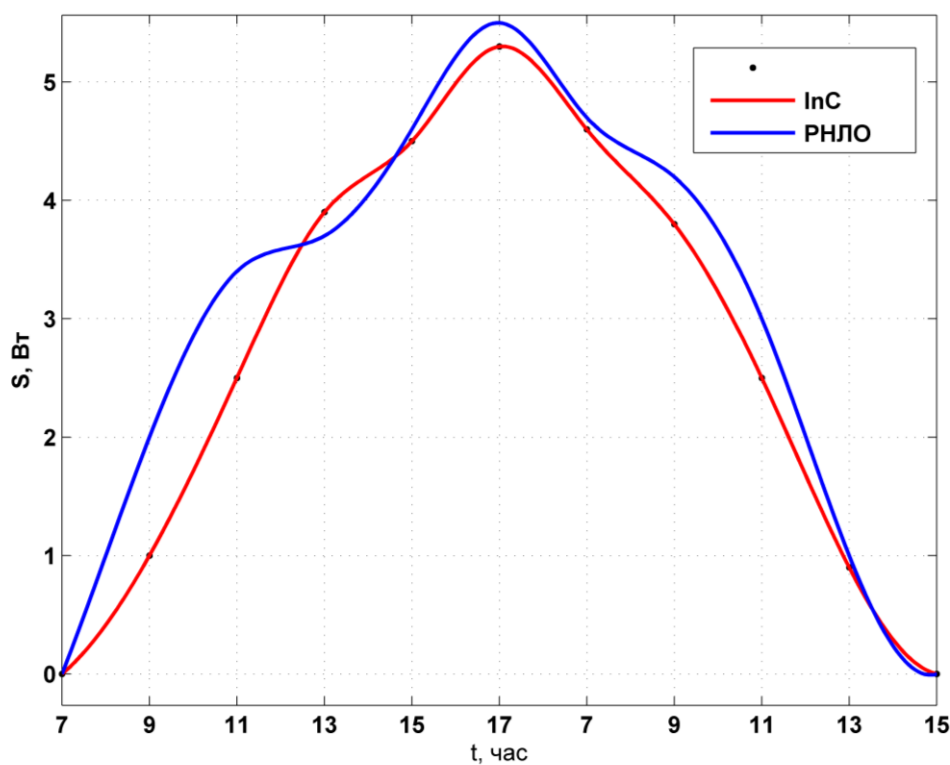


Рисунок 4.11 – Сравнение вырабатываемой мощности ФЭУ с РНЛО и классическим алгоритмом InC

Можно заключить, что результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность разработанного РНЛО и его преимущества по сравнению с классическим алгоритмом слежения за ТММ ФЭУ.

4.5. Расчет экономической эффективности внедрения интеллектуальной системы управления

Результаты проведенных исследований демонстрируют возможность существенного увеличения выработки мощности ФЭУ при введении РНЛО в 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. СЭС состоит из последовательно-параллельной комбинации ФЭМ, который подключается на

вход преобразователя постоянного напряжения в переменное (DC/AC преобразователь). Процесс выработки электроэнергии в СЭС можно разделить на 2 стадии. Первая стадия – это преобразование солнечной энергии в электрическую энергию постоянного тока с помощью фотоэлектрических ФЭМ. Вторая стадия включает в себя электрическую цепь преобразования напряжения постоянного тока ФЭМ в переменное. Для этой цели применяется повышающий преобразователь постоянного тока на постоянный (DC/DC-преобразователь), трехфазные инверторы. Стоит отметить, что РНЛО, разработанный на базе ПК Matlab/Simulink, необходимо преобразовать в программу, которая устанавливается в DC/DC-преобразователь. Для этой цели программа преобразуется специальными программистами, и в порядок расчета экономической эффективности необходимо учитывать затраты на разработку программного продукта.

Срок окупаемости затрат от внедрения РНЛО можно вычислить из формулы:

$$T = \frac{3}{\Pi} \quad (4.1)$$

Где Π -годовая экономическая прибыль, (сом.)

3-затраты на разработку программного продукта, (сом)

Годовую экономическую прибыль можно вычислить как разницу дохода, полученного за год электростанцией с внедрением РНЛО и без использования регулятора:

$$\Pi = D_2 - D_1 \quad (4.2)$$

где D_1 – доход электростанции без РНЛО, (млн сом.);

D_2 - доход электростанции с РНЛО, (млн сом.).

Доходы, получаемые электростанцией, можно вычислить как:

$$D_1 = W_1 \cdot t \quad (4.3)$$

$$D_2 = W_2 \cdot t \quad (4.4)$$

где W_1 – выработка электроэнергии без РНЛО, (кВт/ч);

W_2 – выработка электроэнергии с РНЛО, (кВт/ч);

t – размер тарифа на электроэнергию, (сом. /(кВт/ч).

4.5.1 Расчет затрат на разработку программного продукта

Смета затрат на разработку программного продукта включает в себя следующие статьи:

- затраты на оплату труда программисту;
- отчисления на социальные нужды (30 % от затрат на оплату труда);
- прочие затраты.

Расчет затрат на оплату труда разработчика

Общая заработная плата разработчика программы рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{общ}} = ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}} + \text{Ос. н.} \quad (4.5)$$

где $ЗП_{\text{осн}}$ – основная заработная плата разработчика, сом.,

$ЗП_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата разработчика, сом.,

Ос. н. – отчисления на социальные нужды, сом.

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле

$$ЗП_{\text{осн}} = C_{\text{ч.пр}} \cdot T \quad (4.6)$$

где $C_{\text{ч.пр}}$ – часовая оплата труда программиста, сом./час.

T – трудоемкость разработки программного продукта 140.1 чел-час [106];

Часовая оплата труда программиста

$$C_{\text{ч.пр}} = \frac{П_{\text{пр}}}{\Phi_{\text{р.в.}}} \quad (4.7)$$

где $П_{\text{пр}}$ – месячная заработная плата программиста, сом.

$\Phi_{\text{р.в.}}$ – месячный фонд рабочего времени, час. (168 час.)

$$C_{\text{ч.пр}} = \frac{5000}{168} = 29.76 \text{ сом/час}$$

$$ЗП_{\text{осн}} = C_{\text{ч.пр}} \cdot T = 29.76 \cdot 140.1 = 4169.36 \text{ сом.}$$

Расчет дополнительной заработной платы производится по формуле:

$$ЗП_{\text{доп}} = \frac{ЗП_{\text{осн}} \cdot N_{\text{д.з.п}}}{100} \quad (4.8)$$

где $N_{\text{д.з.п}}$ – норматив дополнительной заработной платы, %. (15. .19 %).

$$ЗП_{\text{доп}} = \frac{ЗП_{\text{осн}} \cdot Н_{\text{д.з.п}}}{100} = \frac{4169 \cdot 16}{100} = 667.04 \text{ сом.}$$

Расчет отчисления на социальные нужды производится по выражению:

$$\text{Ос. н.} = \frac{(ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}}) \cdot Н_{\text{о.с.н.}}}{100} \quad (4.9)$$

где $Н_{\text{о.с.н.}}$ – норматив отчислений на социальные нужды, % (30 %)

$$\text{Ос. н.} = \frac{(ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}}) \cdot Н_{\text{о.с.н.}}}{100} = \frac{(4169.36 + 667.04) \cdot 30}{100} = 1450.92 \text{ сом.}$$

Общая заработная плата разработчика программы.

$$ЗП_{\text{общ}} = ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}} + \text{Ос. н.} = 4169.36 + 667.04 + 1450.92 = 6287.32 \text{ сом.}$$

Таблица 4.4 – Калькуляция сметной стоимости программного продукта

Статьи затрат	Индекс	Сумма, сом.	Удельный вес затрат, %
Заработная плата общая	$ЗП_{\text{общ.}}$	6287.32	91,4
Прочие затраты	$З_{\text{пр}}$	565.85	8,6
Итого:	3	6873.17	100

Расчёт прочих затрат при разработке программного продукта (5. . . 9) % от суммы основных затрат.

$$З_{\text{пр}} = З_{\text{осн.}} \cdot (0.05 \dots 0.09) = ЗП_{\text{общ}} \cdot (0.05 \dots 0.09) \quad (4.10)$$

$$З_{\text{пр}} = 0.09 \cdot 6287.32 = 565.85 \text{ сом.}$$

Общие затраты на разработку программного продукта.

$$З = ЗП_{\text{общ.}} + З_{\text{пр}} = 6287.32 + 565.85 = 6873.17 \text{ с}$$

Из таблицы 4.13 видно, что большая часть затрат при разработке программного продукта приходится на заработную плату.

4.5.2. Расчет годовой прибыли внедрения интеллектуальной системы управления

В работе [107] приведены годовая выработка электроэнергии и расчет тарифа на электроэнергию для солнечной электростанции 220 кВт Мургабского района.

Выработка электроэнергии

$$W_T = N_y \cdot h_y \cdot (1 - k_{сн}) \quad (4.11)$$

N_y -установленная мощность СЭС, 220 кВт

h_y -количество часов использования установки в год 2500 ч/год

$k_{сн}$ -коэффициент собственных требований подстанции, 0.05 [107]

Выработка электроэнергии без учета РНЛО

$$W_1 = 220 \cdot 2500 \cdot (1 - 0.05) = 522500 \text{ кВт/час}$$

Выработка электроэнергии с учетом РНЛО

$$W_2 = 223.3 \cdot 2500 \cdot (1 - 0.05) = 530337 \text{ кВт/час}$$

Таблица 4.5. Экономические показатели от внедрения РНЛО

	Экономические показатели	без РНЛ	с РНЛ
	Выработка электроэнергии, кВт/час	522500	530337
	Доход от электроэнергии, сом.	783750	795506
	Годовая прибыль, сом	11756	
	Затраты, сом.	6873.1	
	Срок окупаемости, год	0.6	

Доход получаемый от электроэнергии без учета РНЛО

$$D_1 = W_1 \cdot t = 522500 \cdot 1.5 = 783750 \text{ сом.}$$

Где $t = 1.5$ сом/кВт. час стоимость электроэнергии от СЭС [107]

$$T = \frac{3}{\Pi} = \frac{6873.17}{11576} = 0.6 \text{ год}$$

Доход, получаемый от электроэнергии, без учета РНЛО

$$D_2 = W_2 \cdot t = 530337 \cdot 1.5 = 795506 \text{ сом.}$$

Годовая экономическая прибыль от внедрения РНЛО

$$\Pi = D_2 - D_1 = 795506 - 783750 = 11756 \text{ сом}$$

Срок окупаемости затрат от внедрения УСФМ можно вычислить из формулы:

Выводы и результаты по четвертой главе

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований системы управления ФЭУ с использованием разработанных регуляторов на физической модели. Исследование и практическая реализация РНЛО, оптимизирующего коэффициенты фазификации и дефазификации с использованием генетического алгоритма, подтвердили актуальность применения данных алгоритмов. В результате эксперимента были получены данные, подтверждающие высокое качество системы слежения ТММ ФЭУ с использованием РНЛО и ГА. Использование нечеткой логики позволяет исключить автоколебания в системе слежения и значительно повысить точность, уменьшив ошибки следящей системы до требуемых значений. Полученные данные хорошо сходятся с результатами расчетов и имитационного моделирования.

В результате проведенных экспериментальных исследований была продемонстрирована значительная улучшенная эффективность слежения ТММ на уровне 1.5% в сравнении с применением классического алгоритма. Этот результат еще раз подтверждает достоверность предполагаемой теории, которая продвигает использование регуляторов, созданных на основе нечеткой логики. Такие расширенные исследования играют ключевую роль в дальнейшем совершенствовании и разработке ТММ, а также способствуют повышению их эффективности и функциональности в различных областях применения.

Оценка экономической эффективности внедрения РНЛО на солнечной электростанции Мургабского района показывает, что срок окупаемости составляет около 0.6 лет со среднегодовой прибылью 11756сом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации доказана целесообразность разработки и синтезирован регулятор слежения 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 слежения 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 нечетким регулятором, 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 исследование 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 11756сом.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИТОГАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

Необходимо отметить, что предложенные в данной работе математические модели ФЭУ и синтезированные РНЛ целесообразно применить для исследования и проектирования высокоэффективных ФЭУ, которые могут применяться в различных областях промышленности и науки.

Предложенные в данной работе математические модели ФЭМ являются целесообразным инструментом для исследования и проектирования высокоэффективных ФЭУ. Эти модели позволяют анализировать поведение ФЭУ в различных условиях эксплуатации и оптимизировать их производительность. Модели учитывают такие параметры, как уровень СИ, температура и другие факторы, которые могут влиять на работу фотоэлектрического модуля. Они также могут использоваться для прогнозирования поведения ФЭУ при изменении рабочих условий, что позволяет улучшить стабильность и надежность устройства.

Оптимизированные РНЛ позволяют учесть неопределенность и нечеткость входных данных, а также принять решение на основе лингвистических переменных. Такие модели могут быть особенно полезны при исследовании и проектировании ФЭУ, так как они позволяют учесть различные факторы, влияющие на их эффективность, и оптимизировать их работу.

Предложенная структура и программа оптимизации РНЛ целесообразно применять для синтеза и настройки регуляторов системы управления отслеживанием ТММ ФЭУ. Программа оптимизации помогает настроить параметры регулятора, чтобы достичь максимальной мощности при различных условиях освещения. Оптимизационные алгоритмы могут использоваться для настройки весов и функций принадлежности нечеткой логики, а также других параметров регулятора. Таким образом, предложенная структура и программа оптимизации РНЛ являются эффективным подходом для синтеза и настройки регуляторов системы управления ТММ ФЭУ. Кроме того, идея минимизации целевой функции с помощью генетического алгоритма является одним из

лучших методов оптимизации посредством искусственного интеллекта, что целесообразно применять и для других отраслей.

Таким образом, результаты диссертационной работы позволяют подробно исследовать и проектировать высокоэффективные ФЭУ с учетом множества влияющих факторов. Это позволит оптимизировать характеристики и параметры ФЭУ для достижения наилучших результатов.

Перспектива дальнейшей разработки темы. Дальнейшая разработка темы данной диссертационной работы имеет широкое практическое применение при проектировании и внедрении энергоэффективных ФЭУ в системах электроснабжения. При дальнейшем усовершенствовании системы управления можно создать адаптивную систему слежения за ТММ ФЭУ на основе нейронной сети и нечеткой логики (нейро-нечеткая система управления), которая улучшает качества процесса преобразования солнечной энергии в ФЭУ. Такая перспектива развития значительно увеличивает надёжность, точность и скорость отслеживания ТММ ФЭУ, что способствует увеличению эффективности ФЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К.Я. Изменение окружающей среды в Европе / К.Я. Кондратьев // Вестник РАН. – 2001. –Т.71. –№6. – С. 495-502.
2. 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.
3. Шарипов Б. А. Солнечная энергетика в Таджикистане / Б.А. Шарипов, Д. У. Холиков, А. Б. Алимардонов // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. – 2017. – №6 (19). – С. 174-179.
4. Ахмедов Х. М., Каримов Х. С., Кабутов К. Возобновляемые источники энергии в Таджикистане: состояние и перспективы развития / Физико-технический институт им. С. У. Умарова Академии наук Республики Таджикистан. Доклад. Душанбе. 2010. 30 с.
5. Кабутов К. Возобновляемые источники энергии: проблемы и перспективы использования в Таджикистане / К. Кабутов // Материалы международной конференции «Хартия Земли и устойчивое развитие Таджикистана» - Душанбе, 2011 – С 75-78.
6. Юлдашев З.Ш. Возобновляемые источники энергии как фактор устойчивого развития сельских территорий Республики Таджикистан / З.Ш. Юлдашев, Л.С. Касобов, Р.З. Юлдашев, А.К. Киргизов // Вестник Таджикского технического университета. – 2014 – №2(26). – С. 59-61.
7. Ахмедов Х.М., Каримов Х.С. Возобновляемые источники энергии в Таджикистане и возможности их использования. - Душанбе, 2005, 35 с
8. Solar Market Research and Analysis. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.solarbuzz.com/facts-andfigures/retail-price-environment/module-prices> (дата обращения 05.01.2022).
9. Лукутин, Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.

10. Виссарионов, В.И. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов /Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 317 с.
11. Алфёров, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – том 38, Вып. 8. – С. 937 – 948.
12. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
13. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, – 1971 – 148 с.
14. Solar Energy Technologies Office [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics> (дата обращения 05.06.2023).
15. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy // International Energy Agency– 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iea.org> (дата обращения 05.06.2023).
16. National Renewable Energy Laboratory (NREL) [Электронный ресурс]. – 2022. –Режим доступа: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата обращения 05.06.2023)
17. Press Releases (2011). Enerdata Global Energy Intelligence, World Energy Use in 2010: Over 5% Growth [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore> (дата обращения 05.06.2023)
18. Eden Full. SunSaluter // SunSaluter [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sunsaluter.com> (дата обращения 05.01.2020).
19. Ахмед Т.А., Сокольский А.К. Система электроснабжения автономных потребителей малой мощности на базе дизель-фотоэлектрической установки / Т.А. Ахмед, А.К. Сокольский // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2009. – №4. – С. 43-45.
20. Донцов О. А., Краснобаев Ю. В. Использование экстремального регулятора в автономных системах электропитания / О. А. Донцов, Ю. В.

Краснобаев // Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского– Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012.

21. ФЭУ // G2group [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://g2group.ru> (дата обращения 05.04.2015)

22. Лукутин Б.В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников // Издательство Томского политехнического университета, Томск: 2015. – 128 с.

23. Valenciaga F., Puleston P. Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy / F. Valenciaga, P. Puleston // IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 398–405, 2005.

24. Chedid R. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems / R. Chedid, S. Rahman // IEEE Trans. Energy Convers., vol. 12, no. 1, pp. 79–85, 1997.

25. Li W., He X. Review of nonisolated high-step-up DC/DC converters in photovoltaic grid-connected applications / W. Li, X. He // IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 4, pp. 1239–1250, 2011.

26. Rosas-Caro J. C., Ramirez J. M., Peng F. Z. A DC-DC multilevel boost converter / J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, F. Z. Peng // IET Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 129–137, 2010.

27. Amir A., Che H. S., Elkhateb A. Comparative analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems / A. Amir, H. S. Che, A. Elkhateb // Renew. Energy, vol. 136, pp. 1147–1163, Jun. 2019.

28. Колтун М. М., Солнечные элементы / М. М. Колтун // - Москва: Наука, 1987. - 191 с.

29. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения, – Л: Наука ,1989. – 110 с.

30. Gow J. A., Manning C. D. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies / J. A. Gow., C. D. Manning // IEE Proc. - Electr. Power Appl., vol. 146, no. 2, pp. 193–200, Mar. 1999.
31. Lu L., Yang H. X. A Study on Simulations of the Power Output and Practical Models for Building Integrated Photovoltaic Systems / L. Lu, H. X. Yang // J. Sol. Energy Eng., vol. 126, no. 3, pp. 929–935, Jul. 2004.
32. Blas M. A., Torres J. L., Prieto E. Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices / M. A. Blas., J. L. Torres, E. Prieto // Renew. Energy, vol. 25, no. 3, pp. 371–380, Mar. 2002.
33. Шарифов. Б.Н., Терегулов Т.Р., Моделирование солнечной панели в программе Matlab/Simulink / Б.Н. Шарифов, Т.Р. Терегулов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2015 №4. – С 77-83.
34. Teregelov.T.R., Sharifov B., Valeev A.R., Simplified solar panel modeling in MATLAB/Simulink considering Bashkortostan Republic (Russia) environment characteristics / T.R. Teregelov, B. Sharifov, A.R. Valeev // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2016, pp. 17-21 (IEEE Conference Publications).
35. Stephen P. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, 4th ed. Oxford, UK: – Oxford University Press. – 2018.
36. Шиняков Ю. А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов / Ю. А. Шиняков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2007. - №. 1.
37. Шиняков Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Аркатова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники – 2010. – № 2 (22), ч. 2. – С. 102–107.
38. Шиняков Ю.А. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей / Ю.А.

Шиняков, А.И. Отто, А.В. Осипов, М.М. Черная // Альтернативная энергетика и экология – 2015. – № (8-9) – С. 12-18.

39. Шарифов Б.Н. Исследование энергетических характеристик ФЭУ / 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. – С 211 – 217. ISBN 978-99985-852-1-8.

40. Китаева В.М. Автономная система слежения за солнцем для солнечной энергосистемы / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3/1. – С. 196-199.

41. Овсянников Е.М. Электроприводы гелиоустановок наземного и космического базирования. Теория и практика: автореф. дис. д.т.н.: 05.09.03 / Овсянников Евгений Михайлович. – М., 2003. – 40 с.

42. Аржанов К.В. Двухкоординатный следящий шаговый электропривод солнечных установок / К.В. Аржанов // Сб. трудов 2 Всероссийской научной конференции «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики 3-его поколения». – Чебоксары, 22-24 мая, 2014. – С. 117-120.

43. Аржанов К.В. Автоматическое управление солнечной энергетической установкой / К.В. Аржанов // Тезисы докладов XIX научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства» / АО НПЦ «Полюс». Томск, 2015. – С. 23-25.

44. Аржанов В.В. Микропроцессорное управление электроприводами с вентильными двигателями для движителей необитаемых подводных аппаратов / В.В. Аржанов, Ю.А. Шурыгин, В.А. Бейнарович, Ю.А. Шиняков, А.Е. Лапа, К.В. Аржанов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26). – Ч. 1. – С. 199-204.

45. Белова И.А. Фотоэлектрическая система генерирования на базе полупроводникового преобразователя с нейросетевой системой управления:

диссертация к.т.н.: 05.09.03 / Белова Ирина Анатольевна – Новосибирск 2022. – 164 с.

46. Гимазов Р.А. Алгоритмы адаптивного управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе: диссертация к.т.н.: 05.13.06 / Гимазов Руслан Уралович – Томск 2019. – 133 с.

47. Belova I. A., Martinovich M. V., Skolota V. A. Application of photovoltaic cells with an intelligent control system for railway transport / I. A. Belova, M. V. Martinovich, V. A. Skolota // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Oct. 2016, vol. 03 pp. 64–68.

48. Ahmed J., Salam Z. A. Modified P and O Maximum Power Point Tracking Method with Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency / J. Ahmed, Z. A. Salam // IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 7, no. 4, pp. 1506–1515, 2016.

49. Шарифов Б.Н. Анализ современных систем управления отслеживанием максимальной мощности ФЭУ / 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. – С 543 – 547

50. Jamri M. S., Kassim A. M., Hashim M. R. A. Voltage mode control maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system / M. S. Jamri, A. M. Kassim, M. R. Hashim // Appl. Mech. Mater., vol. 313–314, pp. 503–507, 2013.

51. Белавев П.А., Сивеев Т.М., Методы определения точки максимальной мощности фотоэлектрических батарей / П.А. Беляев , Т.М., Сивеев // Столыпинский вестник – 2022 – №9. – С. 4983 – 4990.

52. Обухов С.Г., Ибрагим А. Анализ режимов и выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции / С.Г. Обухов., А.Ибрагим // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2020 Т – 24. №1. – С. – 164 – 182.

53. Mohamed A, Steven L. Evaluation of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Electricity Generation in Kuwait / A. Mohamed, L. Steven // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. – 2014. – Vol. 1. – No 12. – P. 44–49.

54. Пост С.С. Имитационная модель контроллера солнечной батареи / С.С. Пост, О.А. Донцов, В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев // *Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике*. – 2014. – № 4. – С. 111-120.

55. Sharma A.K. Role of Metaheuristic Approaches for Implementation of Integrated MPPT-PV Systems / A.K. Sharma, R.K. Pachauri, S.Choudhury, A.F. Minai, M.A. Alotaibi, H. Malik, F.P.G. Márquez // *A Comprehensive Study. Mathematics* 2023, 11, 269 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/math11020269> (дата обращения 23.12.2023).

56. Femia N. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method / N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005.

57. Донцов О.А., Иванчура В.И., Краснобаев Ю.В. Регулятор солнечной батареи с экстремальным регулированием на основе нечеткой логики / О.А. Донцов, В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2015. – № 8. – С. 786-794.

58. Ahmed J., Salam Z. A. Modified P&O Maximum Power Point Tracking Method with Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency / J. Ahmed, Z. A. Salam // *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2016, 7, 1506–1515.

59. Abdelsalam A. K. High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids / A. K. Abdelsalam, A. M. Massoud, S. Ahmed, and P. N. Enjeti // *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 26, no. 4, pp. 1010–1021.

60. Pulkit S. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques / S. Pulkit, D.K. Palwalia, G. Amit, K. Prakash // *International*

Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. – 2015. – Vol.2.
– P. 401-404.

61. Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В. Применение нейронных сетей в петле ФАПЧ / В.А. Сколота, И.А. Белова, М.В. Мартинович // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 2 (84). – С. 77-87;

62. Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В. Аналоговая аппаратная реализация искусственного нейрона / В.А. Сколота, И.А. Белова, М.В. Мартинович // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2018. № 1. С. 54-59;

63. Белова И.А., Мартинович М.В. Обучение искусственной нейронной сети для отслеживания точки максимальной мощности после деградации солнечной батареи / И.А. Белова, М.В. Мартинович // В сборнике: НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ Сборник научных трудов: в 9 частях. 2018. – С. 11-15;

64. Мартинович М.В. Нейросетевой наблюдатель тока нагрузки для dc преобразователя / М.В. Мартинович, И.А. Белова, В.А. Сколота, И.В. Заев // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2018. Труды XIV международной научно-технической конференции. 2018. – С. 55-61;

65. Компьютерное моделирование вольтамперных характеристик солнечных батарей / Н.О. Фролкова, И.В. Абраменкова // Тезисы докладов XIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов 2008. – С. 381-383.

66. Фролкова Н.О., Абраменкова И.В., Фролкова О.А. Моделирование последовательного сопротивления в структуре реального ФЭ / Н.О. Фролкова, И.В. Абраменкова, О.А. Фролкова // Материалы X международной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения» СКПМ 2009. – С. 3-5.

67. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов / Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 317 с.

68. POWER | Data Access Viewer [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer> (дата обращения 05.06.2023).

69. Solargis Analyst [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/tajikistan> (дата обращения 05.06.2023).

70. 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.

71. 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.

72. 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.

73. Buresch M. Photovoltaic Energy Systems: Design and Installation. New York: McGrawHill, 1983. 336 с.

74. Altas I. H., Sharaf A. M. A solar powered permanent magnet DC motor drive scheme / I. H. Altas, A. M. Sharaf // Proc. 17th Annu. Conf. Solar Energy Soc. Canada, Toronto, Ont., Canada, 1991, pp. 65 -71

75. Altas I. H., Sharaf A. M: A photovoltaic powered efficient DC motor drive for pump irrigation // Proc. Canad. Solar Energy Conf., Halifax, N.S., Canada, 1990.

76. . Operating temperature of photovoltaic modules: a survey of pertinent correlations / E. Skoplaki, J. Palyvos // Renew Energy. 2009. № 34. pp. 23-29.

77. Skoplaki E., Palyvos J. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance. A review of efficiency/power correlations / E. Skoplaki, J. Palyvos // Solar Energy. 2009. № 83. pp. 614-624.

78. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем: учебное пособие: СПб КОРОНА-принт ,2001 320с.
79. Matlab/Simulink The MathWorks Inc [Электронный ресурс] - Режим доступа: URL. <http://www.mathworks.com> (дата обращения 05.06.2023).
80. Стребков Д.С. Влияние температур в широком интервале значений на параметры солнечных элементов / Д.С. Стребков, Б.А. Никитин, В.В. Харченко, В.А. Гусаров, П.В. Тихонов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. №4. – С. 46-48.
81. Kharchenko V.V. Investigation of experimental and equipment for studying solar cells and modules / V.V. Kharchenko., В.А. Nikitin., P.V. Tikhonov, Gusarov V.A. // Moldavian Journal of the Physical Sciences. 2013. № 12. pp. 72-77.
82. Батищев Д.И. Поисковые методы оптимального проектирования — М.: Сов. Радио, 1975. - 216 с
83. Букатова И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения — М.: Наука, 1979.
84. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы Под редакцией В.М. Курейчика. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Физматлит, 2006. — 320 с.
84. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 260 с.
86. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Учебное пособие / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев // М.- ОСНОВА. - 1997.
87. 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. Sa-faraliev , 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, P. 356–358.

88. 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).

89. 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.

90. 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. Sa-faraliev, R M Yunusov // 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy , IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020 pp. 1-6.

91. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.

92. Фролов В.Я. Устройство силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде Matlab – Simulink: учебное пособие / В.Я. Фролов, В.В. Смородинов. – СПб. – Лань, 2018. – 322 с

93. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 782 с.

94. Демидова Г.Л. Разработка и исследование регуляторов с нечеткой логикой для следящих электроприводов оптико-механических комплексов: диссертация к.т.н.: 05.13.01 / Демидова Галина Львовна – Санкт-Петербург – 2016. – 211 с.

95. 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.

96. 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. 25-31. ISSN: 2520-2227.

97. Venugopal P. Design of tuning methods of pid controller using fuzzy logic / P. Venugopal, G. Ajanta, S. Priyanka // International Journal of Emerging trends in Engineering and Development. - 2013, Issue 3, Vol.5, pp.239-248

98. Вейнмейстер А.В. Адаптивно-нечеткие регуляторы систем управления техническими объектами / А.В Вейнмейстер, Н.Д. Поляхов И.А Приходько, Д.М. Филатов, О.Э. Якупов // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2012. № 4. С. 59-66.

99. Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Карачев А.А. Разработка и исследование бесщеточных систем возбуждения на базе нечеткой логики / Н.Д Поляхов, И.А. Приходько, А.А. Карачев // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2006. № 6. – С. 9-13.

100. Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Нгуен В.Ч. Исследование нечеткого управления движением надводного водоизмещающего корабля / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, В.Ч. Нгуен // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2004. № 6. – С. 24-28.

101. Игнатъев К.В. Нечеткая система автономного управления движением робота с компьютерным зрением и всенаправленными колесами / К.В. Игнатъев, А.В. Путов, М.М. Копычев, В.В. Путов, Н.А. Русяев // Известия

Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2016. Т. 1. – С. 38-41.

102. Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Швыров И.В. Решение задач оптимизации режимов электроэнергосистемы с помощью эволюционных алгоритмов / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, И.В. Швыров // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2013. Т. 1. – С. 126-129.

103. Поляхов Н.Д. Оптимизация перетоков активной мощности энергосистемы на основе генетических алгоритмов / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, Е.А. Алексеева, А.А. Краснов, Г.В. Завальнев // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2007. № 10. – С. 7-12.

103. Huai-xiang Z., Bo Z., Feng W. Automatic fuzzy Rules Generation Using fuzzy Genetic Algorithm / Z. Huai-xiang, Z. Bo, W. Feng // 2009 Sixth International Conference on fuzzy Systems and Knowledge Discovery. - 2009, pp.107-112.

104. Jongsuebsuk P., Wattanapongsakorn N. Real-Time Intrusion Detection with fuzzy Genetic Algorithm // Electrical Engineering / P. Jongsuebsuk, N. Wattanapongsakorn // Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2013 10th International Conference on. - 2013, DOI: 10.1109/ECTIcon.2013.6559603.

105. 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.

106. Берзинь И.С. Экономика предприятия: учебник / И. Э. Берзинь, С. А. Пиунова, Н.Н. Савченко, С. Г. Фалько; под. ред. С. Г. Фалько. – М.: Дрофа, 2003. – 368 с.

107. Сафаров М.И. Оптимизация распределенной генерации в локальной электроэнергетической системе с возобновляемыми источниками энергии: а.

диссертация к.т.н.: 05.14.01 / Сафаров Манучехр Исуфович – Душанбе 2023. – 156 с.

Основное содержание диссертации изложено в следующих изданиях:

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-А]. **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 Manufacturing and Metallurgy , IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020 pp 1-6.

[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-А]. **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-А]. **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-А]. **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 ФАРҲАНГИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН



ШАҲОДАТНОМА

MINISTRY OF CULTURE OF THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN



CERTIFICATION



ШАҲОДАТНОМА

дар бораи ба қайд гирифтани асарҳои илм,
адабиёт ва санъат

30 12 2023

№ 181

Дода шуд ба: Шарифов Бохирҷон Насруллоевӣ, Донаев
Фирӯз Камолович, Сайфуллоева Олуфтамо Мирӯллоевна, Маҳмадов
Шариф Сафаралиевич, Шарипов Фаридун Қуваталиевич,
Султонзода Шерхон Муртазо ва Диёрзода Рустам Ҳакимали дар он
хусус, ки онҳо муаллифони барномаи компютерӣ: “Программный
компонент для оптимизации регулятора нечёткой логики
фотоэлектрической установки” мебошанд.

Жанри асар: илмӣ

Забони асар: русӣ

Асар иборат аст аз: 3 КБ

Маълумоти иловагӣ: Тибқи моддаи 6-и Қонуни Ҷумҳурии
Тоҷикистон “Дар бораи ҳуқуқи муаллифони ҳуқуқҳои воҳаста
ба он” асари мазкур объектҳои ҳуқуқи муаллифӣ мебошад.

Сардори иҷро ба ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқ
муаллиф ва ҳуқуқҳои воҳастаи
Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон А. Олимшоев



CERTIFICATION

About registration of science
Literature and art works

30 12 2023

№ 181

Issued to: Sharifov Bohirjon Nasrulloevich, Donaev Firuz
Kamolovich, Saifulloeva Oluftamo Mirulloevna, Mahmudov Sharif
Safaraliyevich, Sharipov Faridun Quvataliyevich, Sultonzoda Sherkhon
Murtazo and Diyorzoda Rustam Hakimali in particular, that they is the
authors of computer program for “Software component for optimizing
the fuzzy logic controller of a photovoltaic equipment”.

Genre of the work: scientific

Language of the work: Russian

It consists of: 3 KB

Additional information: According to Article 6 of the Law on Copyright
and related rights of the Republic of Tajikistan this work is protected by
copyright.

Head of Department of law, preservation
of copyright and related rights of the
Ministry of culture of the Republic of Tajikistan A. Olimshoev



«УТВЕРЖДАЮ»
 Ректор Таджикского технического
 университета имени академика М. С. Осими
 д.э.н. Давлатзода К. К.
 «» _____ 2023г.



АКТ

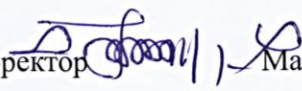
**о внедрении результатов диссертационной работы Шарифова Б.Н.
 в учебный процесс Таджикского технического университета
 имени академика М.С. Осими.**

Комиссия в составе: председателя комиссии к.т.н. доцента Маджидзода Т.С., членов комиссии к.т.н. Бозорова Ш.А. и заведующего кафедрой «Автоматизированный электропривод и электрические машины» к.т.н. доцента Диёрзода Р.Х. настоящим актом подтверждаем, что результаты научного исследования Шарифова Б.Н. на тему **«Разработка интеллектуальной системы управления фотоэлектрической установкой»**, используются в учебном процессе на энергетическом факультете Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Основные положения и результаты диссертации используются для подготовки специалистов и магистров по специальности «Автоматизированные электроприводы» в курсах «Моделирование электромеханических систем», «Теория автоматического управления» и «Силовая преобразовательная техника» Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими.

Полученные результаты позволяют повысить качество изучения вышеуказанных дисциплин с учетом современных научных и практических требований.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ:

Проректор по учебной работе, первый проректор  Маджидзода Т.С.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник управления науки и инновации

 Бозоров Ш.А.

Заведующий кафедрой «АЭП и ЭМ»

 Диёрзода Р.Х.

Ҷумҳурии Тоҷикистон
 ҶДММ «Соҳтмони барки
 Душанбе»



Республика Таджикистан
 ООО «Соҳтмони барки
 Душанбе»

Суроға: 734010 Ҷумҳурии Тоҷикистон, шаҳри Душанбе, кӯчаи Қаҳоров 520 Тел:(992) 919-44-84-34
 Address: 734010 Republic of Tajikistan, Dushanbe city, Kahorov str 520 Tel:(992) 200-00-00-31
bark.dushanbe@tdmail.tj

№ 3 аз «24» «10» 2023с

Акт

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Настоящим актом подтверждается заинтересованность в использовании результатов и выводов диссертационной работы Шарифов Б.Н. на тему «Разработка интеллектуальной системы управления фотоэлектрической установкой», по специальности 05.14.01- Энергетические системы и комплексы.

Энергетическая компания ООО «Соҳтмони барки Душанбе» рассматривает возможность использования возобновляемых источников энергии в качестве распределенной генерации с целью повышения качества электроснабжения удаленных потребителей.

Реализация интеллектуальной системы управления в предложенной диссертационной работе представляет практический интерес, поскольку способствует повышению энергетической эффективности фотоэлектрической установки.

Директор



Шералиев Ё.У.

**Программа оптимизации математической модели ФЭМ методом
генетического алгоритма**

```
function cost=vv1(k)
assignin('base','k',k);
sim('SOLAR155.slx');
cost=ITAE(length(ITAE));
end
function [x, fval, exitflag, output, population, score] = GA(nvars,lb,ub);
options = gaoptimset;
options = gaoptimset(options,'Display', 'iter');
options = gaoptimset(options,'PlotFcns', { @gaplotbestf });
[x,fval,exitflag,output,population,score] = ga(@vv1,nvars,[],[],lb,ub,[],[],options);
end
```

Программа оптимизации РНЛ методом генетического алгоритма

```

function fitness=func1(x);
assignin('base', 'Ta', [x(1) x(2) x(3) x(4) x(5)]);
sim('FUZZYMPPT5.slx');
cost=RMSE(length(RMSE));
function out=TFC_T(input)
Ta=evalin('base','Ta');
warning off;
error=input(1);
error_dot=input(2);
tfc=newfis('tfc','mamdani');
Sa1=[0.5,0.5];
Sb1=[0.5,0.5];
Sc1=[0.5];
tfc = addvar(tfc,'input','error1',Ta(1)*[-20 20]);
tfc = addvar(tfc,'input','error_dot1',Ta(2)*[-20 20]);
tfc = addvar(tfc,'output','u1',[-1 1]);
tfc = addmf(tfc,'input',1,'NB','trimf',Ta(1)*[-20 -20 -Sa1(2)]);
tfc = addmf(tfc,'input',1,'NS','trimf',Ta(1)*[-20 -Sa1(1) 0 ]);
tfc = addmf(tfc,'input',1,'ZE','trimf',Ta(1)*[-Sa1(1) 0 Sa1(1)]);
tfc = addmf(tfc,'input',1,'PS','trimf',Ta(1)*[0 Sa1(1) 20]);
tfc = addmf(tfc,'input',1,'PB','trimf',Ta(1)*[Sa1(2) 20 20 ]);

tfc = addmf(tfc,'input',2,'NB','trimf',Ta(2)*[-20 -20 -Sb1(2)

tfc = addmf(tfc,'input',2,'NS','trimf',Ta(2)*[-20 -Sb1(1) 0 ]);
tfc = addmf(tfc,'input',2,'ZE','trimf',Ta(2)*[-Sb1(1) 0 Sb1(1)]);
tfc = addmf(tfc,'input',2,'PS','trimf',Ta(2)*[0 Sb1(1) 20]);
tfc = addmf(tfc,'input',2,'PB','trimf',Ta(2)*[Sb1(2) 20 20 ]);

tfc = addmf(tfc,'output',1,'NB','constant',[-1]);
tfc = addmf(tfc,'output',1,'NS','constant',[-Sc1(1)]);
tfc = addmf(tfc,'output',1,'ZE','constant',[0]);
tfc = addmf(tfc,'output',1,'PS','constant',[Sc1(1)]);
tfc = addmf(tfc,'output',1,'PB','constant',[1]);
rule_matrix =[ 1 1 1 1 1;
               1 2 1 1 1;
               1 3 1 1 1;
               1 4 2 1 1;
               1 5 3 1 1;
               2 1 1 1 1;
               2 2 1 1 1;

```

```

2 3 2 1 1;
2 4 3 1 1;
2 5 4 1 1;
3 1 1 1 1;
3 2 2 1 1;
3 3 3 1 1;
3 4 4 1 1;
3 5 5 1 1;
4 1 2 1 1;
4 2 3 1 1;
4 3 4 1 1;
4 4 5 1 1;
4 5 5 1 1;
5 1 3 1 1;
5 2 4 1 1;
5 3 5 1 1;
5 4 5 1 1;
5 4 5 1 1;];

```

```

tfc=addrule(tfc,rule_matrix);
out= evalfis([error error_dot],tfc);
function [x,fval,exitflag,output,population,score] = GA(nvars,lb,ub)
options = gaoptimset;
options = gaoptimset(options,'Display', 'iter');
options = gaoptimset(options,'PlotFcns', { @gaplotbestf });
[x,fval,exitflag,output,population,score] = ...
ga(@TFC_T,nvars,[],[],[],[],[],lb,ub,[],[],options);

```