Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Гимазов Руслан Уралович

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель доктор технических наук, Шидловский Станислав Викторович

оглавление

ВВЕДЕНИЕ4	
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И	
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ10	
1.1 Вводные понятия10	
1.2 Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических систем 14	
1.3 Адаптивное управление в фотоэлектрических системах	
1.3.1 Задача управления в фотоэлектрической системе	
1.3.2 Управление по методу возмущение и наблюдение. Преимущества26	
и недостатки	
1.3.3 Адаптивные алгоритмы управления	
1.3.4 Подходы к реализации метода «возмущение и наблюдение» на основе	
адаптивных алгоритмов31	
1.4 Выводы	
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКО УСТАНОВКИ С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТБОРА ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМО	Й)В
2.1 Моделирование элементов фотоэлектрической установки	
2.1.1 Концепция построения модели фотоэлектрической системы	
2.1.2 Моделирование фотоэлектрического модуля	
2.1.3 Моделирование управляющего устройства	
2.2 Разработка адаптивных алгоритмов управления процессом заряда в фотоэлектрической системе46	
2.2.1 Алгоритм с перенастройкой поискового шага	
2.2.2 Алгоритм с предсказывающей адаптацией49	
2.2.3 Алгоритм с настройкой нечетким регулятором	
2.2.4 Алгоритм настройки нечеткого регулятора	
2.3 Выводы	
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТБО ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ61	PA
3.1 Моделирование фотоэлектрической системы	

3.1.1 Модель фотоэлектрического модуля61
3.1.2 Моделирование МРРТ-контроллера67
3.1.3 Моделирование дополнительных элементов фотоэлектрической системы
3.1.4 Модель фотоэлектрической установки75
3.2 Моделирование фотоэлектрической системы с различными
адаптивными алгоритмами экстремального регулирования
3.2.1 Модель системы с алгоритмом с перенастройкой поискового шага78
3.2.2 Модель системы с алгоритмом с предсказывающей адаптацией80
3.2.3 Модель системы с алгоритмом с настройкой нечетким регулятором82
3.3 Сравнительный анализ разработанных адаптивных алгоритмов91
3.4 Выводы102
ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ104
4.1 Постановка задачи104
4.2 Элементная база прототипа фотоэлектрической системы107
4.2.1 Солнечная панель107
4.2.2 Аккумулятор108
4.2.3 Контроллер108
4.2.4 Импульсный преобразователь109
4.2.5 Сборка прототипа фотоэлектрической системы110
4.3. Программное обеспечение прототипа фотоэлектрической системы111
4.4 Оценка работы прототипа фотоэлектрической системы 113
4.5 Выводы116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ117
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ120
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ131

введение

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

В условиях уменьшения запасов природного топлива всё больше внимания уделяется использованию солнечной энергии в качестве основного энергоресурса [67]. В настоящее время солнечные электростанции строятся не только в странах с высокой солнечной активностью, но практически во всех регионах мира с различными климатическими условиями. В связи с тем, что стоимость традиционных источников энергии сохраняет тенденцию роста, в настоящее время в регионах без стационарных сетей электропитания увеличивается уровень внедрения фотоэлектрических установок (ФЭУ). Это не только позволяет снизить экологическую нагрузку, но и экономически выгодно [1].

Современные ФЭУ обладают небольшим коэффициентом преобразования падающей солнечной энергии. В ясный солнечный день на каждый квадратный метр площади фотоэлектрический модулей (ФМ), перпендикулярной вектору солнечных лучей, поступает примерно 1 кВт энергии, но к потребителю поступает только часть этой энергии. Невысокие показатели реального КПД кремниевых фотоэлементов массового производства (в среднем 20 %), а также недоиспользование возможностей фотоэлектрического модуля являются факторами, негативно отражающимися на количестве генерируемой энергии. Как следствие – суммарный КПД обычной ФЭУ равен примерно 10 %. В связи с невысокими показателями КПД ФЭУ, возникает вопрос о повышении их эффективности [13, 14].

Большой вклад в развитие и применение ФЭУ внесли следующие российские и зарубежные ученые: А.П. Ландсман, Н.С. Лидоренко, А.Ф. Иоффе, В.С. Вавилов, В.К. Субашиев, Ж.И. Алферов, В.С. Стребков, Ю.А. Шиняков, О.С. Попель, А.В. Юрченко, Б.В. Лукутин, М. Вольф, Дж. Лоференский, М. Принс, Г. Раушенбах, М. Махмуд, Л. Браун, Р. Лопес, М. Грин, М. Гретцель и др. Существуют различные подходы и методы повышения энергетической эффективности ФЭУ. К наиболее эффективным методам повышения энергетической эффективности ФЭУ относятся:

- метод усовершенствования конструкции элементов ФЭУ, этому посвящены работы таких ученых, как: В.М. Андреев, Н.Ю. Давидюк, Е.А. Ионова, П.В. Покровский, В.Д. Румянцев, Н.А. Садчиков, Martin F. Schumann, Carsten Rockstuhl, Martin Wegener;

- метод применения технологии наведения солнечных панелей на солнце (солнечный трекер), описанный в работах: Ю.А. Шиняков, А.В. Осипов, О.А. Теущаков, К.В. Аржанов, А.В. Юрченко, А.В. Скороходов.

- метод использования режима экстремального регулирования мощности (ЭРМ), также известный как технология МРРТ (Maximum Power Point Tracking – отслеживание точки максимальной мощности) и представленного в работах: О. А. Донцов, Ю. В. Краснобаев, Mohamed A. El-Sayed, Steven Leeb, Roberto Faranda, Sonia Leva.

Наиболее распространённым алгоритмом, поддерживающим поиск точки максимальной мощности (ТММ), является алгоритм «возмущение и наблюдение». В этом методе управляющее устройство пошагово изменяет напряжение и измеряет мощность, если мощность увеличивается — контроллер продолжает изменять напряжение в этом же направлении, пока мощность не перестанет увеличиваться, т.е. не будет достигнут экстремум вольт-ваттной характеристики (BBX) [8].

Недостатками алгоритма «возмущение и наблюдение» являются колебания мощности и фиксированное время «восхождения» (время поиска точки максимальной мощности). Уменьшение времени «восхождения» приводит к увеличению амплитуды колебаний, что ведёт к недовыработке мощности. Уменьшение амплитуды колебаний мощности приводит к увеличению времени поиска TMM [12]. Также ввиду того, что фотоэлектрическое преобразование сильно зависит от внешних условий (уровня освещенности, температуры, угла падения солнечных лучей, затенения) и внутренних характеристик системы

(тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, деградации фотоэлементов), реализация экстремального регулирования мощности будет наиболее эффективна только в случае применения адаптивных алгоритмов.

Указанные проблемы стимулируют исследования, целью которых является разработка наиболее эффективных алгоритмов поиска ТММ, обеспечивающих требуемое качество отбора энергии в фотоэлектрических системах [35, 36]. Среди перспективных путей реализации адаптивных алгоритмов поиска ТММ можно выделить такие, как: применение нечёткой логики [34, 44]; использование систем с моделью-эталоном [27, 28, 29]; реализация подбора ТММ на базе нейронечеткой сети [8, 12, 20].

Проанализировав степень изученности проблемы алгоритмов поиска ТММ, можно прийти к выводу, что вопрос реализации эффективных решений остаётся открыт ввиду как отсутствия сравнительной базы методов адаптивного поиска ТММ, так и появления новых решений. В связи с вышеизложенным возникает противоречие между необходимостью выбора и реализации адаптивного алгоритма с требуемыми характеристиками и недостаточной оценочной базой тех или иных адаптивных алгоритмов поиска ТММ.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является улучшение качества процесса преобразования энергии в фотоэлектрической системе, путем разработки и исследования алгоритмов экстремального регулирования мощности, способных функционировать при недостатке априорной информации об объекте управления.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи исследования:

1. Разработка моделей элементов фотоэлектрической системы.

2. Разработка адаптивных алгоритмов экстремального регулирования мощности для управления процессом энергопреобразования в фотоэлектрической системе.

3. Создание программного обеспечения для компьютерного моделирования исследуемых процессов в фотоэлектрической системе, учитывающего физику

требуемых процессов, содержащего разрабатываемые адаптивные алгоритмы и позволяющего провести вычислительные эксперименты и обеспечить адекватные оценки эффективности.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан алгоритм экстремального регулирования мощности с предсказывающей адаптацией для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе, отличающийся от существующих улучшенной прогностической моделью, обеспечивающей улучшение качества управления.

2. Разработаны алгоритмы экстремального регулирования мощности для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе, такие как алгоритм с перенастройкой поискового шага и алгоритм на базе математического аппарата теории нечетких множеств, отличающиеся от существующих способностью учитывать фактор частичного затенения и улучшенными показателями качества управления.

3. Предложен алгоритм настройки базы нечетких правил для фотоэлектрической системы с нечетким управлением, отличающийся от существующих тем, что оперирует такими экспертными оценками как: диапазон регулирования и дрейф экстремума BBX ФЭУ, что улучшает работу системы с нечетким управлением.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные адаптивные алгоритмы экстремального регулирования мощности для управления процессом энергопреобразования в фотоэлектрических системах имеют значение для решения технических проблем ФЭУ, связанных с их низким КПД. Кроме повышения энергетической эффективности, адаптивные алгоритмы позволяют максимизировать время работы автономных систем. Созданные в результате выполнения научной работы модели элементов фотоэлектрической системы могут применяться для различных исследований по связанным отраслям, таким, энергетика, робототехника, как солнечная космонавтика. Результаты диссертационного исследования также могут использоваться В задачах

автономного энергоснабжения, проектирования фотоэлектрических систем, в системах с экстремальным управлением.

Диссертационные исследования выполнены в рамках проекта RFMEFI57817X0241, грантов РФФИ № 16-07-01138, № 19-29-06078.

Методология исследования. В И методы рамках выполнения диссертационного исследования, для решения поставленных задач использовались методы математического и компьютерного моделирования, теория нечетких множеств, теория адаптивного управления, данные из теории и практики применения фотоэлектрических систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм экстремального регулирования мощности с предсказывающей адаптацией для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе, отличающийся от существующих улучшенной прогностической моделью, обеспечивающей улучшение качества управления.

2. Алгоритмы экстремального регулирования мощности для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе, такие как алгоритм с перенастройкой поискового шага и алгоритм на базе математического теории множеств, аппарата нечетких отличающиеся ОТ существующих способностью учитывать фактор частичного затенения и улучшенными показателями качества управления.

3. Алгоритм настройки базы нечетких правил для фотоэлектрической системы с нечетким управлением, отличающийся от существующих тем, что оперирует такими экспертными оценками как: диапазон регулирования и дрейф экстремума BBX ФЭУ, что улучшает работу системы с нечетким управлением.

Личный вклад. Результаты научной работы, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Часть результатов, касающихся исследования адаптивных алгоритмов и математических моделей, получены в соавторстве в ходе работы над статьями.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается строгими математическими выводами,

проведенными вычислительными экспериментами, согласованностью полученных результатов с имеющимися данными в отечественной и зарубежной литературе, результатами моделирования и экспериментальными исследованиями.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях различного уровня, в их числе: международные конференции «Инноватика – 2017, 2018, 2019», «Информационно-измерительная техника и технологии – 2017, 2018», «Когнитивная робототехника – 2016, 2017, 2018», «Интеллектуальные энергосистемы – 2015, 2017».

Публикации. По теме диссертации опубликовано <u>15</u> работ, среди которых <u>2</u> – в журналах из перечня ВАК; <u>2</u> – в изданиях, индексируемых Scopus; <u>2</u> – свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из <u>86</u> наименований и <u>1</u> приложения. Диссертация изложена на <u>133</u> страницах машинописного текста, содержит <u>84</u> рисунка, <u>7</u> таблиц. В приложении приведены акты внедрения результатов работы, подтверждающие ее практическую значимость.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1.1 Вводные понятия

Солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ) или упрощенно – фотоэлектрические установки (ФЭУ), а также фотоэлектрические системы (ФЭС) – это технологические системы для получения электрической энергии, путём преобразования солнечной энергии, улавливаемой светочувствительными элементами таких систем, а также для накопления и передачи полученной энергии потребителям [40].

Известно, что влияние ФЭУ в отрасли энергоснабжения сохраняет тенденцию роста [21-23, 69]. Фотоэлектрические установки находят свое применение в различных областях науки и техники: космической отрасли, робототехнике, городском и сельском электроснабжении, автономных системах, бытовой электронике и других [21].

В настоящее время солнечные электростанции строятся не только в странах с высокой солнечной активностью, но практически во всех регионах мира с различными климатическими условиями [39, 70]. В связи с тем, что стоимость традиционных источников энергии непрерывно растет, в настоящее время в регионах без стационарных сетей электропитания увеличивается уровень внедрения солнечных фотоэлектрических установок [68]. Это не только позволяет снизить экологическую нагрузку, но и экономически выгодно [23].

Фотоэлектрические системы в общем случае представляют собой структуру, приведенную на рисунке 1.1. Они включают в себя массив преобразователей энергии – фотоэлектрические (солнечные) модули (ФМ), управляющее устройство – контроллер заряда-разряда, элементы хранения энергии – аккумуляторные батареи (АБ), преобразователь постоянного напряжения в переменное – инвертор.



Рисунок 1.1 – Структурная схема фотоэлектрической системы

В зависимости от технико-эксплуатационных требований состав фотоэлектрических систем может варьироваться [16, 17, 40, 42].

Фотоэлектрические системы по принципу построения подразделяются на следующие основные типы:

- автономные. Такие системы подразумевают обособленность, закрытость самообеспечение. Такая компановка применяется, И когда отсутствует возможность подключения к центральной сети энергоснабжения. В автономных фотоэлектрические модули генерируют электричество системах ДЛЯ повсеместных нужд. Для хранения энергии используются аккумуляторные батареи, качестве резервного а В источника энергии применяется жидкотопливный электрогенератор;

- соединенные с сетью. В случае, когда объект энергоснабжения имеет подключение к сетям центрального электроснабжения, фотоэлектрические модули используются для генерации энергии, покрывающей часть нагрузки. Избыток энергии поступает в сеть и за счёт специальных счётчиков электроэнергии происходит перерасчёт купленного/проданного электричества. Таким образом обеспечивается не только снижение расхода по затратам на электроэнергию в течение года, но и появляется возможность обеспечить нулевое потребление электроэнергии за год;

- резервные (гибридные) системы. В этом случае фотоэлектрическая система подключается к сетям неудовлетворительного качества. В случае

аварий, разрыва сети или недостаточного качества энергоснабжения, для покрытия нагрузки используется фотоэлектрическая система. В этом случае применяются аккумуляторы, блоки бесперебойного питания или другой источник, например генератор. В случае использования жидкотопливного или генератора за счет фотоэлектрической системы газового существенно потребление уменьшается топлива BO время перерывов сетевом В электроснабжении.

Структурные схемы представленных выше разновидностей фотоэлектрических систем приведены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Структурные схемы основных типов фотоэлектрических систем

Интерес к внедрению фотоэлектрических систем в различных отраслях человеческой деятельности связан, в том числе, и с их преимуществами, в сравнении с традиционными источниками:

1. Возобновляемость. В отличие от ископаемых видов топлива – угля, нефти, газа – солнечная энергия является возобновляемым, неиссякаемым ресурсом

2. Потенциал. На поверхность Земли приходится около 120 тыс. тераватт солнечной энергии, что 20 тысяч раз покрывает общемировую потребность в энергии.

3. Универсальность. Солнечная энергия обладает широким спектром применения – от автономного энергоснабжения частных домов до использования на космических аппаратах.

4. Экологичность. Учитывая общемировую тенденцию в направлении повышения экологической чистоты, солнечная энергетика – это одна из перспективных альтернатив производства энергии.

5. Экономичность, низкие эксплуатационные расходы. Обслуживание фотоэлектрических систем характеризуется низкими затратами.

Однако применение фотоэлектрических систем также сопровождается рядом недостатков:

1. Высокой стоимостью элементов фотоэлектрической системы.

2. Непостоянством. Выработка энергии осуществляется только при наличии солнечного света.

3. Низким КПД. У современных фотоэлектрических систем составляет порядка 10 %

Проблема низкого КПД фотоэлектрических систем является наиболее важной. Известно, что потери энергии в ФЭС происходят на всех этапах преобразования-передачи электроэнергии:

потери в фотоэлектрических модулях, при фотоэлектрическом преобразовании;

 потери энергии при использовании неоптимального отбора энергии от фотоэлектрических модулей (неоптимальное управление процессами в фотоэлектрической системе);

 потери при передаче энергии потребителю (преобразование в инверторах, внутреннее сопротивление проводников).

Исходя из вышеприведенных выкладок, можно прийти к выводу, что фотоэлектрические системы занимают важнейшее место в отрасли

альтернативного энергоснабжения и, несмотря на низкие показатели КПД, продолжают наращивать свое присутствие на рынке, в связи с чем возникает противоречие между востребованностью фотоэлектрических установок и низкой эффективностью таких систем. Это приводит к задаче повышения эффективности ФЭУ.

1.2 Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических систем

Под энергетической эффективностью подразумевают относительную оценку полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенных в целях получения такого эффекта [82]. К параметрам, характеризующим энергетическую эффективность ФЭУ, можно отнести:

1. Коэффициент использования фотоэлектрического модуля – *K*_p, определяемый соотношением фактически потребляемой мощностью от ФМ и мощностью оптимальной точки BBX (рисунок 1.3):

$$K_{\rm p} = \frac{P_{\Phi \rm M}}{P_{\Phi \rm M} max} = \frac{U_{\Phi \rm M}}{U_0} \frac{I_{\Phi \rm M}}{I_0}.$$

2. Коэффициент полезного действия преобразователя:

$$\eta = \frac{1}{U_{\Phi \mathrm{M}}} \frac{I_{\mathrm{Bbix}}}{I_{\mathrm{Bx}}}.$$

Приведенные показатели позволяют оценить эффект от применения тех или иных методов повышения энергетической эффективности.

Существуют несколько наиболее эффективных методов повышения энергетической эффективности ФЭУ:

- реализация режима отбора мощности в оптимальной рабочей точке BBX режим экстремального регулирования мощности (ЭРМ);
- реализация режима непрерывного автоматического наведения фотоэлектрических модулей на Солнце (солнечный трекер);
- оптимизация конструкции солнечного модуля с целью достижения минимального нагрева фотоэлементов;

• установка на солнечные модули специальных устройств-концентраторов, обеспечивающих более эффективный «сбор» солнечного излучения.

Совершенствование фотоэлектрических установок, прежде всего, зависит от улучшения технических характеристик таких элементов, как фотоэлектрические модули и аккумуляторные батареи (ФМ, АБ). Однако даже при самых совершенных технологиях энергетическая установка в целом может обладать неудовлетворительными энергетическими характеристиками из-за нерационального использования их возможностей. Поэтому при разработке ФЭУ должна решаться комплексная задача, объединяющая вопросы эффективности устройств и рационального подхода к их использованию [74].

Вопросам повышения энергетической эффективности ФЭУ посвящено значительное количество работ. Так, например, в рамках вопроса оптимизации конструкции фотоэлектрических модулей можно выделить такие работы, как [3, 4, 15, 18, 19, 21–23, 26]. Задача реализации и оптимизации работы солнечных трекеров также является популярной темой научных исследований, здесь можно работы [11, 12, 24, 25]. Большой интерес вызывает отметить задача оптимального управления процессами энергопреобразования В фотоэлектрических системах, что рассмотрено в работах [8, 12, 17, 27-31]. Немало внимания уделяется моделированию фотоэлектрических установок и их элементов [2, 6 – 9, 10, 30, 32].

Однако, несмотря на постоянное развитие солнечной энергетики, остаётся ряд проблем и вопросов, связанных как с эффективностью использования ФЭУ, так и с моделированием элементов фотоэлектрических установок.

В первую очередь это касается непосредственно самих фотоэлектрических модулей [71, 73]. Даже современные фотоэлектрические модули обладают небольшим коэффициентом преобразования падающей солнечной энергии: в ясный солнечный день на каждый квадратный метр площади фотоэлектрических модулей (ФМ), перпендикулярный вектору солнечных лучей, поступает примерно 1 кВ[т энергии, однако значительная часть энергии теряется.

Основные энергетические потери ФМ приходятся на:

- отражение части излучения от поверхности преобразователя;

- прохождение части излучения через преобразователь без поглощения;

- преобразование в тепловую энергию;

- внутреннее сопротивление преобразователя.

Год от года эффективность фотоэлементов увеличивается за счёт новых технологий их изготовления и обработки [21–23, 80]. Среди методов уменьшения потерь энергии и увеличения КПД фотоэлектрических модулей можно выделить:

использование полупроводников с оптимальной шириной запрещенной зоны;

- оптимальное легирование и создание встроенных электрических полей;

- использование гетерогенных и варизонных полупроводниковых структур;

 – улучшение конструкции ячеек фотоэлементов (частота контактной сетки, толщина базового слоя, глубина *p*–*n* перехода);

создание фотопреобразователей с двухсторонней чувствительностью;

– разработка люминесцентно переизлучающих структур.

Немало внимания уделяется также такому методу, как теплоотвод от фотоэлементов. Так как при нагреве фотоэлементов эффективность фотоэлектрического преобразования пропорционально снижается, применение теплоотвода является эффективным методом увеличения КПД фотоэлектрического модуля. Так, например, в работе [18] рассмотрено применение дополнительной поверхности для отвода тепла от фотоэлементов, а также приведена методика расчёта теплоотводящей поверхности на основе расчёта площади абсорбера для солнечного коллектора. В [4, 72] представлено использование гибридных фотоэлектрических модулей/коллекторов, которые позволяют вырабатывать электроэнергию, а также нагревать теплоноситель, за счет отведения от фотоэлементов тепла, выступая, таким образом, ещё и в качестве солнечного коллектора.

Возможности фотоэлектрических преобразователей значительно увеличиваются при реализации определённых конструкционных особенностей [19]. Так, например, в работе [5] приведены результаты реализации ФМ на

основе **ЛИНЗОВЫХ** концентраторов каскадных фотоэлектрических И преобразователях; выводы по этой работе показывают двукратное увеличение КПД, в сравнении с обычными фотоэлектрическими модулями. В [26] для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей предложено использовать акриловый концентратор, что значительно снизит объём необходимых фотоэлементов с сохранением прежней выходной мощности.

Эффективной технологией повышения КПД фотоэлектрических установок является солнечный трекер – система наведения фотоэлектрических модулей на солнце [47, 75-77]. Такое решение увеличивает энергетическую эффективность фотоэлектрических систем не менее чем на 25-30 % [12]. Существует множество решений по реализации слежения и наведения фотоэлектрических модулей на солнце. Так, например, в [11] представлен двухосевой трекер на шаговых двигателях с датчиком положения, а в [24] – модель инфракрасного солнечного трекера. Солнечные трекеры, использующие различные электродвигатели (шаговые двигатели, линейные двигатели, сервоприводы, ротаторы), включают в свой элементный состав контроллеры, вырабатывающие управляющее воздействие в зависимости от показаний следящей системы. Удешевить систему слежения за солнцем можно отказавшись от контроллерного управления. Так, в [26] приведена разработка солнечного трекера на управляющей плате с коллекторным двигателем постоянного тока. Более простая конструкция солнечного трекера про принципу водяных часов предложена в [25].

Ещё одним способом повышения энергетической эффективности автономных систем энергоснабжения является реализация метода экстремального регулирования мощности, также называемого методом поиска точки максимальной мощности (MPPT – Maximum Power Point Tracking) [17, 33, 79, 81].

Задача экстремального регулирования мощности вытекает из вида BBX фотоэлектрического модуля. На рисунке 1.3 представлена типовая BBX фотоэлектрического модуля.



Рисунок 1.3 – Вольт-ваттная характеристика фотоэлектрического модуля

На рисунке обозначено: $I_{\kappa,3}$ – ток короткого замыкания; $V_{x,x}$ – напряжение холостого хода; I_p , V_p – оптимальные ток и напряжение; *MPP* – точка максимальной мощности.

На рисунке 1.3 видно наличие у ВВХ фотоэлектрического модуля экстремума мощности, при котором обеспечивается максимизация отбираемой энергии. Задача экстремального регулирования мощности сводится К нахождению пары ток-напряжение на фотоэлектрическом модуле, обеспечивающей максимум мощности. Однако эта задача усложняется зависимостью ВВХ фотоэлектрического модуля от внешних и внутренних (температуры, освещенности, угла падения лучей, условий частичного затенения, деградации фотоэлементов). На рисунке 1.4 приведены семейства BBX фотоэлектрического модуля в зависимости от изменения таких внешних условий, как температура и освещенность.



Рисунок 1.4 – Зависимость BBX фотоэлектрического модуля от внешних условий

Как видно из рисунка 1.4, при изменении внешних условий вид BBX изменяется, наблюдается дрейф точки максимальной мощности. При этом скорость дрейфа BBX может составлять $\approx 0,03$ B/c [83], что ставит перед разработчиками задачу слежения за этой точкой с целью максимизации отбираемой от фотоэлектрического модуля энергии.

Согласно [12], энергетическая эффективность реализации режима экстремального регулирования мощности может достигать 30 %. Существует несколько методов поиска точки максимальной мощности. Так, в [27] приведен развёртки, использующий развёртки метод токовой сигнал для тока фотоэлектрических c обновления модулей целью вольт-амперной характеристики (ВАХ) через фиксированные отрезки времени. Напряжение в вычисляется по ВАХ с точке максимальной мощности установленной периодичностью. В [28] рассматривается применение метода возрастающей проводимости. Суть метода заключается в считывании контроллером изменения тока и напряжения солнечной установки с целью предварительной оценки эффекта от изменения напряжения. В [29] рассмотрен метод постоянного напряжения, также называемый методом напряжения холостого хода. При применении этого метода выходное напряжение регулируется постоянной величиной. Этот метод обладает большой погрешностью на дистанции ввиду того, что не учитывает изменения вида BBX от изменения внешних условий (температуры, освещенности). Наибольшее распространение получил метод

возмущения и наблюдения [8, 12, 30, 31]. В этом методе устройство МРРТ итерационно изменяет напряжение на массиве фотоэлектрических модулей, что приводит к изменению мощности. Путем оценки приращения мощности контроллер решает, в каком направлении продолжать поиск: если мощность перестала увеличиваться, то точка экстремума ВВХ найдена. Недостатками этого метода является наличие колебаний мощности и сравнительно долгое время регулирования. Решение этих проблем видится в применении аппарата нечёткой 44]. логики [34, Применение нечёткого МРРТ-контроллера рассмотрено в работах [35, 36]. Идея использования нечёткой логики в МРРТалгоритме возмущения-наблюдения состоит в задании нефиксированного шага изменения напряжения солнечной установки путём формирования на выходе нечёткого контроллера коэффициента усиления, увеличивающего шаг поиска до точки максимальной мощности и уменьшающего его при нахождении этой точки.

При разработке систем альтернативного энергоснабжения, в частности ФЭУ, особую актуальность имеет моделирование, позволяющее на этапе проектирования формировать и исследовать системы с необходимой топологией, проводить оценку эффективности, сравнивать варианты построения системы [50, 51]. Так, в [6–8] приведены примеры моделирования элементов автономных электропитания в среде MATLAB/Simulink. В [6] систем рассмотрены непосредственно основные элементы фотоэлектрической системы, приведены их модели и проведена проверка их адекватности. В [7] разработана модель системы электропитания, особое внимание уделено элементу действующей, динамическименяющейся, нагрузки. В работе [2] приведены результаты исследования модели фотоэлемента, разработанной с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. В работе [35] рассмотрена модель МРРТконтроллера на нечёткой логике, использующего две входные переменные: ошибку и изменение ошибки в ходе итераций, в зависимости от которых, по заданному набору правил, формируется коэффициент усиления. Похожий контроллер с нечёткой логикой представлен в [36]; в отличие от [35], здесь

нечёткий контроллер имеет только один вход – аналог производной мощности по напряжению. Это несколько упрощает алгоритм и сокращает количество правил нечёткого контроллера.

Различные подходы к реализации модели фотоэлектрического модуля рассмотрены в [6, 9, 10, 30, 32]. Так, например, в [9] создана модель фотоэлектрического модуля с помощью средств Simulink, учитывающая влияние уровня солнечной инсоляции (введены коэффициенты солнечной инсоляции) и температуры окружающей среды (введены температурные коэффициенты). В [30] приведена солнечной установки модель с использованием собранного фотоэлементов фотоэлектрического модуля, ИЗ стандартной библиотеки Simulink/Simscape. Стандартная модель фотоэлемента не учитывает многие внешние факторы влияния (частичное затенение, нагрев и охлаждение в процессе работы), однако подходит для моделирования и оценки адекватности других элементов ФЭУ, например МРРТ-контроллера. В работе [6] показано построение модели фотоэлектрического модуля из разработанных моделей фотоэлементов с помощью средств библиотеки Simulink/SimPowerSystems. Несмотря на некоторые упрощения (не учитывается деградация фотоэлементов и частичное затенение), модель фотоэлектрического модуля на базе элементов Simulink/SimPowerSystems может быть использована в моделировании силовых цепей автономных систем энергоснабжения, что показано в работах [7, 8].

При построении моделей элементов фотоэлектрических установок зачастую прибегают к упрощениям, пренебрегая некоторыми свойствами элементов: так, например, большинство моделей фотоэлектрических модулей не учитывает угол падения солнечных лучей, ограничиваясь лишь уровнем излучения. Также при моделировании пренебрегают деградацией элементов. Определённые сложности при моделировании фотоэлектрических модулей вызывают условия частичной затенённости (затенённость отдельных фотоэлементов), и обычно ими пренебрегают.

1.3 Адаптивное управление в фотоэлектрических системах

1.3.1 Задача управления в фотоэлектрической системе

Системы автономного электроснабжения, в состав которых входят аккумуляторные батареи, снабжаются средством контроля и управления процессами заряда и разряда аккумуляторов [49]. Наличие контролирующих устройств позволяет продлить срок службы аккумуляторов, предотвратить аварийные ситуации и оптимизировать энергопотребление в системе [43]. Известно, что глубокий разряд резко сокращает срок службы аккумуляторной батареи, а перезаряд может привести к аварийным ситуациям [42]:

- закипанию электролита и опасному газовыделению;

– вспучиванию и взрыву герметичных аккумуляторных батарей.

Контроллеры заряда обеспечивают отключение нагрузки от аккумуляторных батарей при глубокой разрядке, а также отключают источник энергии (фотоэлектрический модуль, ветряк и т.п.), если аккумуляторы заряжены, чтобы избежать перезаряда.

Существуют различные виды контроллеров заряда. Главной отличительной особенностью таких контроллеров является алгоритм управления.

Обычные контроллеры отключают источник энергии (фотоэлектрический модуль) при достижении напряжения на аккумуляторной батарее примерно 14,4 В (для АБ номинальным напряжением 12 В). При снижении напряжения на АБ до 12,5–13 В снова подключается фотоэлектрический модуль и заряд возобновляется. При этом максимальный уровень заряженности АБ составляет 60–70 %.

Контроллеры с функцией широтно-импульсной модуляции (ШИМ) обеспечивают четыре стадии заряда от фотоэлектрического модуля: заряд максимальным током, ШИМ–заряд, выравнивание, поддерживающий заряд.

Контроллеры с режимом ЭРМ наиболее эффективны при работе с ФМ, т.к. обеспечивают отбор энергии в оптимальной рабочей точке BBX. Их также

называют МРРТ-контроллеры (Maximum Power Point Tracking – Слежение за Точкой Максимальной Мощности). Следует отметить, что МРРТ-контроллеры также используют ШИМ для регулирования тока заряда аккумуляторов. Существует несколько алгоритмов поиска максимальной мощности:

- Возмущение и наблюдение. Согласно алгоритму этого метода, МРРТ контроллер небольшую величину (шаг) на изменяет напряжение фотоэлектрической установки, после чего устройство измеряет мощность и сравнивает с предыдущим значением. Увеличение мощности говорит о правильном направлении поиска, и контроллер продолжает изменять напряжение в эту сторону, пока мощность не перестанет увеличиваться. Этот метод является наиболее распространенным. Недостатком метода является генерация колебаний мощности вследствие характерного для поисковых алгоритмов «рысканья» около искомой точки. [30].

- Метод возрастающей проводимости. Согласно этому методу, максимальной контроллер вычисляет точку мощности, рассчитывая возрастающую проводимость ($\Delta I / \Delta U$) и сравнивая её с проводимостью фотоэлектрических модулей (I/U). Условием экстремума BBX, т.е. максимума мощности, является равенство этих величин ($I/U = \Delta I/\Delta U$). Определив оптимальное напряжение по этому методу, контроллер поддерживает данное значение до тех пор, пока не изменится уровень освещенности, после чего процесс повторяется. Графическая интерпретация метода приведена на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – К работе алгоритма возрастающей проводимости

Для приведенного на рисунке обозначения (dP/dV) можно записать

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}.$$
(1.1)

С учетом такого преобразования можно привести следующее аналитическое описание для метода возрастающей проводимости:

если рабочая точка находится слева от точки максимальной мощности,
 то

$$\frac{-I}{V} > \frac{dI}{dV}$$
, и $\frac{dP}{dV} > 0;$

если рабочая точка находится справа от точки максимальной мощности,
 то

$$\frac{-I}{V} < \frac{dI}{dV}$$
, и $\frac{dP}{dV} < 0;$

- если рабочая точка находится в точке максимальной мощности, то

$$\frac{-I}{V} = \frac{dI}{dV}$$
, и $\frac{dP}{dV} = 0$

Согласно алгоритму метода, управляющее устройство проводит измерение увеличения тока и напряжения фотоэлектрической установки, чтобы предопределить эффект от изменения напряжения. Этот метод требует больше вычислительных возможностей от контроллера, но он способен отслеживать изменения условий быстрее метода возмущения и наблюдения (ВиН).

Недостатком метода возрастающей проводимости, как и метода ВиН, является возникновение колебаний мощности [28].

- Метод токовой развёртки. В этом методе управляющее устройство получает сигнал развёртки тока от фотоэлектрических модулей, на основе которого строит ВАХ с определенной периодичностью. Напряжение, обеспечивающее максимальную мощность, вычисляется по ВАХ с тем же фиксированным промежутком времени [27]. Функция для формы токовой развертки пропорциональна ее производной

$$f(t) = k_4 \frac{df(t)}{dt},\tag{1.2}$$

где k_4 – пропорциональная константа.

Мощность фотоэлектрического модуля, таким образом, можно записать как:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot f(t).$$
 (1.3)

Для точки максимальной мощности можно записать

$$\frac{dp(t)}{dt} = v(t)\frac{df(t)}{dt} + f(t)\frac{dv(t)}{t} = 0.$$
 (1.4)

Из выражений (1.2) и (1.4) можно получить:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \left[v(t) + k_4 \cdot \frac{dv(t)}{t}\right] \frac{df(t)}{dt} = 0.$$
(1.5)

Решением этого дифференциального уравнения будет

$$f(t) = C \cdot \exp\left[\frac{t}{k_4}\right].$$
 (1.6)

Коэффициент *C* выбирается равным максимальному току фотоэлектрического модуля I_{max} и коэффициент k_4 будет отрицательным, что приведет к уменьшению экспоненты, функция с постоянной времени $\tau = -k_4$ в уравнении (1.6) даст выражение

$$f(t) = I_{\max} \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]. \tag{1.7}$$

Ток в выражении (1.7) можно получить через использование уравнения разряда конденсатора. Поскольку производная (1.7) отлична от нуля, (1.5) можно разделить на df(t)/dt и, с подстановкой f(t)=i(t), упростить до:

$$\frac{dp(t)}{di(t)} = v(t) + k_4 \frac{dv(t)}{t} = 0.$$
(1.8)

После вычисления напряжения, обеспечивающего максимум мощности, можно использовать найденное напряжение как опорное для последующих итераций.

- *Метод постоянного напряжения*. В этом методе рабочее напряжение регулируется постоянной величиной. Управляющее устройство на мгновение отключает фотоэлектрические модули от системы и измеряет напряжение холостого хода, после чего вновь коммутирует фотоэлектрические модули и продолжает работу, задаваясь рабочим напряжением, определяемым напряжением холостого хода и постоянным коэффициентом, определяемым эмпирически, либо на основе моделирования для конкретных условий эксплуатации:

$$V_{MPP} \approx k_1 \cdot V_{\rm x.x}.\tag{1.9}$$

На текущий момент метод постоянного напряжения практически не используется как самостоятельный, а применяется в качестве дополнительного режима в паре с другим методом [29].

1.3.2 Управление по методу возмущение и наблюдение. Преимущества и недостатки

В рамках диссертации в качестве сравнительного алгоритма выступает алгоритм «возмущение и наблюдение», как наиболее распространенный на практике.

В алгоритме «возмущение и наблюдение» (ВиН), приведённом на рисунке 1.6, поиск точки максимальной мощности ведётся следующим образом:

- на первом шаге вычисляются показатели тока и напряжения фотоэлектрической системы;

- на втором шаге по полученным данным производится расчет мощности;

 на третьем шаге происходит операция сравнения текущего значения мощности с предыдущим, с целью установить направление движения к точке максимума по BBX, приведённой на рисунке 1.7; на четвертом шаге происходит изменение напряжения фотоэлектрической установки на определенную величину с целью переопределения мощности в системе;

- на пятом шаге происходит запоминание текущей информации для использования в последующей итерации.

Главным преимуществом метода ВиН является простота его технической и программной реализации, что, в свою очередь, уменьшает требования к вычислительной и элементной оснастке системы [12].

Недостатками алгоритма ВиН являются возникающие при его работе колебания напряжения, приводящие к недовыработке мощности, а также фиксированное время выхода на рабочую точку. При этом эти недостатки взаимосвязаны: уменьшение времени поиска рабочей точки приводит к увеличению амплитуды колебаний, что ведёт к увеличению недовыработки мощности. Уменьшение амплитуды колебаний мощности приводит к увеличению времени поиска точки максимальной мощности [8]. Ход работы алгоритма и его недостатки проиллюстрированы на рисунке 1.8.

Для максимизации эффективности метода возмущения и наблюдения следует обеспечить его точным предсказывающим и адаптирующимся алгоритмом [12].



Рисунок 1.6 – Алгоритм «возмущение и наблюдение»



Рисунок 1.7 – Вольт-ваттная характеристика с иллюстрацией поиска экстремума мощности по алгоритму «возмущение и наблюдение»



Рисунок 1.8 – Иллюстрация работы алгоритма ВиН

1.3.3 Адаптивные алгоритмы управления

Вариант классификации адаптивных систем представлен на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Классификация адаптивных систем

Адаптивные системы можно разделить на две основные группы по характеру изменений в управляющем устройстве:

- самонастраивающиеся (системы, в которых изменяются только параметры регулятора);

- самоорганизующиеся (системы, в которых изменения касаются и структуры регулятора).

Самонастраивающиеся адаптивные системы можно также разделить по методу изучения объекта управления:

- поисковые;

- беспоисковые.

Поисковые адаптивные системы классифицируются на:

- экстремальные системы, целью управления которых является поддержание системы в точке экстремума требуемых характеристик. Чтобы обеспечить движение к экстремуму, определение управляющих воздействий осуществляется посредством дополнения управляющего сигнала поисковым сигналом;

- алгоритмы непрямого адаптивного управления с настраиваемой моделью. При непрямом адаптивном управлении сначала делается оценка параметров объекта, после чего на основании полученных оценок определяются требуемые значения параметров регулятора и производится их подстройка.

Беспоисковые адаптивные системы управления можно разделить на две группы по способу получения информации для настройки регулятора:

- системы с эталонной моделью (ЭМ);

- системы с идентификатором, в литературе их иногда называют системами с настраиваемой моделью (HM).

Адаптивные системы с ЭМ содержат динамическую модель системы, обладающую требуемым качеством.

В рамках выполенных исследований разработаны адаптивные алгоритмы управления с самонастройкой, относящиеся к класссу поисковых алгоритмов на

основе как экстремального регулирования, так и управления с настраиваемой моделью. Описание предложенных алгоритмов подробно приведено в главе 2.

1.3.4 Подходы к реализации метода «возмущение и наблюдение» на основе адаптивных алгоритмов

Существуют различные подходы к оптимизации метода ВиН. Среди них можно выделить:

- Алгоритм ВиН с перенастройкой поискового шага. В этом методе используется дополнительный расчет для формирования корректирующего коэффициента поискового шага по напряжению. Такое решение позволяет уменьшать или увеличивать шаг поискового алгоритма, в зависимости от логики корректировки, за счет чего сокращается время выхода на рабочую точку и происходит снижение амплитуды колебаний напряжения в процессе поддержания максимальной мощности.

Корректирующий коэффициент определяется различными способами, как функция некоторых параметров, влияющих на вид BBX и на положение рабочей точки, что в общем виде можно записать как

$$k_{\pi} = f(I, V, W, T, \alpha), \qquad (1.10)$$

где I – ток фотоэлектрического модуля; V – напряжение фотоэлектрического модуля, W – уровень освещенности; T – температура фотоэлектрического модуля, α – угол падения солнечных лучей.

Тогда шаг по напряжению будет изменяться в зависимости от изменения коэффициента *k*_п:

$$\Delta V_n = k_{\Pi} \cdot \Delta V_{n-1}. \tag{1.11}$$

К недостаткам метода можно отнести зависимость от изначально заданного шага, необходимость дополнительной корректировки по частным случаям функционирования фотоэлектрических систем (условия частичной затененности, температурные скачки).

- Алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией. Этот подход предлагает использовать в качестве исследуемой характеристики ток на солнечном модуле. Идея заключается в том, что фототок напрямую зависит от

уровня освещенности, температуры фотоэлемента и угла падения солнечных лучей, следовательно, зная эти показатели (возмущающие воздействия), можно заранее рассчитать соответствующий им фототок, предсказать вид BBX и на основе известных зависимостей получить координаты точки максимальной мощности на BAX. В зависимости от текущей позиции рабочей точки относительно расчетной точки максимальной мощности на BAX, корректируется шаг поиска по алгоритму BuH: чем ближе рабочая точка к расчетной, тем меньше шаг.

Исходя из вышеизложенного, данный метод можно математически представить следующим образом:

- расчет ВАХ модели:

$$\begin{cases} I_{\rm ph} = f(I_{\rm K,3}, V_{\rm X,x}, W, T, \alpha); \\ V_{\rm ph} = f(I_{\rm ph}). \end{cases}$$
(1.12)

- определение точки максимальной мощности на ВАХ модели:

$$\frac{dP}{dV} = 0; \tag{1.13}$$

- задание рабочего напряжения равным рассчитанному на модели напряжению максимальной мощности:

$$V_{\text{pag}} = V_{\text{мод}MPP}. \tag{1.14}$$

К преимуществам этого метода можно отнести подстройку системы к текущим возмущениям; возможность минимизации времени поиска рабочей точки за счет определения приближенной точки максимальной мощности на модели; минимизация колебаний напряжения около рабочей точки.

К недостаткам можно отнести высокую зависимость реализации от качества модели и опыта разработчика, а также требование к наличию дополнительных датчиков.

- Алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором. В этом методе используются возможности аппарата нечеткой логики и теории нечетких множеств, позволяющие корректировать шаг по напряжению, в зависимости от оценки входных параметров и их соответствия тем или иным правилам нечеткого контроллера.

Математическая теория нечетких множеств позволяет формализовать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и осуществлять нечеткие выводы. Экспериментально показано, что использование нечеткой логики в управлении (нечеткое управление) дает лучшие результаты, по сравнению с получаемыми при традиционных алгоритмах управления [45, 52, 85].

В обобщенном виде нечеткий контроллер представлен на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Общий вид нечеткого контроллера

Основные определения, которыми оперирует теория нечетких множеств:

- Нечетким множеством A на универсальном множесте U называется совокупность пар ($\mu_A(u), u$), где $\mu_A(u)$ – степень принадлежности элемента $u \in U$ к нечеткому множеству A. Степень принадлежности – это число из диапазона [0, 1]. Чем выше степень принадлежности, тем в большей мере элемент универсального множества соответствует свойствам нечеткого множества.

- Функцией принадлежности называется функция, которая позволяет вычислить степень принадлежности произвольного элемента универсального множества к нечеткому множеству. Если универсальное множество состоит из конечного количества элементов $U = \{u_1, u_2, ..., u_k\}$, тогда нечеткое множество A записывается в виде

$$A=\sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)/u_i.$$

В случае непрерывного множества U используют следующее обозначение:

$$A=\int_u \mu_A(u)/u\cdot du.$$

- *Лингвистической переменной* называется переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания некоторого естественного или искусственного языка.

- *Терм-множеством* называется множество всех возможных значений лингвистической переменной.

- *Термом* называется любой элемент терм-множества. В теории нечетких множеств терм формализуется нечетким множеством с помощью функции принадлежности.

- *Дефаззификацией* называется процедура преобразования нечеткого множества в четкое число.

Для нечеткого множества, описываемого выражением

$$A = \int_{[\underline{u},\overline{u}]} \mu_A(u)/u \cdot du$$
 ,

дефаззификация осуществляется по методу центра тяжести по формуле

$$a = \frac{\int_{\underline{u}}^{\overline{u}} u \cdot \mu_A(u) \cdot du}{\int_{\underline{u}}^{\overline{u}} \mu_A(u) \cdot du}.$$

Физическим аналогом этой формулы является нахождение центра тяжести плоской фигуры, ограниченной осями координат и графиком функции принадлежности нечеткого множества. В случае дискретного универсального множества дефаззификация нечеткого множества вида:

$$A = \sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)/u_i$$

по методу центра тяжести осуществляется по формуле

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{k} u_i \cdot \mu_A(u_i) / u_i}{\sum_{i=1}^{k} \mu_A(u_i) / u_i}.$$

- *Нечетким логическим выводом* называется аппроксимация зависимости *y*=f(x₁, *x*₂, ..., *x_n*) с помощью нечеткой базы знаний и операций над нечеткими множествами.

В рамках рассматриваемого решения, в качестве входных переменных могут рассматриваться различные характеристики, определяющие вид вольт-

характеритсики фотоэлектрического модуля: ваттной ток и напряжение, приращение мощности от приращения напряжения, температура и освещенность. Как и в методе с перенастройкой поискового шага, выходной переменной будет являтся корректирующий коэффициент, нечеткого контроллера изменяющий размер шага поискового алгоритма ВиН. За счет лингвистического зависимостей описания входных И выходных переменных достигается значительная гибкость в настройке системы, позволяющая проводить достаточно точную адаптацию алгоритма в требуемых условиях.

Достоинствами построения системы на основе нечеткой логики является высокая эффективность поиска рабочей точки при различных условиях. Однако, как и в предыдущем методе, при реализации такой системы, большую роль играет опыт разработчика.

1.4 Выводы

Фотоэлектрические установки обладают большим потенциалом лля энергетической отрасли. Повышенный интерес к такого рода системам привел к созданию различных средств повышения их энергетической эффективности. С точки зрения автоматизации и управления наибольший интерес представляет эффективности ФЭУ с помощью технологии повышение энергетической слежения за точкой максимальной мощности. Эта технология обладает широкими возможностями для улучшения качества работы фотоэлектрических систем за счет обеспечения оптимальных режимов функционирования оборудования процессом заряда аккумуляторов), устранения недовыработки (управление мощности (преобразование энергии осуществляется при оптимальных, подстраиваемых параметрах системы), улучшения отбора энергии при рассеянном излучении (в условиях повышенной облачности, тумана). Среди приведенных в данной главе методов поиска точки максимальной мощности следует выделить алгоритм возмущения и наблюдения как наиболее популярный и простой в реализации, при этом обеспечивающий высокое качество отработки. Однако

применение алгоритма ВиН имеет и ряд недостатков, требующих разработки нового алгоритмического обеспечения.

В рамках диссертационной работы подлежат реализации, оценке и сравнению следующие адаптивные алгоритмы, отличающиеся от существующих: алгоритм с перенастройкой поискового шага, алгоритм с предсказывающей адаптацией, алгоритм с настройкой нечетким регулятором.

Таким образом, диссертационная работа посвящена решению следующих основных задач:

1. Разработка моделей элементов фотоэлектрической системы.

2. Разработка адаптивных алгоритмов управления процессом энергопреобразования в фотоэлектрической системе.

3. Создание программного обеспечения для компьютерного моделирования исследуемых процессов в фотоэлектрической системе, учитывающего физику требуемых процессов, содержащего разрабатываемые адаптивные алгоритмы и позволяющего провести вычислительные эксперименты и обеспечить адекватные оценки эффективности.
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТБОРА ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

2.1 Моделирование элементов фотоэлектрической установки

Математическое моделирование в качестве метода исследования имеет ряд преимуществ, являющихся решающими при выборе данного подхода к проектированию фотоэлектрических систем: универсальность и гибкость – возможность быстрой подстройки модели системы под различные свойства, характеристики и конфигурации; скорость отработки – возможность получения информации о системе за сравнительно короткий промежуток времени, например моделируя суточный график освещенности или нагрузки, данные можно получать по модельному времени, значительно меньшему, чем реальное [46].

При разработке математической модели фотоэлектрической системы следует выделить основные моделируемые узлы и характеристики, оказывающие наибольшее влияние на реальную систему.

2.1.1 Концепция построения модели фотоэлектрической системы

В разделе 1.1 главы 1 приведена классификация фотоэлктрических систем по принципу построения. В рамках данной научной работы рассматривается топология автономной системы энергоснабжения, такая система подразумевает обособленность, закрытость и самообеспечение. В автономных системах фотоэлектрические модули генерируют энергию для повсеместных нужд.

На основе предложенной топологии (см. рисунок 1.2) возможно построение различных фотоэлектрических систем: автономной электрической станции для снабжения частного дома, системы питания автономного робота, системы подзарядки внешних объектов (электронное оборудование, беспилотные летательные аппараты). Основной элементный состав для топологии автономной ФЭУ состоит из фотоэлектрического модуля, управляющего устройства, аккумулятора и нагрузки.

На рисунке 2.1 приведена структурная схема ФЭУ, как системы управления с экстремальным регулированием мощности.



Рисунок 2.1 – Структурная схема экстремального регулирования мощности ФЭУ: Регулятор – контроллер с сигналом задания на поиск максимума; Регулирующий орган – импульсный преобразователь; Объект управления – фотоэлектрический модуль; *S* – ШИМ-сигнал; *V* – сигнал по напряжению; *I* – сигнал по току; *W*, *α*, *T* – внешние возмущения по освещенности, углу падения лучей и температуре соответственно

Принимаемые упрощения. В данной работе рассматривается задача улучшения экстремального регулирования, следовательно особый интерес представляет только часть фотоэлектрической системы, отвечающая за этот процесс. Для упрощения моделирования и исследования соответствующих задаче процессов, принимаются следующие допущения и упрощения:

 – для линий связи, аккумуляторной батареи и нагрузки будут применяться элементарные модели;

 не будут учитываться потери эергии в линиях связи, при передаче и на преобразование и распределение в цепях аккумулятора и нагрузки;

– угол падения лучей принимается равным 90°, т.е. соответствует применению технологии солнечного трекера;

 – разрабатываемые алгоритмы отрабатывают на подзаряд аккумулятора, с отключенной нагрузкой.

2.1.2 Моделирование фотоэлектрического модуля

Электрофизические характеристики фотоэлектрического модуля являются важнейшими параметрами фотоэлектрической установки, так как от них напрямую зависит эффективность применения такой системы и, как следствие, перспективность и целесообразность всего инженерного решения [38].

Фотоэлектрический модуль представляет собой параллельнопоследовательное соединение отдельных фотоэлементов, обеспечивающих требуемые выходные ток и напряжение, в зависимости от внешних (температура, уровень освещенности, угол падения лучей) и внутренних (ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, деградация фотоэлемента) факторов. Исходя из этого, фотоэлемент можно представить в виде параметрической схемы, изображённой на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Параметрическая схема фотоэлемента

Управляющим параметром является напряжение V на фотоэлементе. За счет изменения напряжения V изменяются управляемые параметры: ток I и, следовательно, выходная мощность ($P = I \cdot V$). Измеряемыми параметрами являются ток I и напряжение V фотоэлемента. Также на управляемые параметры оказывают влияние внешние возмущающие параметры: освещенность W, температура T, угол падения солнечных лучей α . Внутренние параметры

фотоэлемента напряжение холостого хода $V_{x,x}$ и ток короткого замыкания $I_{\kappa,3}$ зависят от вида фотоэлемента, материала и конструкционных особенностей.

В общем виде модель фотоэлектрического модуля можно представить следующей функцией:

$$I_{\Phi \mathrm{M}} = f(V_{\mathrm{x.x}}, I_{\mathrm{K.3}}, T, W, \alpha),$$

где $I_{\Phi M}$ – ток фотоэлектрического модуля; $V_{x,x}$ – напряжение холостого хода; $I_{\kappa,3}$ – ток короткого замыкания; T – температура фотоэлектрического модуля; W – освещенность фотоэлектрического модуля; α - угол падения лучей.

Математическая модель фотоэлемента реализуется в виде эквивалентной электрической схемы, приведённой на рисунке 2.3, так называемой «моделью одного диода».



Рисунок 2.3 – Модель одного диода

Исходя из представленной эквивалентной схемы, согласно первому закону Кирхгофа, можно записать следующее выражение, описывающее выходной ток фотоэлемента:

$$I = I_{\rm ph} - I_d, \tag{2.1}$$

где I – выходной ток фотоэлемента, I_{ph} – фототок, I_d – ток диода.

Величина тока, протекающего через *p*–*n*-переход, зависит от приложенного к нему напряжения, согласно следующему выражению:

$$I_d = I_s \cdot \left(\exp\left[\frac{q(V + R_s \cdot I)}{a \cdot k \cdot T}\right] - 1 \right),$$

где I_s – ток насыщения, A; V – приложенное напряжение, B; R_s – сопротивление диода, Ом; I – ток на фотоэлементе, A; $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, – заряд одного электрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, – постоянная Больцмана; a –фактор идеализации, обеспечивающий согласование с реальными характеристиками; T – абсолютная температура, К.

Ток насыщения рассчитывается в зависимости от температуры по следующему выражению:

$$I_{s} = I_{dn} \left(\frac{T_{n}}{T}\right)^{3} \cdot \exp\left[\frac{q \cdot \Delta W}{a \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{n}} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

где I_{dn} – номинальный диодный ток; $\Delta W = 1,2$ эВ – энергия, соответствующая ширине запрещённой зоны; T – текущая температура фотоэлемента; T_n – номинальная температура 298 К.

Номинальный диодный ток зависит от номинальных значений напряжения холостого хода и тока короткого замыкания, то есть от типа фотоэлемента, и описывается следующим выражением:

$$I_{dn} = \frac{I_{\text{K.3}}}{\exp\left[\frac{V_{\text{x.x}}}{a \cdot V_{tn}}\right] - 1}.$$

Здесь $I_{\kappa,3}$ – номинальный ток короткого замыкания; $V_{x,x}$ – номинальное напряжение холостого хода; V_{tn} – температурный потенциал, определяемый как: $V_{tn} = \frac{k \cdot T}{a}$, параметры k, T, q обозначены выше.

Фототок *I*_{ph} зависит от температуры, освещённости и угла падения солнечных лучей. Эту зависимость можно представить нижеследующей формулой.

$$I_{\rm ph} = (I_{\kappa,3} + K_i \cdot \Delta T) W \cdot \sin(\alpha),$$

где $\Delta T = T - T_n$; K_i – температурный коэффициент по току; W – относительная освещённость, представляющая собой безразмерную величину, принимающую значения [0; 1], где величине 1 соответствует максимальная освещенность 1000 кВт/м²; $I_{\rm ph}$ – номинальный фототок; α – угол падения солнечных лучей.

С учётом вышеприведенных формул, можно записать выходной ток фотоэлемента:

$$I = \left(I_{\kappa,3} + K_i(T - T_n)\right)W \cdot \sin(\alpha) - \left(\frac{I_{\kappa,3}}{\exp\left[\frac{V_{\kappa,x}}{a \cdot k \cdot T}\right] - 1}\left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot \Delta W}{a \cdot k}\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right]\left(\exp\left[\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{a \cdot k \cdot T}\right] - 1\right)\right). \quad (2.2)$$

Температура *Т* фотоэлемента зависит от уровня освещенности. Для повышения адекватности модели эта зависимость задается температурной моделью Серванта:

$$T = T_0 + \alpha \cdot W(1 + \beta \cdot T_0)(1 - \gamma \cdot v_w),$$

где T_0 – температура окружающей среды, К; $\alpha = 0,0138$, $\beta = 0,031$, $\gamma = 0,042$ – коэффициенты; v_w – скорость ветра, м/с.

Фотоэлектрический модуль, как уже было сказано выше, представляет собой последовательно-параллельное соединение фотоэлементов, в результате такого соединения изменяются характеристики выходные модуля. Последовательное соединение увеличивает выходное напряжение количеству включенных последовательно пропорционально элементов, а параллельное включение пропорционально увеличивает выходной ток.

Большое влияние на работу фотоэлектрических модулей оказывает условие затененности, когда на часть фотоэлементов по какой-то причине перестает поступать свет. Чтобы промоделировать данный фактор, следует обеспечить индивидуальный учет освещенности (параметр *W* в формуле (2.2)) для каждой подсистемы-фотоэлемента общей модели фотоэлектрического модуля. Итогом такого моделирования будет являться модель с распределенными параметрами (уровень освещенности/затенение отдельных фотоэлементов), обеспечивающая высокий уровень соответствия технико-эксплуатационным характеристикам реальной системы.

2.1.3 Моделирование управляющего устройства

Важной составляющей функционирования фотоэлектрической установки является обеспечение оптимального режима отбора и распределения энергии. Эта задача лежит на контроллере заряда, управляющего распределением

энергии: накоплением в аккумуляторах, передачей к потребителям. Также контроллер заряда обеспечивает контроль за отбором энергии фотоэлектрическими модулями с помощью специальных алгоритмов.

Существуют различные контроллеры заряда фотоэлектрических систем, наибольшей эффективностью обладают так называемые МРРТ-контроллеры или контроллеры с режимом экстремального регулирования мощности.

Наибольшее распространение получил МРРТ-метод ВиН, логика работы которого была рассмотрена в первой главе.

Для реализации МРРТ-контроллера применяется топология импульсного преобразователя, повышающего или понижающего типа [31-33, 48, 78].

В данной работе для реализации зарядного устройства с функцией экстремального регулирования мощности используется топология понижающего импульсного преобразователя (Buck-конвертер), принципиальная схема Buck-конвертера представлена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Принципиальная схема Buck-конвертера

На схеме 2.4 видно, что блок D1, в зависимости от напряжения на выходном конденсаторе C2, замыкает и размыкает силовой ключ. При этом, чем выше напряжение на выходном конденсаторе C2, тем меньше время замыкания ключа, то есть меньше коэффициент заполнения (больше скважность). Если напряжение на выходном конденсаторе C2 превышает некоторое, то ключ вообще перестает замыкаться, пока напряжение не снизится. Когда ключ замкнут, ток идет по пути S1. При этом напряжение на катушке индуктивности равно разнице между входным и выходным напряжением. Ток через катушку увеличивается

пропорционально напряжению, приложенному к катушке, и времени замыкания ключа. Катушка накапливает энергию. Протекающий ток заряжает выходной конденсатор *C*2.

Когда ключ в разомкнутом состоянии, ток идёт по пути *S*2 через диод. К катушке приложено выходное напряжение с обратным знаком. Ток через катушку уменьшается пропорционально напряжению, приложенному к катушке, и времени, в течение которого ключ разомкнут. Протекающий ток по-прежнему заряжает выходной конденсатор *C*2.

Когда выходной конденсатор *C*2 полностью заряжен, ключ перестаёт замыкаться и зарядка прекращается. Ключ снова начнет замыкаться, когда выходной конденсатор *C*2 немного разрядится через нагрузку.

Для уменьшения пульсации тока входной цепи в схеме присутствует входной конденсатор *C*1.

Регулировочная характеристика понижающего преобразователя, при условии непрерывности тока дросселя, описывается соотношением:

$$\frac{V_{\rm Bbix}}{V_{\rm Bx}} = \frac{\gamma}{1 + R_{L1}/R_{\rm H}},$$
(2.2)

где γ – относительная длительность открытого состояния транзистора; R_{L1} – сопротивление дросселя; $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки.

Такая регулировочная характеристика соответствует работе импульсного преобразователя от источника ЭДС. В случае питания от ФМ, имеющего нелинейную BBX, и работе на аккумулятор, представляющий собой нагрузку с изменяющимся сопротивлением, характеристика (3.1) примет вид:

$$V_{\Phi M}^{*} = \frac{V_{\Phi M}}{V_{A B}} = \frac{1 + R_{L1}/R_{H}}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{V_{A B}} \cdot I_{B \text{ bix}}}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{V_{A B}} \cdot \frac{I_{B \text{ bix}}}{\gamma}}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}}{V_{A B}} \cdot \frac{I_{\Phi M}}{\gamma^{2}},$$

где $V^*_{\Phi M}$ – отношение напряжения на ФМ к напряжению на АБ; $V_{\Phi M}$ – напряжение на ФМ, В; $V_{A\overline{b}}$ – напряжение на аккумуляторной батарее, В; I_{Bbix} –выходной ток импульсного преобразователя, А; $I_{\Phi M}$ – ток на ФМ, А.

Чтобы связать регулируемый параметр $V_{\Phi M}$ с относительной длительностью импульса управления γ через характерные точки ВВХ ФЭУ можно использовать математическую модель, предложенную в [86]:

$$I_{\Phi M} = I_{K.3} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{K.3}} \right)^{\frac{V_{X.X} - V_{\Phi M}}{V_{X.X} - V_0}} \right),$$

где $I_{\kappa,3}$ – ток короткого замыкания, А; $V_{x,x}$ – напряжение холостого хода, В; I_0 – оптимальное значение тока, А; V_0 – оптимальное значение напряжения.

Используя предложенные формулы, получаем выражение, связывающее регулируемый параметр, относительную длительность управляющего импульса и характерные параметры системы:

$$V_{\Phi M}^{*} = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}^{*}}{\gamma^{2}} \left(1 - \left(1 - \frac{I_{0}}{I_{K3}} \right)^{\frac{V_{XX} - V_{\Phi M}}{V_{XX} - V_{0}}} \right),$$

где $R^*_{L1} = R_{L1} \cdot I_{K,3} / V_{Ab}$ – потери в дросселе на сопротивление.

Логика работы управляющего устройства в фотоэлектрической системе построена на алгоритме поиска экстремума: в ходе итерационных процессов управляющее устройство изменяет напряжение на фотоэлектрическом модуле $(V_{\Phi M})$ на некоторое значение $dV_{\Phi M}$ (шаг поиска), рассчитывая при этом изменение мощности и определяя направление поиска экстремума.

С учетом скорости дрейфа BBX фотоэлектрического модуля: $V_{V_{-}\Phi M} \approx 0,03$ B/c [83], можно записать выражение для требуемого быстродействия управляющего устройства в зависимости от значения шага по напряжению $dV_{\Phi M}$:

$$\Delta t = \frac{1}{f_{\mathrm{sp}}} \le \frac{dV_{\mathrm{\Phi}\mathrm{M}}}{V_{V_{\mathrm{\Phi}\mathrm{M}}}},$$

где $V_{V_{-}\Phi M}$ – скорость изменения напряжения фотоэлектрического модуля в оптимальной точке.

Такое условие является недостаточным для реальной системы, т.к. учитывает только горизонтальный дрейф BBX фотоэлектрического модуля $(P_{\Phi M_max}(t) = \text{const})$, такое возможно только теоретически – при пропорциональном влиянии освещенности и температуры. В реальной системе дрейф BBX при нагреве сопровождается уменьшением максимума мощности (рисунок 1.4), что в случае неверно подобранной частоте шага (критическое значение при $dV_{\Phi M}/V_{\Phi M}$) может привести к реверсу системы из-за уменьшения фактической мощности на фотоэлектрическом модуле, даже в случе движения рабочей точки в сторону экстремума BBX. В связи с этим для обеспечения устойчивости управления необходимо ввыполнение дополнительного условия: $\Delta P_{\Phi M} \ge 0$ – увеличение мощности от шагового изменения напряжения $dV_{\Phi M}$ должно компенсировать потери мощности при дрейфе BBX [84].

Можно записать уравнение дрейфующей BBX, аппроксимированной квадратичной параболой:

$$P_{\Phi M}(V_{\Phi M};t) = a(t) [V_{\Phi M} - V_{\Phi M_{ONT}}(t)]^2 + P_{\Phi M_max}(t),$$

$$P_{\Phi M_max}(t) = P_{\Phi M_max}(t - \Delta t) + \Delta P_{\Phi M_max}(\Delta t);$$

$$V_{\Phi M_ONT}(t) = V_{\Phi M_ONT}(t - \Delta t) + \Delta V_{\Phi M_ONT}(\Delta t);$$

$$a(t) = a(t - \Delta t) + a(\Delta t).$$

На основании этого уравнения можно определить выражение для приращения выходного сигнала. С допущением, что дрейф BBX сопровожается малым искажением формы, т.е. $a(t) >> \Delta a(t)$:

$$\Delta P_{\Phi M} = P_{\Phi M}(V_{\Phi M}; t) - P_{\Phi M}(V_{\Phi M} - \Delta V_{\Phi M}; t - \Delta t),$$

ИЛИ

$$\Delta P_{\Phi M} = 2a(t)\Delta V_{\Phi M} \left[V_{\Phi M} - V_{\Phi M_{\text{ont}}}(t) \right] 2a(t)\Delta V_{\Phi M_{\text{ont}}}(\Delta t) \left[V_{\Phi M} - V_{\Phi M_{\text{ont}}}(t) \right] - a(t) \left[\Delta V_{\Phi M} - \Delta V_{\Phi M_{\text{ont}}}(\Delta t) \right]^2 + \Delta P_{\Phi M_max}(\Delta t).$$
(2.3)

Задавая условия дрейфа ($\Delta V_{\Phi M_{ont}}(\Delta t)$; $\Delta P_{\Phi M_{ont}}(\Delta t)$) можно определить соотношение длительностей шагов и значений единичного изменения $\Delta V_{\Phi M}$, обеспечивающих устойчивую работу экстремального регулятора. Диапазон возможных значений параметра a(t) находится при условии $P_{\Phi M}(V_{\Phi M}, t) = 0$ и изменении $V_{\Phi M}$ от $V_{x,x}$ до $2V_{\Phi M}$ опт.

2.2 Разработка адаптивных алгоритмов управления процессом заряда в фотоэлектрической системе

Недостатками МРРТ-алгоритма ВиН являются колебания мощности, вызываемые «рысканием», характерным для поисковых алгоритмов, а также фиксированное время «восхождения». Уменьшение времени «восхождения» приводит к увеличению амплитуды колебаний, что ведёт к недовыработке мощности. Уменьшение амплитуды колебаний мощности приводит к увеличению времени поиска точки максимальной мощности. Также следует учитывать, что при работе системы наблюдается дрейф BBX (см. рисунок 1.4).

Для решения указанных проблем возможно использование адаптивных алгоритмов, подстраивающихся к харакетру выхода на рабочую точку максимальной мощности.

2.2.1 Алгоритм с перенастройкой поискового шага

Недостатки алгоритма ВиН вытекают из постоянства шага по напряжению. Если обеспечить адаптацию размера шага, можно добиться уменьшения времени поиска точки максимальной мощности и минимизации амплитуды колебаний напряжения около рабочей точки.

Перенастройку заранее заданного поискового шага можно осуществить с помощью введения поправочного коэффициента, характеризующего скорость изменения (приращения) мощности при изменении рабочего напряжения, при текущем значении тока:

$$E = \frac{P_n - P_{n-1}}{V_n - V_{n-1}};$$
(2.3)

$$k = \frac{E}{I_n},\tag{2.4}$$

где P_n – текущее расчетное значение мощности; P_{n-1} – расчетное значение мощности на предыдущем шаге; V_n – текущее значение напряжения; V_{n-1} – значение напряжения на предыдущем шаге; E – скорость приращения мощности от приращения напряжения; I_n – текущее значение силы тока.

BBX фотоэлектрического модуля можно условно разделить на три участка, как показано на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – ВАХ и ВВХ фотоэлектрического модуля с разделением на три характерных участка: 1 – нарастания, 2 – плато, 3 – убывания

Первая часть графика характеризуется постепенным, близким к линейному, нарастанием мощности, при соответствующем повышении напряжения. Второй участок – плато – характеризуется замедлением роста мощности относительно роста напряжения, а после экстремума переходит к уменьшению мощности при Третий сохраняющемся напряжения. участок росте характеризуется стремительным (относительно скорости нарастания) убыванием мощности. Благодаря такому разбиению, становится очевидным влияние поправочного коэффициента – в области плато эталонный шаг уменьшается за счет уменьшения показателя Е, что минимизирует колебания около рабочей точки; в области нарастания линейность показателя Е и соответствующее слабое изменение тока (видно на BBX) оставляют шаг неизменным. Отдельно стоит обратить внимание на поведение поправочного коэффициента в зоне убывания – здесь мощность изменяется быстрее, чем в области нарастания – это приводит к формированию большого поправочного коэффициента и, следовательно, большого шага поиска, возвращающего рабочую точку в зону нарастания, что несколько замедляет выход на точку максимальной мощности.

Блок-схема алгоритма с перенастройкой поискового шага приведена на рисунке 2.6.

Линейность в области нарастания, не изменяющая величину шага, сохраняет для представленного алгоритма проблему большого времени регулирования. Для решения этой проблемы можно организовать дополнительную оценку поправочного коэффициента: если коэффициент не изменяется, а мощность продолжает расти (соответствует области нарастания), вводится дополнительная поправка, увеличивающая шаг.



Рисунок 2.6 – Блок-схема алгоритма ВиН с перенастройкой поискового шага

2.2.2 Алгоритм с предсказывающей адаптацией

Оптимиировать алгоритм ВиН можно с помощью введения предсказывающей адаптации, осуществляющейся за счет исследования модели фотоэлектрической системы.

Исходя из известных зависимостей, приведенных в разд. 2.1.2, можно создать модель фотоэлектрической системы с целью получения предварительной, теоретической BBX для текущих условий, что позволяет

определить примерную рабочую точку, соответствующую точке максимальной мощности на BBX модели. После чего в работу вступает стандартный алгоритм BuH, выводящий и поддерживающий работу системы на реальной точке максимальной мощности. Такой подход минимизирует время регулирования и позволяет уменьшить изначально заданный эталонный шаг по напряжению, тем самым снизив амплитуду колебаний около точки максимальной мощности.

За счет предварительного моделирования достигается высокая гибкость настройки такой системы, например обеспечив модель дополнительными параметрам обратной связи с реальной системой, можно проводить перенастройку поискового шага, минимизируя потери на колебаниях мощности, учитывать изменения окружающей среды, заранее переопределяя вид BBX и положение рабочей точки на ней. Однако такой подход требует наличия датчиков для регистрации уровня дополнительных освещенности И температуры.

Перерасчет опорной точки на модели будет осуществляться всякий раз, когда фиксируется значительное (скачкообразное) изменение температуры или освещенности (например временное затенение облаками). Условие проверки определяется следующим выражением:

$$\Delta T_{\mu_{3M}} \ge \Delta T_{y_{CT}},$$

 $\Delta W_{\mu_{3M}} \ge \Delta W_{y_{CT}},$

где $\Delta T_{\rm изм}$ – измеряемое изменение температуры; $\Delta T_{\rm уст}$ – установочное изменение температуры, при достижении которого срабатывает алгоритм; $\Delta W_{\rm изм}$ – измеряемое изменение освещенности; $\Delta W_{\rm уст}$ – установочное изменение освещенности, при достижении которого срабатывает алгоритм.

Установочные параметры задаются исходя из оценки дрейфа BBX при изменении внешних условий (см. рисунок 1.4).

Построение и настройка модели осуществляется экспертом с учетом конфигурации разрабатываемой системы и геолокационных и климатических условий.

Блок-схема алгоритма с предсказывающей адаптацией приведена на рисунке 2.7.





2.2.3 Алгоритм с настройкой нечетким регулятором

Рассматривая алгоритм с перенастройкой поискового шага, можно заметить, что несимметричность BBX не позволяет обеспечить высокоточную адаптацию в области значений после точки максимума (зона убывания на рисунке 2.8). Повысить эффективность адаптации шагового алгоритма можно с помощью введения нечеткого регулирования, учитывающего дополнительно скорость изменения приращения мощности от приращения напряжения.

52

На рисунке 2.9 приведена блок-схема такого алгоритма.



Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритма ВиН с настройкой нечетким регулятором

Для задачи адаптации управления в фотоэлектрической системе с помощью нечеткой логики предлагается использовать отношение изменения мощности солнечной батареи к изменению напряжения солнечной батареи (E), а также характер изменения E(dE):

$$E(k) = \frac{P_{SB}(k) - P_{SB}(k-1)}{U_{sb}(k) - U_{sb}(k-1)};$$
(2.5)

$$dE(k) = E(k) - E(k-1).$$
(2.6)

Как уже было рассмотрено выше, логика этого решения связана с видом ВВХ и характером изменения взаимосвязанных регулируемых параметров напряжения и мощности.

В качестве выходной переменной блока нечёткой логики выступает масштабирующий коэффициент шага МРРТ-алгоритма, далее обозначемый *D*.

Зависимость значения выходной переменной от входных лингвистических переменных определяется набором правил, приведённым в таблице 2.1.

$E \downarrow \setminus dE \rightarrow$	low	middle	high
Low	low	low	low
midL	midL	midL	low
midH	high	midH	midL
High	high	midH	midL

Таблица 2.1 – Правила нечёткого контроллера

В приведенной таблице обозначения *low, midL, middle, midH, high* представляют собой лингвистическое описание некоторых нечетких множеств, значениям которых могут соответствовать соответствующие переменные. Расшифровка обозначений:

- *low* низкий, множество наименьшних принимаемых значений переменных;
- *middle* средний, множество средних по величине значений, которые могут принять переменные;
- *high* высокий, множество наибольших по величине принимаемых значений;
- *midL* средне-низкий, множество значений принимаемых переменными, в пределах между наименьшими и средними;
- *midH* средне-высокий, множество значений принимаемых переменными, в пределах между наибольшими и средними.

Выбор соответствий осуществляется на основе оценки возможного поведения рабочей точки на BBX (см. рисунок 2.5). Например: в «зоне нарастания» показатель E, с учетом формулы (2.6), будет принимать некоторые значения множество которых можно обозначит за *midH*; в «зоне плато» очевидно уменьшение показателя E, множество его значений на этом участке можно обозначит за *midL*; около точки максимальной мощности происходит смена знака показателя E, а в самой точке показатель E=0 – этим значениям будет соответствовать некоторое множество *low*; в «зоне убывания» значения показателя E будут самыми большими, что вытекает из вида BBX и формулы (2.6), это множество можно обозначить за *high*. Теперь рассмотрим второй

показатель – *dE*. Эта характеристика может принимать значения, относящиеся к множеству малых, средних или больших величин, соответственно обозначеных low, middle и high. Исходя из формулы (2.7) значение dE будет велико (high), когда показатель Е значительно изменится за иттерацию, т.е. возрастет скорость изменения мощности при изменениии напряжения, чему соответствует большое значение шага. Исходя из принципа работы алгоритма ВиН дальнейший рост шага приведет только к дополнительным колебаниям. Ввиду этого при значении dE_{\star} high, масштабирующий показателя соответствующего множеству коэффициент на выходе нечеткого контроллера должен быть малым (low) или средне-малым (*midL*), в зависимости от позиции рабочей точки на BBX, что отражено в крайнем правом столбце таблицы 2.1: при $dE \in high$ и $E \in low$ или E \in midL, D \in low, при dE \in high и E \in midH или E \in high, D \in midL. Если dE \in low, то можно говорить о малом изменении параметра Е: в зависимости от расположения рабочей точки это сигнализирует либо о необходимости значительно увеличить шаг (зоны нарастания и убывания), чтобы ускорить выход на точку максимальной мощности, либо о необходимости уменьшить шаг (зона плато), чтобы зафиксироваться на точке максимальной мощности и нейтрализовать колебания. Это показано в крайнем левом столбце. Наконец, при $dE \in middle$, т.е. при среднем изменении показателя E можно использовать масштабирующий коэффициент, меньший по величине, чем при медленном изменении Е, это сгладит выход на точку максимальной мощности.

Для задания степени принадлежности выходных и входных данных к соответствующему нечеткому множеству используются функции принадлежности, описывающие требуемые зависимости. На рисунке 2.10 приведены функции входных и выходной переменных разрабатываемого нечёткого контроллера.



Рисунок 2.10 – Функции принадлежности переменных нечёткого контроллера

На основе полученного базиса нечеткого регулятора возможно построение управляющего устройства фотоэлектрической адаптивного системы, поддерживающего функцию максимальной поиска точки мощности С автоподстройкой разрешает проблемы большого шага, что времени регулирования и колебаний мощности при работе алгоритма в оптимальной рабочей точке. Нечеткое регулирование обеспечивает высокую гибкость в подстройке алгоритма к текущим условиям и требует меньше вычислений, чем алгоритм с адаптацией посредством модели.

2.2.4 Алгоритм настройки нечеткого регулятора

Дополнительно улучшить управляющую систему с нечетким регулированием можно с помощью оптимального конфигурирования базы нечетких правил и (или) функций принадлежности. База нечетких правил и функции принадлежности формируются с помощью эксперта. Однако, поскольку человек-эксперт может упустить какие-то взаимосвязи в сложной системе, предложенные таким образом решения бывают не оптимальными.

При формировании базы нечетких правил и функций принадлежности для фотоэлектрической системы эксперт отталкивается от оценки поведения рабочей точки на BBX. В данной работе предлагается дополнить экспертную оценку определением энергетических параметров ФЭУ в диапазоне регулирования и условием дрейфа экстремума BBX.

1. Диапазон регулирования для ФЭУ определяется из условий эксплуатации (температура, уровень освещенности) и технических характеристик ФМ (напряжение холостого хода, ток короткого замыкания).

Так, для ФЭУ, работающей в температурном диапазоне -30°–30° С и диапазоне освещенности 200–900 кВт/м², с ФМ обладающим характеристиками: ток короткого замыкания – $I_{\kappa,3} = 6,14$ А, напряжение холостого хода – $U_{x,x}= 24$ В, экспериментально получен диапазон регулирования: 13–31,5 В. Минимальное значение напряжения оптимальной точки соответствует слабой освещенности (200 кВт/м²) и высокой температуре окружающей среды (30 °C), максимальное значение напряжения оптимальной точке соответствует солнечной погоде (освещенность 900 кВт/м²) и низкой температуре (-30 °C). Графически полученные характеристики представлены на рисунке 2.11.

Таким образом, определив диапазон регулирования по напряжению, можно скорректировать функции принадлежности для нечеткого регулятора, описывая поведение BBX в заданном диапазоне.



Рисунок 2.11 – К определению диапазона регулирования напряжения ФЭУ

2. Условие дрейфа BBX было описано ранее (см. стр.45), исходя из этих выкладок, можно резюмировать, что учет дрейфа необходим для устойчивой работы регулятора в реальных условиях эксплуатации. По формуле (2.3), задавая условия дрейфа ($\Delta V_{\Phi M_{ont}}(\Delta t)$; $\Delta P_{\Phi M_{ont}}(\Delta t)$) можно определить соотношение длительностей шагов и значений единичного изменения $\Delta V_{\Phi M}$, обеспечивающих устойчивую работу экстремального регулятора.

Условие дрейфа BBX, таким образом, накладывает ограничение на величину шага по напряжению. Это позволят сформировать новую экспертную оценку для формирования функции принадлежности выходной переменной нечеткого контроллера, отвечающей за формирование шага по напряжению.

Таким образом, предложенный алгоритм настройки нечеткого регулятора сводится к следующей последовательности:

1. Производится анализ семейства BBX фотоэлектрической системы при лучших и худших условиях эксплуатации, определяются характеристические параметры $I_{\kappa,3}$, $U_{x,x}$, I_{ont} , U_{ont} для этих BBX.

2. Производится оценка диапазона регулирования исходя из полученных в п.1 результатов.

3. Проводится оценка дрейфа BBX по формуле (2.3), определяется допустимый размер поискового шага экстремального регулятора.

4. Задаются лингвистические переменные входа и выхода.

5. Формируются функции принадлежности входных и выходной переменных с учетом полученных диапазона регулирования и условия дрейфа.

6. Формулируются нечеткие правила взаимодействия переменных.

Применение такого алгоритма настройки нечеткого регулятора позволит сократить число или длину шагов поискового алгоритма, что уменьшит время поиска или эффект «рысканья», соответственно. Также увеличится надежность такой системы за счет устойивости регулятора к дрейфу BBX.

2.3 Выводы

Полученные в ходе исследований математические модели элементов фотоэлектрической системы учитывают большой спектр моделируемых условий: температуру, освещенность, угол падения лучей, технические характеристики фотоэлементов, а также обеспечивают требуемые функции управления: контроль заряда на аккумуляторах, поддержку режима экстремального регулирования мощности.

Выявлены недостатки стандартного алгоритма экстремального регулирования мощности, заключающиеся в сравнительно большом времени регулирования и колебаниях мощности при работе в оптимальной точке BBX. Также установлено, что эти недостатки вытекают из постоянства шага поискового алгоритма BuH, при этом увеличение шага приводит не только к уменьшению времени регулирования, но также и к увеличению амплитуды колебаний мощности, а уменьшение шага приводит к росту времени регулирования, уменьшая при этом колебания мощности. В связи с этим предложены новые улучшенные алгоритмы поиска точки максимальной мощности, обеспечивающие адаптацию шага.

Разработанные в ходе исследований алгоритмы управления фотоэлектрической системы позволяют разрешить проблемы стандартных алгоритмов путем адаптации поискового шага к текущим условиям работы.

Алгоритм экстремального регулирования с перенастройкой поискового шага предлагает обеспечить итерационную подстройку размера шага путем

58

внедрения поправочного коэффициента $k=E/I_k$, где $E=(P_k-P_{k-1})/(V_k-V_{k-1})$, характеризующего поведение рабочей точки алгоритма на BBX фотоэлектрического модуля. Такой подход позволяет сохранить преимущество алгоритма BuH в виде малых вычислительных нагрузок и дополнительно улучшить качество поиска точки максимальной мощности.

Алгоритм экстремального регулирования с предсказывающей адаптацией предлагает обеспечить предварительный расчет и оценку BBX на модели, что позволяет задать параметры рабочей точки близко к реальной точке максимальной мощности, после чего начинается отработка стандартного алгоритма BuH. Такой подход минимизирует время регулирования и обладает высокой степенью гибкости и универсальности.

Алгоритм экстремального регулирования С настройкой нечетким регулятором предлагает улучшение качества управления за счет введения в управляющую структуру блока нечеткой логики. За счет возможностей нечеткого регулирования появляется возможность гибкой подстройки шага поискового алгоритма ВиН к текущим условиям. В качестве оценочных параметров для формирования требуемого размера шага используется следующие показатели: $E = (P_k - P_{k-1})/(V_k - V_{k-1})$ – характеризует скорость изменения мощности при изменении напряжения на вольт-ваттной характеристике; $dE_k = E_k - E_{k-1}$ характеризует изменение показателя Е_k. Указанные параметры связаны с формированием размера шага алгоритма посредством вышеприведенных набора нечетких правил и функций принадлежности. Этот подход требует меньше вычислительных мощностей, чем метод с предсказывающей адаптацией, но также обладает гибкостью подстройки системы к тем или иным условиям. Как и в методом предсказывающей адаптации, алгоритм случае с с нечетким регулированием требует определенных знаний и опыта для реализации и настройки.

Алгоритм настройки нечеткого регулятора улучшает предложенный выше алгоритм с настройкой нечетким регулятором за счет экспертной оценки диапазона регулирования и учета дрейфа BBX.

59

Подводя итог, можно заключить, что результаты исследований, изложенных в данной главе, заключаются в нижеследующем:

1. Разработаны математические модели основных элементов фотоэлектрических систем: фотоэлектрического модель модуля, модель контроллера заряда. обладающие высокой степенью достоверности И универсальности.

2. Проработана концепция адаптивных алгоритмов экстремального регулирования фотоэлектрических систем. Такие алгоритмы позволяют минимизировать потери энергии от недоиспользования возможностей ФЭУ.

3. Разработан алгоритм с перенастройкой поискового шага, обладающий сравнительной простотой реализации и нетребовательностью к вычислительным ресурсам.

4. Разработан алгоритм с предсказывающей адаптацией, обладающий большой универсальностью, но требующий дополнительного оборудования и значительных вычислительных мощностей.

5. Разработан алгоритм с настройкой нечетким регулятором, обладающий хорошей гибкостью настроек и меньшими требованиями к вычислениям, чем метод с предсказывающей адаптацией.

Результаты научной работы, полученные в ходе диссертационного исследования, представленные в данной главе, отражены в работах автора [53, 57, 59, 60, 62, 64, 66].

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТБОРА ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

3.1 Моделирование фотоэлектрической системы

При разработке фотоэлектрических систем большую эффективность показывает предварительное моделирование, позволяющее на этапе исследования С проектирования проводить таких систем. помошью моделирования можно изучить эффективность фотоэлектрической системы для конкретных условий, чтобы дать предварительную оценку целесообразности применения этой технологии. Также появляется возможность рассмотреть работу фотоэлектрической системы при различных конфигурациях оборудования, промоделировать технологические решения для повышения энергетической К эффективности. преимуществам компьютерного моделирования перед экспериментом можно отнести быстроту отработки (масштабирование времени), экономичность и гибкость (возможность легко реконфигурировать исследуемую систему).

В работе предложены ланной следующие модели элементов фотоэлектрической системы: фотоэлектрический модуль, контроллер заряда, подключаемая нагрузка, аккумуляторная батарея. Так как указанные элементы являются типовыми ДЛЯ фотоэлектрических установок, ΜΟΓΥΤ быть ОНИ использованы для построения систем различных топологий.

3.1.1 Модель фотоэлектрического модуля

По полученной в предыдущей главе математической модели (2.2), в среде MATLAB Simulink строится компьютерная модель фотоэлемента, приведенная на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Модель фотоэлемента

Блоки «I_dn calc» и «K_dT calc» представляют собой подсистемы для расчета номинального диодного тока и температурного коэффициента соответственно. Наполнение блоков «I_dn calc» и «K_dT calc» представлено на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Модели блоков «I_dn calc» и «K_dT calc»

62

Разработанная модель позволяет исследовать влияние различных факторов (температуры, освещенности, угла падения лучей, деградации фотоэлементов) на характеристики фотоэлемента и получать наглядное представление о работе фотоэлемента за счет построения графиков ВАХ и ВВХ.

Представленная модель позволяет:

- настраивать внутренние характеристики фотоэлементов: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, температурный коэффициент по току;
- моделировать условия окружающей среды, задавая их статическими или динамически изменяющимися: угол падения солнечных лучей, уровень освещенности, температура;
- получать графики ВАХ и ВВХ.

На рисунке 3.3. приведены ВАХ и ВВХ фотоэлемента при следующих параметрах модели: напряжение холостого хода $U_{x,x} = 0,55$ В, ток короткого замыкания $I_{\kappa,3} = 5,5$ А, уровень освещённости Q = 1000 кВт/м², температура фотоэлемента T = 298 К, угол падения солнечных лучей $\alpha = 1,5708$ рад.



Рисунок 3.3 – ВАХ и ВВХ фотоэлемента

На рисунке 3.4. приведены ВАХ и ВВХ фотоэлемента при различном уровне освещенности (синяя линия – W=1, зелёная – W=0.75, красная – W=0.5). При уменьшении освещенности падает количество вырабатываемой мощности, что говорит об адекватности созданной модели.



Рисунок 3.4. – ВАХ и ВВХ фотоэлемента при различном уровне освещенности

На рисунке 3.5. представлены ВАХ и ВВХ фотоэлемента при различных температурах (синяя линия – при 30 °C, зелёная – при 40 °C, красная – при 50 °C). Из полученного графика видно, что чем меньше температура фотоэлемента, тем выше вырабатываемая мощность – это соответствует свойствам физики фотоэлементов, что говорит об адекватности модели.



Рисунок 3.5 – ВАХ и ВВХ фотоэлемента при различных температурах

Фотоэлектрический модуль представляет собой последовательнопараллельное соединение фотоэлементов, в результате такого соединения изменяются выходные характеристики модуля. Последовательное соединение увеличивает выходное напряжение пропорционально количеству включенных последовательно элементов, а параллельное включение пропорционально увеличивает выходной ток. На рисунке 3.6 приведена модель фотоэлектрического модуля, состоящего из шести фотоэлементов, включённых последовательно-параллельно. ВАХ модуля приведена на рисунке 3.7.



Рисунок 3.6 – Модель фотоэлектрического модуля, состоящего из шести фотоэлементов



Рисунок 3.7 – ВАХ фотоэлектрического модуля

По ВАХ фотоэлектрического модуля (рисунок 3.7) видно, что выходное напряжение увеличилось в 3 раза (три последовательно подключенных фотоэлемента), а выходной ток увеличился в 2 раза (два последовательно включенных соединения фотоэлементов), по сравнению с одиночным фотоэлементом (3.3).

Для удобства моделирования можно заметить трудоёмкое включение дополнительных фотоэлементов вводом множителей, соответствующих последовательно-параллельному подключению элементов модуля, но при этом теряется возможность промоделировать условие частичной затененности.

Для моделирования динамических характеристик компьютерная модель, приведенная на рисунке 3.1, модернизируется с помощью элементов библиотеки SimPowerSystems. Модель фотоэлектрического модуля, содержащая силовые элементы электрической цепи представлена на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Динамическая модель фотоэлектрического модуля

На основе приведенной динамической модели получена реакция системы на ступенчатое изменение напряжения в виде изменения диодного тока и выходного тока фотоэлемента (см. формулу (2.1)). Полученные графики приведены на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Переходные процессы при ступенчатом изменении напряжения: (а) - изменение напряжения; (б) – реакция диодного тока; (в) – реакция выходного тока

3.1.2 Моделирование МРРТ-контроллера

Компьютерная модель контроллера заряда с функцией МРРТ, разработанная в среде Matlab/Simulink, представлена на рисунке 3.10.

Представленная модель схематически разделена на основные блоки: импульсный преобразователь энергии и управляющее устройство. Управляющее устройство отвечает за формирование требуемых воздействий, обеспечивающих правильную и эффективную работу контроллера.



Рисунок 3.10 – Модель контроллера заряда

Модель контроллера содержит шесть клемм (на рисунке 3.10 – шестиугольники, пронумерованные от 1 до 6), обеспечивающих связь с внешними устройствами. Так, с помощью клемм 1 и 2 к контроллеру подключаются фотоэлектрические модули. С помощью клемм 3 и 4 к системе подключаются аккумуляторные батареи. Клеммы 5 и 6 являются коммутирующими клеммами нагрузки.

На представленной на рисунке 3.10 модели импульсный преобразователь энергии включает в себя входную и выходную цепи. С помощью входной цепи (на рисунке 3.10 обозначена «1» и выделена синей рамкой) формируется выходной ток от массива фотоэлектрических модулей. С помощью выходной цепи (на рисунке 3.10 обозначена «3» и выделена красной рамкой) формируется зарядный ток аккумулятора и ток питания нагрузки.

Преобразователь обладает управляющим устройством (на рисунке 3.10 обозначен «2» и выделен зелёной рамкой). Модель управляющего устройства состоит из пяти функциональных блоков (подсистем), выполняющих требуемые процедуры управления.

С помощью блока «I_in» осуществляется ручной выбор режима работы контроллера. Контроллер поддерживает два режима: режим постоянного напряжения, с заданным положением рабочей точки на BBX, и режим

экстремального регулирования, с поиском положения рабочей точки, соответствующего максимальной мощности.

Модель блока «I_in» представлена на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 - Блок «I_in»

Блок «I_in» является переключателем, срабатывающим от команды (входной MPPT/Set), при оператора сигнал ЭТОМ команда «MPPT» инициализирует работу системы в режиме экстремального регулирования получать максимум мощности, что позволяет энергии ОТ массива фотоэлектрических модулей. Команда «Set» инициализирует режим работы системы с заданной, не меняющейся рабочей точкой ВВХ, что повышает надежность системы при работе в условиях резкого перепада температур и освещенности.

В случае инициализации режима экстремального регулирования в работу вступает блок «MPPT algorithm», непосредственно осуществляющий поиск точки максимальной мощности по алгоритму ВиН.

Модель блока «MPPT algorithm» приведена на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Блок «MPPT algorithm»

Как только на вход «Моde» данного блока приходит сигнал от блока «I_in», инициализируется режим экстремального регулирования путем перевода ключа переключателя *S1* в верхнее положение. Входные сигналы блока «MPPT algorithm»: ток и напряжение фотоэлектрических модулей. Блок рассчитывает текущую мощность и сохраняет в памяти. Сравнивая значения мощностей P_n и P_old , блок определяет знак приращения по напряжению фотоэлектрического модуля и, в случае если $P_old > P_n$, переключатель *S2* меняет знак приращения *dU*. На выход блока подается новое значение для напряжения массива фотоэлектрических модулей, приближенное к оптимальному (обеспечивающему максимум мощности).

Блок «I_out» служит для формирования тока в выходной цепи импульсного преобразователя. Модель блока приведена на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 - Блок «I_out»

Здесь выходной ток контроллера заряда определяется, как $I_{\rm Bbix} = P_{\rm Bix}/U_{\rm Bbix}$, где $U_{\rm Bbix} = U_{\rm ab}, P_{\rm Bix} = I_{\rm Bix} \cdot U_{\rm Bix}$.

Ток заряда аккумуляторной батареи ограничен установочным значением $I_{flag}=0,1 \cdot C_{ab}$ с помощью элемента SD.

Управляющее устройство поддерживает заряд аккумуляторной батареи в двух режимах: заряд максимальным током и заряд падающим током. Режим заряда АБ задается блоком «Key Switcher», представленным на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Блок «Key Switcher»

Если напряжение аккумулятора ниже максимально допустимого уровня, то блок «Key Switcher» формирует на выходе *S1* единицу, а на выходе *S2* ноль. Выходные сигналы с блока «Key Switcher» поступают на ключи «S1» и «S2» (см. рисунок 3.10) соответственно. В результате происходит питание аккумулятора от источника максимального тока.

Если напряжение на аккумуляторе достигло максимального уровня, сигналы на выходе блока «Key Switcher» изменяются, что, в свою очередь, приводит к включению источника падающего тока в выходной цепи.

На рисунке 3.15 приведена модель блока «Load Switch», отвечающего за коммутацию нагрузки.



Рисунок 3.15 – Блок «Load Switch»

В случае если напряжение АБ достигает отметки *U_ab_min*, для предотвращения глубокого разряда, блок «Load Switch» формирует на выходе логический ноль, что приводит к отключению нагрузки. Когда напряжение АБ возвращается в рабочий диапазон, блок производит коммутацию нагрузки.

Исходя из вышеизложенного, разработанная модель контроллера заряда фотоэлектрической установки обладает следующими функциями:

- Поддерживает режим работы с постоянным, заданным напряжением на входной цепи импульсного преобразователя (режим постоянного напряжения).
- Поддерживает режим работы с изменяющимся напряжением на входной цепи импульсного преобразователя для поиска точки максимальной мощности (МРРТ-режим или режим экстремального регулирования).
- Управляет зарядом аккумуляторов: поддерживает режимы максимального и падающего тока.
- Включает и отключает нагрузку с целью предотвращения глубокого разряда аккумуляторов.

3.1.3 Моделирование дополнительных элементов фотоэлектрической системы

Модель аккумуляторной батареи

В качестве модели аккумуляторной батареи можно использовать элемент «Battery» из стандартной библиотеки Simulink/SimPowerSystems.

Изображение элемента и его параметры приведены на рисунке 3.16.

Элемент «Battery» обладает широкими возможностями настройки и подходит для построения моделей автономных систем.
 AB2 Battery type Lead-Add Lead-Add Nominal Voltag Lithium-Ion Nickel-Cadnium Nickel-Attal+Hydride Rated Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Use parameters based on Battery type and nominal values Maximum Capacity (Ah) Internal Resistance (Ohms)
--

70

Рисунок 3.16 – Изображения элемента «Battery» и его параметры

Моделирование нагрузки

Для разработки адекватной модели нагрузки необходимо определиться с базой электротехнических средств, входящих нагрузку. Например, В 3 фотоэлектрическая обеспечивать кВт·ч/сутки установка должна электроэнергии для частного дома. Задаваясь известной мощностью бытовых приборов и продолжительностью их эксплуатации, можно получить суточный график нагрузки. В таблице 3.1 приведён список потребителей электроэнергии, а также потребляемая ими энергия за неделю.

Таблица 3.1 – Потребители электроэнергии частного дома

Нагрузка	Мощность	Кол-во	Всего	Время работы, ч/нед.	Вт·ч/нед.	
Ноутбук	100	1	100	21	2100	
Телевизор	100	1	100	28	2800	
СВЧ-печь	400	1	400	1,05	420	
Роутер+3D модем	5	1	5	168	840	
Лампы	18	8	144	35	5040	
Зарядное устройство	10	6	60	14	840	
Пылесос	700	1	700	2,8	1960	
ПК	200	1	200	35	7000	

Согласно таблице 3.1, потребность в электричестве составляет 21000 Вт·ч/нед. или 3000 Вт·ч/сут.

На рисунке 3.17 приведена модель нагрузки, включающая в себя типовую нагрузку, представленную в таблице 3.1.



Рисунок 3.17 – Модель нагрузки

Результаты моделирования в виде диаграммы суточного потребления мощности представлены на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Временная диаграмма потребления мощности

Диаграмма суточного потребления мощности полностью соответствует моделируемым условиям, приведённым в таблице 3.2.

Цогругано	Мощность,	Кол-во,	Всего,	Время работы,	Потребление,	
пагрузка	Вт	ШТ.	Вт	ч/сут.	Вт·ч/сут.	
Ноутбук	100	1	100	3	300	
Телевизор	100	1	100	4	400	
СВЧ-печь	400	1	400	0,15	60	
Роутер+3D-модем	5	1	5	24	120	
Лампы	18	8	144	5	720	
Зарядное устройство	10	6	60	2	120	
Пылесос	700	1	700	0,4	280	
ПК	200	1	200	5	1000	

Таблица 3.2 – Суточное потребление мощности

3.1.4 Модель фотоэлектрической установки

С помощью разработанных моделей элементов фотоэлектрической установки можно синтезировать цельную модель системы.

На рисунке 3.19 приведена компьютерная модель солнечной фотоэлектрической установки, собранная из разработанных ранее элементов.



Рисунок 3.19 – Модель фотоэлектрической установки

На основе разработанной модели можно осуществлять компьютерное моделирование процессов в фотоэлектрической установке при различных условиях окружающей среды, разнообразных конфигурациях оборудования и получать необходимую информацию о функционировании системы [38].

Тестирование модели проведено при следующих параметрах системы:

фотоэлектрический модуль: напряжение холостого хода U_{x,x} = 36,8 В, ток короткого замыкания I_{к,3} = 8,99 А, максимальная генерируемая мощность P_{max} = 250 Вт;

- аккумуляторная батарея: ёмкость $C_{ab} = 200 \text{ A} \cdot \text{ч}$, номинальное напряжение $U_{ab} = 12 \text{ B}$; максимальное напряжение $U_{ab_max} = 14,2 \text{ B}$;
- мощность, потребляемая нагрузкой, изменяется в течение суток по приведённому на рисунке 3.16 графику;
- освещённость фотоэлектрических модулей изменяется в течение суток по приведённому на рисунке 3.20 графику.



Рисунок 3.20 – Изменение уровня освещённости в течение суток

Результаты тестирования модели представлены на рисунке 3.21.

Как видно из рисунка 3.21, модель полностью соответствует своим заявленным возможностям: осуществляет зарядку АБ, обеспечивает поиск точки максимальной мощности, учитывает изменения освещённости и нагрузки.

Для оценки эффективности применения МРРТ-алгоритма было рассмотрено два режима работы модели контроллера: режим экстремального регулирования мощности, режим постоянного напряжения. В первом случае контроллер выполняет поиск точки максимальной мощности путём изменения напряжения в контуре фотоэлектрического модуля и получения оптимальной пары ток+напряжение. Во втором случае контроллер поддерживает заданное напряжение. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.22. По рисунку очевидна недовыработка мощности в случае регулирования по заданному напряжению (зелёный график). Применение МРРТ-режима (синий график) увеличивает энергетическую эффективность примерно на 12 %, так как площадь под синим графиком равна 2250 Вт·ч, площадь под зелёным графиком равна 1965 Вт·ч.



Рисунок 3.21 – Результаты моделирования



Рисунок 3.22 – К оценке эффективности МРРТ-режима

3.2 Моделирование фотоэлектрической системы с различными адаптивными алгоритмами экстремального регулирования

Дополнительно увеличить энергетическую эффективность от МРРТ-режима регулирования можно путем улучшения алгоритма ВиН за счет различных вариантов адаптации, изложенных в главе 2, разд. 2.2. Для исследования и оценки эффективности этих решений также используются возможности компьютерного моделирования.

Для моделирования процесса экстремального регулирования мощности при различных алгоритмах управления предлагается использовать следующие особые настройки модели: постоянную освещенность, постоянную температуру, сокращенное время моделирования, отключенную нагрузку. Такие параметры модели обеспечат удобное представление о работе исследуемых алгоритмов и наглядность их сравнительных характеристик.

Общие настройки модели фотоэлектрической системы для проведения исследований эффективности адаптивных алгоритмов следующие:

- фотоэлектрический модуль с напряжением холостого хода $U_{xx} = 24$ B, и током короткого замыкания $I_{\kappa,3} = 6,14$ A;
- нормальные условия: температура 25 °C, уровень солнечной инсоляции Q = 1000 кВт/м², угол падения лучей $\alpha = 90^{\circ}$;
- шаг поискового алгоритма 0,35 В;
- нагрузка потребителей отключена;
- фотоэлектрический модуль заряжает аккумулятор с номинальным напряжением U_{ab} = 12 B, разряжённый до 80 %.

3.2.1 Модель системы с алгоритмом с перенастройкой поискового шага

На основе приведенной в разд. 2.2.1 математической модели алгоритма ВиН с перенастройкой поискового шага можно усовершенствовать разработанную в разд. 3.1.2 структуру управляющего устройства – блок «MPPT-algorithm» (см. рисунок 3.12). Компьютерная модель улучшенного устройства с адаптивным алгоритмом приведена на рисунке 3.23.



Рисунок 3.23 – Блок «MPPT-algorithm» с перенастройкой поискового шага

Как и предложено в разд. 2.2.1, здесь выполняется расчет поправочного коэффициента, учитывающего скорость изменения мощности и позицию рабочей точки на BBX.

После проведения сравнительного моделирования двух систем: с обычным алгоритмом ВиН и алгоритмом с перенастройкой шага – получены приведенные на рисунке 3.24 результаты.



Рисунок 3.24 – Работа алгоритмов поиска точки максимальной мощности (синий – обычный алгоритм ВиН, зеленый – алгоритм ВиН с перенастройкой поискового шага)

Как видно из рисунка 3.24, использование адаптивного алгоритма позволяет уменьшить время поиска точки максимальной мощности и нейтрализовать колебания мощности при работе алгоритма в экстремуме BBX.

79

Работа алгоритма с перенастройкой поискового шага зависит от размера исходного шага. На рисунке 3.25 приводится сравнительный график алгоритма с перенастройкой поискового шага при различных значениях исходного шага.



Рисунок 3.25 – Графики работы алгоритма ВиН с перенастройкой поискового шага при различных значениях исходного шага

Из представленных графиков видно, что взятие за основу большого шага приводит к значительным колебаниям около рабочей точки, в тоже время слишком маленький шаг приведет к увеличению времени поиска рабочей точки. В связи с этим можно сделать вывод, что для фотоэлектрических систем определенной конфигурации существует некоторый оптимальный эталонный шаг, обеспечивающий лучшие показатели.

3.2.2 Модель системы с алгоритмом с предсказывающей адаптацией

Для реализации алгоритма с предсказывающей адаптацией используются рассмотренные в разд. 2.2.2 идеи: предварительный расчет BBX на модели, что позволяет инициализировать рабочую точку алгоритма в непосредственной близости от точки максимальной мощности, с точностью до погрешности моделирования.

На рисунке 3.26 приведена структура блока «MPPT-algorithm» с предсказывающей адаптацией.



Рисунок 3.26 – Блок «MPPT-algorithm» с предсказыающей адаптацией

Дополнительный элемент «Model» включает в себя математическую модель для получения стартовой позиции рабочей точки на BBX, соответствующей точке максимальной мощности прогностической модели.

Результаты сравнительного моделирования алгоритма с предсказыающей адаптацией и обычного алгоритма ВиН приведены на рисунке 3.27.



Рисунок 3.27 – Работа алгоритмов поиска точки максимальной мощности (синий – обычный алгоритм ВиН, бирюзовый – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией)

Из представленных графиков видно, что определение стартовой позиции для рабочей точки алгоритма с помощью предсказывающей адаптации позволяет минимизировать время поиска точки максимальной мощности, а также использовать в алгоритме ВиН меньший по размеру шаг, что значительно уменьшает колебания мощности.

3.2.3 Модель системы с алгоритмом с настройкой нечетким регулятором

На основе изложенной в разд. 2.2.3 информации о нечетком регулировании возможно создание компьютерной модели управляющего устройства фотоэлектрической системы, поддерживающей режим экстремального регулирования мощности с настройкой нечетким регулятором. Структурная схема такого блока приведена на рисунке 3.28.

Блок Fuzzy Logic Controller выполняет функции нечеткого регулирования, со структурой настройки, приведенной на рисунке 3.29. Согласно изложенной в разд. 2.2.3 логике функционирования, моделируемый нечеткий регулятор обладает набором нечетких правил, приведененном на рисунке 3.30, и набором функций принадлежности, приведенным на рисунках 3.31 – 3.33.



Рисунок 3.28 – Блок «MPPT-algorithm» с настройкой нечетким регулятором

В представленном блоке «MPPT-algorithm» с настройкой нечетким регулятором осуществляется перенастройка шага алгоритма ВиН посредством блока контроллера с нечеткой логикой – Fuzzy Logic Controller (FLC). На вход блока FLC подаются определенные в разд. 2.2.3 входные переменные: скорость изменения мощности при изменении напряжения *E* и характер измненения этой величины *CE*, соответственно определяемые по ранее предложенным формулам:

$$E(k) = \frac{P_{SB}(k) - P_{SB}(k-1)}{U_{sb}(k) - U_{sb}(k-1)}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1).$$

Выходной сигнал блока FLC – переменная *D* – определяет оптимальный при текующих условиях размер шага. Зависимость выходной величины от входных переменных определяется настройками блока FLC: набором нечетких правил и функциями принадлежности.



Рисунок 3.29 - Структура и характеристики модели нечеткого регулятора

Нечеткий регулятор (блок FLC) обладает следующими характеристиками:

- тип системы: мамдани;
- реализация логической операции «И»: минимум;
- реализация логической операции «Или»: умножение;
- реализация импликации: минимум;
- реализация агрегации: максимум;
- метод дефаззификации: центр тяжести.

Структура блока FLC включает две входные перменные и одну выходную перменную, описываемые соответствующими функциями принадлежности, а также набор нечетких правил, регулирующий логику нечеткого контроллера.



Рисунок 3.30 – Список правил нечеткого регулятора

Набор правил нечеткого регулятора необходим для определения взаимосвязей и соответствий между принадлежностью выходной величины к одному из нечетких множеств, в зависимости от принадлежности к собственным множествам входных величин. Например, выделенное на рисунке 3.30 правило 12 определяется так: если входная переменная Е принадлежит своему нечеткому множеству *middleL* и входная переменная *CE* принадлежит своему нечеткому множеству high, то выходная переменная D принадлежит своему нечеткому множеству *low*. На практике это значит следующее: если приращение мощности при изменении напряжения на текущее значение шага (переменная E) ниже среднего и при этом приращение мощности на текущем шаге значительно выше, на предыдущем (переменная *CE*), то следует задавать чем маленький масштабирующий коэффициент шага алгоритма.

Множества значений, принимаемых входными и выходной пременными нечеткого регулятора, определяются функциями принадлежности.



Рисунок 3.31 – Функции принадлежности входной переменной Е

Значения, принимаемые входной переменной *E*, могут принадлежать одному из четырех нечетких множеств:

- *low* множество наименьших возможных значений переменной *E*, описывается трапециевидной функцией, с пересеченим множества *middleL*;
- *middleL* множество нижесредних возможных значений переменной *E*, описывается треугольной функцией принадлежности, с пересечением множеств *low* и *middleH*;
- *middleH* множество вышесредних возможных значений переменной *E*, описывается треугольной функцией, пересекается с множествами *middleL* и *high*;
- high множество наибольших возможных значений переменной *E*, описывается трапециевидной функцией, имеет пересечение с множеством *middleH*.



Рисунок 3.32 – Функции принадлежности входной переменной СЕ

Значения, принимаемые входной переменной *CE*, могут принадлежать одному из трех нечетких множеств:

- *low* множество наименьших возможных значений переменной *CE*, описывается трапециевидной функцией, с пересечением множества *middle*;
- *middle* множество средневеликих возможных значений переменной *CE*, описывается треугольной функцией принадлежности, с пересечением множеств *low* и *high*;

high – множество наибольших возможных значений переменной *CE*, описывается трапециевидной функцией, имеет пересечение с множеством *middle*.



Рисунок 3.33 – Функция принадлежности выходной переменной D

Значения, принимаемые выходной переменной *D*, могут принадлежать одному из четырех нечетких множеств:

- *low* множество наименьших возможных значений переменной *D*, описывается трапециевидной функцией, с пересечением множества *middleL*;
- *middleL* множество нижесредних возможных значений переменной *D*, описывается треугольной функцией принадлежности, с пересечением множеств *low* и *middleH*;
- *middleH* множество вышесредних возможных значений переменной D, описывается треугольной функцией, пересекается с множествами *middleL* и *high*;
- *high* множество наибольших возможных значений переменной *D*, описывается трапециевидной функцией, имеет пересечение с множеством *middleH*.

Трехмерная поверхность иллюстрирующая распределение нечетких правил и функций принадлежности, приведена на рисунке 3.34.



Рисунок 3.34 – Поверхность области решений нечеткого контроллера

С использованием вышепредставленной компьютерной модели получены сравнительные результаты моделирования, приведенные на рисунке 3.35.



Рисунок 3.35 – Работа алгоритмов поиска точки максимальной мощности (синий – обычный алгоритм ВиН, красный – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором)

Как видно из графиков, адаптация алгоритма ВиН с помощью нечеткого регулирования значительно увеличивает скорость поиска оптимальной рабочей точки, а также нейтрализует колебания мощности при работе в экстремуме BBX.

Исследование работы алгоритма ВиН с настройкой нечетким регулятором показало зависимость скорости поиска точки максимальной мощности от начального размера шага, что представлено на рисунке 3.36.



Рисунок 3.36 – Графики работы алгоритма ВиН с настройкой нечетким регулятором при различных значениях коэффициента начального шага

В отличие от алгоритма с перенастройкой поискового шага, алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором не теряет устойчивость к колебаниям мощности, что делает его более надежным в плане настройки и позволяет подобрать больший по размеру шаг, оптимизируя скорость выхода на рабочую точку.

В главе 2, подразд. 2.2.4 приводится дополнительный алгоритм настройки нечеткого регулятора с помощью предварительной оценки диапазона регулирования и учета дрейфа BBX.

С помощью модели ФМ, описаной в подразд. 3.1.1, можно получить семейство BBX, описывающих поведение системы при параметрах температуры и освещенности, соответствующих минимальным и максимальным показателям эффективности (см. рисунок 2.10). Таким образом определяется диапазон регулирования для заданных условий на модели. С помощью формулы 2.2 можно оценить допустимый размер шага поискового алгоритма.

Для заданных условий моделирования: фотоэлектрический модуль с напряжением холостого хода $U_{xx} = 24$ В, и током короткого замыкания $I_{\kappa,3} = 6,14$ А; нормальные условия: температура 25 °С, уровень солнечной инсоляции Q = 900-1000 кВт/м², угол падения лучей $\alpha = 90^{\circ}$; нагрузка потребителей отключена;

солнечная батарея заряжает аккумулятор с номинальным напряжением $U_{ab} = 12$ В, разряжённый до 80 %; получены слдующие экспертные оценки: диапазон регулирования напряжения 12–31,5 В, допустимые размеры шага: 0,03–1 В.

На рисунке 3.37 представлено семейство графиков работы поисковых алгоритмов, включающее работу улучшенного алгоритма с нечетким регулятором.



Рисунок 3.37 – График работы алгоритма ВиН (1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 3 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором)

Исходя из представленных на рисунке 3.37 графиков, можно заключить, что улучшенная настройка нечеткого регулятора повышает эффективность работы такого алгоритма: сокращается время поиска, увеличивается количество вырабатываемой энергии.

Для автоматизации работы алгоритма улучшенной настройки предлагается его реализация на основе математического аппарата теориии нечетких множеств.

- 1. Задаются лингвистические переменные: входные по температуре *temp* и освещенности *insol*, выходная по прогнозируемому напряжению V.
- Задаются функции принадлежности переменных, приведенные на рисунке 3.38. Количество функций принадлежности можно увеличить для повышения точности прогнозирования.

 Формулируются нечеткие правила, связывающие входные и выходную лингвистические переменные. Набор нечетких правил приведен на рисунке 3.38.



Рисунок 3.38 – Параметры нечеткого алгоритма улучшенной настройки

Трехмерная поверхность нечетких выводов для алгоритма улучшенной настройки приведена на рисунке 3.39.



Рисунок 3.39 – Поверхность области решений нечеткого вывода

3.3 Сравнительный анализ разработанных адаптивных алгоритмов

Для сравнительной оценки разработанных алгоритмов управления процессом энергопреобразования фотоэлектрической системе В следует настройкам свойствам рассмотреть идентичных по своим И системы, помещенные в одинаковые условия. Для большей наглядности можно принять следующие упрощения: инициализация алгоритмов происходит с нулевого напряжения (точка короткого замыкания), уровень освещенности не изменяется, температура остается постоянной, нагрузка потребителей отключена. Для удобства анализа результаты исследования представляются в виде графиков работы алгоритмов. На рисунке 3.40 приведены сводные графики токов при работе экстремальных регуляторов; на рисунке 3.41 приведены графики подстройки напряжения по предложенным алгоритмам, на рисунке 3.42 – графики поиска точки максимальной мощности по предложенным алгоритмам, на рисунке 3.43 – графики по ошибке регулирования.



Рисунок 3.40 - Графики токов на ФМ при работе экстремальных регуляторов: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией



Рисунок 3.41 – Графики поиска оптимального напряжения: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм

ВиН с предсказывающей адаптацией



Рисунок 3.42 – Графики поиска точки максимальной мощности: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм

ВиН с предсказывающей адаптацией



Рисунок 3.43 – Графики процессов управления по ошибке поиска: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией

Проведем оценку полученных результатов. Как видно из представленных графиков все адаптивные алгоритмы показывают лучшие результаты, чем обычный алгоритм ВиН: значительно снижается время поиска и уменьшаются флуктуации напряжения около оптимального значения. По рисунку 3.40 заметно сокращение колебаний тока при применении адаптивных алгоритмов Сами адаптивные алгоритмы дают различные результаты:

- алгоритм с перенастройкой поискового шага обеспечивает время выхода на точку максимальной мощности ≈ 20 с. модельного времени и обеспечивает нейтрализацию колебаний мощности;
- алгоритм с предсказывающей адаптацией обеспечивает время выхода на точку максимальной мощности ≈ 5 с. модельного времени и обеспечивает уменьшение амплитуды колебаний мощности со значения 0,2 –0,5 до значения в 0,1 Вт;

- алгоритм с настройкой нечетким регулятором обеспечивает время выхода на точку максимальной мощности ≈ 20 с. модельного времени и обеспечивает нейтрализацию колебаний мощности.
- улучшенный алгоритм с настройкой нечетким регулятором обеспечивает время выхода на точку максимальной мощности ≈ 10 с. модельного времени и обеспечивает нейтрализацию колебаний мощности.

Исходя из вышеизложенного, можно заметить, что алгоритм с перенастройкой шага и алгоритм с нечетким регулятором обеспечивают схожее качество управления, однако по сводному графику (рисунок 3.42) видно, что алгоритм с нечетким регулятором обеспечивает бо́льшую выработку энергии (площадь под красным графиком больше площади под зеленым).

Алгоритм с предсказывающей адаптацией обеспечивает наискорейший поиск точки максимальной мощности, однако сохраняет небольшие флуктуации мощности в этой точке. При этом по рисунку 3.42 можно заметить, что площадь под бирюзовым графиком наибольшая, т.е. именно этот алгоритм позволяет отобрать максимум энергии.

Для полноты сравнительной оценки сведем полученные данные в таблицу 3.3 и дополним их общей информацией об алгоритмах.

Исходя из изложенной в таблице информации, можно сделать вывод, что выбор адаптивного алгоритма может быть осуществлен исходя из требований к системе. В случае требования к наибольшей выработке энергии следует выбирать алгоритм с эталонной моделью. В случае, если система экономична: обладает небольшой вычислительной мощностью, отсутствуют датчики температуры, влажности, – лучшим решением будет применение адаптации с перенастройкой поискового шага. Алгоритм с нечетким регулированием при является оптимальным выборе для системы С усредненными характеристиками.

Название алгоритма	Достоинства	Недостатки
Алгоритм с перенастройкой поискового шага	 Нейтрализация колебаний мощности Уменьшение времени регулирования Требует минимум вычислительных мощностей Простота реализации 	 Нет подстройки к резкому изменению внешних условий Зависимость от размера поискового шага
Алгоритм с эталонной моделью	 Подстройка эталонной модели к изменению внешних условий Уменьшение колебаний мощности Наименьшее время регулирования Наибольшая выработка энергии 	 Требует наличия дополнительного оборудования (датчики температуры, влажности и др.) Требует больше вычислительных мощностей Сложность реализации
Алгоритм с нечетким регулированием	 Возможность подстройки под изменения внешних условий Нейтрализация колебаний мощности Уменьшение времени регулирования 	

Таблица 3.3 – Достоинства и недостатки адаптивных алгоритмов

Оценка качества управления при применении разработанных алгоритмов производится по первому и второму интегральным критериям:

$$I_{1} = \int_{0}^{tm} \left(P^{\max} - P(t) \right) \cdot dt, \qquad (3.1)$$

$$I_{2} = \int_{0}^{tm} \left(P^{\max} - P(t) \right)^{2} \cdot dt.$$
 (3.2)

Показатели качества приведены в таблице 3.4.

Название алгоритма	I_1	I_2	<i>Т</i> п, с
ВиН	12850	632000	45
С предсказывающей адаптацией	7,896	1,2	5
С перенастройкой поискового шага	80,8	852,8	20
С настройкой нечетким регулятором	19,58	12,93	20
Улучшенный с настройкой нечетким регулятором	11,24	3,8	10

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что применение адаптивных алгоритмов значительно улучшает качество управления.

Далее рассматривается работа алгоритмов при возникновении возмущений по температуре, освещенности и комбинации этих воздействий.

Заданы следующие параметры модели:

- фотоэлектрический модуль с напряжением холостого хода $U_{x,x} = 24$ B, и током короткого замыкания $I_{\kappa,3} = 6,14$ A;
- внешние условия: температура 30 °С, уровень солнечной инсоляции $Q = 750 \text{ kBt/m}^2$, угол падения лучей $\alpha = 90^\circ$;
- шаг поискового алгоритма 0.5 В;
- нагрузка потребителей отключена;
- солнечная батарея заряжает аккумулятор с номинальным напряжением U_{ab}
 = 12 В, разряжённый до 80 %;
- время моделирования t = 400 с.

1. При **температурном возмущении** от 30 до 20 °C в момент времени 120 с. получено семейство графиков поисковых алгоритмов, приведенное на рисунке 3.44. При увеличенном масштабе около точки возмущения можно оценить скорость выхода алгоритма на экстремум мощности, что приведено на рисунке 3.45.

На рисунке 3.45 видно, что скорость выхода на точку экстремума после возмущения различна для предложенных алгоритмов, эта оценка сведена в таблице 3.5.

Увеличивая масштаб в области установившихся процессов поиска экстремума можно оценить амплитуду колебаний мощности, что приведено на рисунке 3.46.



Рисунок 3.44 – Графики поиска точки максимальной мощности: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором,4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией



Рисунок 3.45 – Работа алгоритмов после возмущения по температуре: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором,4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм

ВиН с предсказывающей адаптацией





По рисунку 3.46 видно, чтообычный алгоритм ВиН и алгоритм с предсказывающей адаптацией дают заметные колебания мощности по 0,5 и 0,1 Вт соответственно.

Эффективность применения алгоритмов с учетом возмущения можно оценить по предложенным ранее интегральным оценкам (3.1) и (3.2), результаты вычислний сводятся в таблицу 3.5.

2. При возмущении освещенности от 750 кВт/м2 до 900 кВт/м2 в момент времени 120 с. Получено семейство графиков работы поисковых алгоритмов, приведененное на рисунке 3.47.

98



Рисунок 3.47 – Работа алгоритмов при возмущении освещения: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором,4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией

Увеличивая масштаб, можно оценить поведение алгоритмов во время возмущения, что отражено на рисунке 3.48. По рисунку можно оценить амплитуды колебаний мощности у точки экстремума и время поиска экстремума для каждого алгоритма.

Эффективность применения алгоритмов с учетом возмущения можно оценить по предложенным ранее интегральным оценкам (3.1) и (3.2), результаты вычислний сводятся в таблицу 3.5.



Рисунок 3.48 – Работа алгоритмов около экстремума BBX после возмущения по освещенности: 1 – обычный алгоритм BuH, 2 – алгоритм BuH с перенастройкой шага, 3 – алгоритм BuH с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм BuH с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм BuH с предсказывающей адаптацией

3. При комбинированном возмущении освещенности и темпераутры с параметрами: освещенность 500 – 900 кВт/м2, температура 30 – 0 °С, время возмущения 100 с., получены следующие графики работы алгоритмов, приведенные на рисунке 3.49.

При увеличении масштаба около экстремума мощности в окрестностях точки возмущения можно получить семейство графиков, позволяющее оценить качество работы алгоритмов: скорость поиска и амплитуду колебаний. Такие графики приведены на рисунке 3.50.

Эффективность применения алгоритмов с учетом возмущения можно оценить по предложенным ранее интегральным оценкам (3.1) и (3.2), результаты вычислний сводятся в таблицу 3.5.

100



Рисунок 3.49 – Работа алгоритмов при комбинированном возмущении: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором,4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией



Рисунок3.50 – Работа алгоритмов около экстремума BBX после комбинированного возмущения: 1 – обычный алгоритм BuH, 2 – алгоритм BuH с перенастройкой шага, 3 – алгоритм BuH с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм BuH с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм BuH с предсказывающей адаптацией

Название алгоритма	Возмущение по температуре		Возмосво	иущение ещеннос	: ПО ТИ	Возмущение по комбинации параметров			
······································	I_1	I_2	<i>Т</i> п, с	I_1	I_2	<i>Т</i> п, с	I_1	I_2	<i>Т</i> π, с
ВиН	921,9	1739	8	736	2838	6	946,7	920,2	8
С предсказывающей адаптацией	64,26	4,88	1	129,5	91,07	2	389,4	180,9	2
С перенастройкой поискового шага	17,24	11,57	6	500,5	1556	12	163,8	59,36	4
С настройкой нечетким регулятором	35,48	17,05	7	290,1	174.4	2	213,7	30,18	3
Улучшенный с настройкой нечетким регулятором	3,363	0,05	3	133,1	154	4	137,6	11,94	2

Таблица 3.5 – Показатели эффективности алгоритмов

На основании полученных данных, можно заметить, что все адаптивные алгоритмы показывают лучшие результаты, чем стандартный алгоритм ВиН. Наибольшей эффективностью обладает улучшенный алгоритм с настройкой нечетким регулятором.

3.4 Выводы

Основные результаты по итогам данной главы:

1. В MATLAB/Simulink библиотека создана среде элементов фотоэлектрических систем, включающая модели солнечной панели, управляющего устройства, нагрузки. Разработанная библиотека позволяет создавать модели фотоэлектрических систем различных конфигураций и исследовать их работу при различных внешних условиях.

2. На базе разработанной библиотеки создана модель фотоэлектрической системы с различными адаптивными алгоритмами управления: алгоритм с перенастройкой поискового шага, алгоритм с эталонной моделью, алгоритм с настройкой нечетким регулятором, а также алгоритм улучшения для нечеткого регулятора.

3. Проведено сравнительное исследование работы системы с различными адаптивными алгоритмами, показавшее их преимущество перед классическим алгоритмом.

Результаты проведенных исследований, представленные в данной главе диссертационной работы, отражены в работах автора [52, 55, 56, 58, 61, 65].

ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

4.1 Постановка задачи

В рамках прикладных научных исследований (ФЦП Соглашение № 14.578.21.0241) разработан беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с функцией захвата движущейся цели, работающий на основе системы автономного интеллектуального функционирования.

Автономность БПЛА обеспечивается специализированным аппаратнопрограммным комплексом (АПК), включающим реконфигурируемые алгоритмы обработки информации, управления, навигации И отличающиеся OT существующих аппаратно выполняются на тем, ЧТО перестраиваемых вычислительных средах (ПВС). ПВС – дискретная математическая модель высокопроизводительной вычислительной системы, состоящая из одинаковых и одинаково соединенных друг с другом простейших универсальных элементов (элементарных вычислителей), программ, настраиваемых на выполнение любой функции из полного набора логических функций, памяти и любого соединения со Эффективность аппаратной реализации разработанных своими соседями. алгоритмов с помощью ПВС определяется свойствами, присущими данным средам [44]:

•высоким быстродействием (за счет параллельных вычислений);

•надежностью (за счет взаимозаменяемости элементарных вычислителей);

•технологичностью (за счет однотипности элементарных вычислителей и соединений между ними);

•многофункциональностью и адаптивностью (за счет возможности изменения архитектуры под конкретную задачу);

•инвариантностью к элементной базе (т.е. независимостью от технологии изготовления вычислительной среды).

Такой подход многократно увеличивает производительность работы системы управления БПЛА.

В состав АПК входит наземный робот (рисунок 4.1), являющийся стартовой площадкой для автономного БПЛА-охотника.



Рисунок 4.1 – Фотография тестового прототипа шасси наземного робота, входящего в состав АПК

Для повышения степени автономности, т.е. увеличения времени автономного функционирования, возможно построение на основе робота автономной станции БПЛА. Такая станция будет использоваться как хранилище БПЛА, зарядное устройство, центр связи. Энергетическую автономность такой системы обеспечивают фотоэлектрические модули. На рисунке 4.2 приведена трехмерная модель автономной станции БПЛА.



Рисунок 4.2 – Концепт-модель автономной станции БПЛА: 1 – подвижные крышки с солнечными панелями; 2 – метеостанция; 3 – посадочная площадка; 4 – корпус; 5 – панель управления

В автономной станции БПЛА реализован режим экстремального регулирования мощности, а также система переориентирования фотоэлектрических модулей: оба эти подхода позволяют увеличить КПД системы и увеличить время автономной работы.

На рисунке 4.3 приведен общий концепт системы.



Рисунок 4.3 – Концепт фотоэлектрической системы

Итак, для решения сопряженной задачи максимизации времени автономного функционирования предлагается автоматизация разрабатываемой системы энергетически эффективным интеллектуальным импульсным преобразователем с контроллером, обеспечивающим адаптивное управление.

В представленной системе реализуется алгоритм экстремального регулирования мощности ВиН, подробно рассмотренный в предыдущих главах. В качестве метода адаптации используется перенастройка поискового шага алгоритма, как наиболее простой в реализации и наименее требовательный к вычислениям и дополнительным устройствам.

Энергетические характеристики системы определяются выбором устройств: солнечной панели и аккумулятора.

Условия функционирования: лето, средний солнечный полдень, 56° 30' 40" (56° 30' 75) северной широты; 84° 57' 16" (84° 57' 35) восточной долготы, уровень освещенности 90–100% (ясный день), температура 20 °С, влажность 75 %, угол падения солнечных лучей $\approx 90^{\circ}$.

4.2 Элементная база прототипа фотоэлектрической системы

Как уже было указано выше, фотоэлектрическая система состоит из следующих основных узлов: солнечной панели, импульсного преобразователя, нагрузки/аккумулятора, контроллера.

4.2.1 Солнечная панель

Разработанный в рамках выоплнения диссертационной работы прототип снабжен солнечной панелью, обладающей следующими характеристиками:

- Мощность 1,5 Bт.
- Напряжение 12 В.
- Материал поликристаллический кремний.
- Размер: 115×85 мм.

На рисунке 4.4 приведена фотография используемой солнечной панели.

107



Рисунок 4.4 – Солнечная панель

4.2.2 Аккумулятор

В представленном прототипе фотоэлектрической системы в качестве аккумулятора применяется блок батареек, обладающий следующими характеристиками:

- Число гнезд - 4.

- Напряжение - 6 В (4 ААА элемента по 1,5 В).

4.2.3 Контроллер

В качестве управляющего устройства используется контроллер myRIO фирмы «National Instrument», что позволяет синтезировать систему управления со SCADA-системой реализованной посредством среды LabView, обладающей рядом преимуществ: интуитивным интерфейсом, удобством интеграции и построения связи «контроллер – APM – контроллер», большой встроенной библиотекой программных элементов для построения систем управления.

проектирования Устройство для встраиваемых систем myRIO предоставляет вводы-выводы с двух сторон устройства в виде разъемов МХР и MSP. Устройство располагает аналоговыми вводами, аналоговыми выводами, ЛИНИЯМИ цифрового ввода-вывода, индикаторами, кнопкой управления, встроенным акселерометром, ПЛИС Xilinx и двухъядерным процессором ARM Cortex-А9. Некоторые модели также поддерживают Wi-Fi. Устройство можно запрограммировать с помощью LabVIEW или С.

На рисунке 4.5 приведена фотография устройства.


Рисунок 4.5 – Внешний вид контроллера National Instrument myRIO

4.2.4 Импульсный преобразователь

Импульсный преобразователь в данном проекте создан на макетной плате по топологии понижающего преобразователя напряжения [32]. На рисунке 4.6 приведена электрическая схема устройства.



Рисунок 4.6 – Электрическая схема импульсного преобразователя

Для передачи требуемых параметров на контроллер используются: датчик тока ACS712, внешний вид и характеристики которого приведены на рисунке 4.7, а также датчик напряжения, построенный по топологии делителя напряжения, принципиальная схема которого приведена на рисунке 4.8.

109



Рисунок 4.7 – Датчик тока ACS712



Рисунок 4.8 – Принципиальная схема делителя напряжения

4.2.5 Сборка прототипа фотоэлектрической системы

Сборка прототипа осуществляется по схеме, приведенной на рисунке 4.3 из предложенных ранее компонентов, при этом импульсный преобразователь с датчиками тока и напряжения занимают место в специальном коробе для защиты от пыли и влаги.

На рисунке 4.9 представлен прототип фотоэлектрической системы в сборке. В состав сборки входит фотоэлектрический модуль, контроллер myRIO, блок аккумуляторных батареек, короб с импульсным преобразователем и ноутбук, выполняющий функцию APM-оператора.

110



Рисунок 4.9 – прототип фотоэлектрической системы

4.3. Программное обеспечение прототипа фотоэлектрической системы

Программное обеспечение разрабатываемого прототипа фотоэлектрической системы включает SCADA-систему и алгоритмы работы контроллера. Среда LabView охватывает оба эти уровня программного обеспечения.

В среде LabView реализуется программа управления, обеспечивающая режим экстремального регулирования мощности, подробно рассмотренный в предыдущих главах. Основой программы служит алгоритм ВиН дополненный адаптацией с перенастройкой поискового шага (см. рисунок 2.17). На контроллер поступают данные по току и напряжению на солнечной панели – происходит вычисление мощности и её запоминание. Контроллер сравнивает текущее значение мощности с предыдущим и принимает решение увеличить или уменьшить сигнал ШИМ на импульсный преобразователь, руководствуясь логикой алгоритма ВиН.

Для удобного представления данных о процессе управления в среде LabView реализована SCADA, представленная на рисунке 4.10. SCADA позволяет отслеживать работу экстремального регулирования по графику процесса, строящемуся в реальном времени. Также здесь можно переключиться в режим ручного управления, а индикаторы тока и напряжения всегда подскажут актуальное значение этих параметров. Данные о работе системы записываются в логи (отчеты), которые можно просмотреть в любое время.



Рисунок 4.10 - SCADA прототипа фотоэлектрической системы в LabView

На рисунке 4.11 представлен код реализации системы в LabView.

Представленный код можно условно поделить на три основные части: верхняя часть позволяет получить ВАХ и ВВХ по команде оператора, нижняя часть представляет собой переключаемую систему ручного (вторая часть) и автоматического (третья часть) управления ШИМ-сигналом.

В качестве входных параметров алгоритмы, заложенные в представленный код, используют сигналы с датчиков тока и напряжения, реализация которых была рассмотрена ранее. Внутри алгоритмов реализуется логика метода ВиН, подробно изложенного в предыдущих главах, модифицированного с помощью перенастройки поискового шага. Выходной величиной является ШИМ сигнал на импульсный преобразователь (разд. 4.2.4).



Рисунок 4.11 – Реализация алгоритмов системы в среде LabView

4.4 Оценка работы прототипа фотоэлектрической системы

Разработанный прототип фотоэлектрической системы прошел проверку работоспособности при поставленных в задаче условиях: лето, средний солнечный полдень, 56° 30' 40" (56° 30' 75) северной широты; 84° 57' 16" (84° 57' 35) восточной долготы, уровень освещенности 90–100% (ясный день), температура 20 °C, влажность 75 %, угол падения солнечных лучей ≈ 90°.

Оценка результатов осуществлялась посредством контроля по эталонному контроллеру МРТ-7210А с ручной настройкой точки максимальной мощности, внешний вид устройства представлен на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Контроллер МРТ-7210А

Полученные результаты измерений приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

No	Показания	Показания	№ опыта	Показания	Показания
опыта	прототипа, В	эталона, В	vi onbria	прототипа, В	эталона, В
1	1,42	1,4	26	1,416	1,4
2	1,418	1,4	27	1,415	1,4
3	1,412	1,4	28	1,427	1,4
4	1,416	1,4	29	1,383	1,4
5	1,385	1,4	30	1,39	1,4
6	1,407	1,4	31	1,439	1,4
7	1,374	1,4	32	1,358	1,4
8	1,36	1,4	33	1,358	1,4
9	1,359	1,4	34	1,362	1,4
10	1,409	1,4	35	1,424	1,4
11	1,416	1,4	36	1,401	1,4
12	1,418	1,4	37	1,386	1,4
13	1,428	1,4	38	1,415	1,4
14	1,393	1,4	39	1,446	1,4
15	1,393	1,4	40	1,397	1,4
16	1,386	1,4	41	1,433	1,4
17	1,426	1,4	42	1,39	1,4
18	1,428	1,4	43	1,418	1,4
19	1,358	1,4	44	1,354	1,4
20	1,375	1,4	45	1,42	1,4
21	1,397	1,4	46	1,355	1,4
22	1,368	1,4	47	1,447	1,4
23	1,412	1,4	48	1,37	1,4
24	1,415	1,4	49	1,354	1,4
25	1,424	1,4	50	1,378	1,4

Математическое ожидание по показаниям прототипа:

114

$$V_{\rm cp} = \frac{\sum V_n}{n} = 1,3986 \,\mathrm{B}$$

Дисперсия по показаниям прототипа:

$$D_V = \frac{\sum (V - V_{\rm cp})^2}{n} = 0,000716 \,\mathrm{B}^2.$$

СКО по показаниям прототипа:

$$\sigma_V = \sqrt{D_V} = 0,0267 \text{ B}.$$

Доверительные границы:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\beta} = t_{\beta} \cdot \sigma_{V} = 1,96 \cdot 0,0267 = 0,0523 \text{ B}, \\ V_{H} = V_{cp} - \varepsilon_{\beta} = 1,3463 \text{ B}, \\ V_{B} = V_{cp} + \varepsilon_{\beta} = 1,4509 \text{ B}. \end{cases}$$

Отклонение математического ожидания прототипа от поискового значения:

$$|\Delta| = V_{\rm cp} - V_{\rm er} = 0,00134$$
 B.

Разброс значений прототипа от показателей эталона представлен на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Разброс показаний прототипа от данных эталона

Рассчитанные показатели подтверждают работоспособность и эффективность разработанного прототипа.

4.5 Выводы

В рамках данной главы решена задача разработки прототипа фотоэлектрической системы с адаптивным управлением, причем:

1. Разработанный прототип фотоэлектрической системы обладает полным элементным составом, соответствующим реальной системе.

2. Использование экстремального регулирования повышает КПД системы, что делает её энергоэффективной.

3. Сравнительный анализ показателей разработанного прототипа с эталонным устройством подтверждает работоспособность и эффективность работы прототипа.

Результаты проведенных исследований, представленные в данной главе диссертационной работы, отражены в работах автора [54, 59, 63].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научно обоснованные адаптивные алгоритмы управления фотоэлектрическими системами, повышающие качество работы систем при недостатке априорной информации об объекте управления, что имеет большое значение в связанных отраслях: автономном энергоснабжении, робототехнике, космической отрасли и др.

Выводы. Можно выделить следующие наиболее важные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработаны модели элементов фотоэлектрических систем, позволяющие конфигурировать системы различных свойств. Разработанные модели имеют множество параметров настройки и учитывают широкий спектр возмущающих воздействий, соответствующих реальным условиям эксплуатации, что позволяет получать результаты, близкие к натурным.

2. Разработаны и подробно описаны адаптивные алгоритмы экстремального регулирования мощности для систем управления фотоэлектрических установок. Предложенные алгоритмы охватывают различные требования к таким системам, что дает широкий выбор решений при проектировании фотоэлектрических систем.

3. Улучшено экстремальное регулирование мощности в системе управления ФЭУ, а именно:

- нейтрализованы колебания мощности, вызываемые шаговым характером стандартного алгоритма управления;
- уменьшено время поиска экстремума за счет адаптации управления к переменным эксплуатационным условиям.

4. Решена задача повышения энергетической эффективности фотоэлектрических систем за счет внедрения адаптивных алгоритмов экстремального регулирования мощности. Доказана целесообразность и показана эффективность таких решений.

5. Создан прототип ФЭУ, на базе которого проведена серия опытов, подтверждающих полученные в результате моделирования результаты.

Рекомендации. Дальнейшие исследования могут развиваться в следующих направлениях:

• улучшение качества экстремального управления в системах ветроэнергетики;

• разработка методов предварительной настройки адаптивных алгоритмов управления в сложных динамических системах;

• разработка программного обеспечения для проектирования гибридных автономных систем, включающих в свой состав фотоэлектрические установки.

Автор благодарит научного руководителя доктора технических наук С.В. Шидловского за оказание систематической поддержки и обсуждение всех вопросов, возникающих в процессе работы над диссертацией.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $\Phi \Theta C$ фотоэлектрическая система
- ФЭУ фотоэлектрическая установка
- ЭРМ экстремальное регулирования мощности
- MPPT Maximum Power Point Tracking
- ВАХ вольт-амперная характеристика
- ВВХ вольт-ваттная характеристика
- ВиН возмущение и наблюдение
- САУ система автоматизированного управления
- ШИМ широтно-импульсная модуляция
- ΦM фотоэлектрический модуль
- ТММ точка максимальной мощности
- АБ аккумуляторные батареи
- ЭМ эталонная модель
- НМ настраиваемая модель
- БПЛА беспилотный летательный аппарат
- АПК аппаратно-программный комплекс
- ПВС перестраиваемая вычислительная среда

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурашева В. А. Альтернативная энергетика берет новые рубежи [Электронный ресурс] / Информационно-аналитический сервис строительного сообщества. – 2019. – Режим доступа: http://estp-blog.ru. – Загл. с экрана.

2. Гарифулина М.Р., Власов А. И. Макарчук В. В., Адамовик Н. Модель элемента солнечной батареи типа CIGS // Инженерный вестник. – 2012. – №8. – С. 1-21.

3. Martin F. Schumann, Carsten Rockstuhl, Martin Wegener. Cloaked contact grids on solar cells by coordinate transformations: designs and prototypes // Optica. – 2015. - No 10-2. - P. 850-853.

4. Solimpeks. Volther Hybrid PV-T Panels [Electronic resource] / Solimpeks. –2019.–Режимдоступа:http://solenergo.lv/wp-content/uploads/pvt_presentation_en1.pdf. – Загл. с экрана.

5. Андреев В.М., Давидюк Н.Ю., Ионова Е.А., Покровский П.В., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А. Оптимизация параметров солнечных модулей на основе линзовых концентраторов излучения и каскадных фотоэлектрических преобразователей // Журнал технической физики. – 2010. – № 80-2. – С. 118-125.

6. Иванчура В.И., Чубарь А.В., Пост С.С. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2012. – № 2. – С. 179-190.

7. Иванчура В.И., Краснобаев Ю.В., Пост С.С. Имитационная модель автономной системы электропитания // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2014. – № 7. – С. 791-796.

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

9. Шарифов Б. Н., Терегулов Т. Р. Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/Simulink // Вестник УГАТУ. – 2015. –№ 4. – С. 77-83.

10. Sridhar R., Jeevananathan Dr., Thamizh Selvan N., Saikat Banerjee. Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm // International Journal of Computer Applications. – 2010. – No 5-7. – P. 35-39.

11. Аржанов К.В. Фотоэлектрическая энергетическая установка с наведением на Солнце // Сборник материалов Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление». Иркутск , 01-03 сентября 2015 г. – Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 579–581.

12. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., и др. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – С. 282-287.

13. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22). – С. 102–107.

14. Волгин А.В., Юрченко А.В., Козлов А.В., Китаева М.В. Автоматизированные системы контроля и управления солнечными энергетическими системами // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 149-154.

15. Китаева М.В., Юрченко А.В., Скороходов А.В., Охорзина А.В. Системы слежения за солнцем // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 3. – С. 61-67.

16. Ахмед Т.А. Джайлани, Сокольский А.К. Система электроснабжения автономных потребителей малой мощности на базе дизель-фотоэлектрической установки // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2009. – №4. – С. 43-45.

17. Донцов О. А., Краснобаев Ю. В. Использование экстремального регулятора в автономных системах электропитания // Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. – Режим доступа: http://conf.sfu-kras.ru, свободный.

18. Асанов М.М., Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н. Снижение влияния нагрева поверхности фотоэлемента на эффективность его работы // Строительство и техногенная безопасность. – 2014. – № 51. – С. 92-96.

19. Benitez P., Minano J.C., Zamora P. High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 25-40.

20. Sivagamasundari M.S., Melba Mary P., Velvizhi V.K. Maximum power point tracking for photovoltaic system by perturb and observe method using buck boost converter // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2. – P. 2433-2439.

21. Chi Hwan Lee, Dong Rip Kim, In Sun Cho, et al. Peel-and-Stick: Fabricating thin film solar cell on universal substrates // Science. – 2013. – Vol. 340. – P. 334-337.

22. Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4%. Press Releases // Sharp [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: http://www.sharp-world.com, свободный.

23. World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency // Press Release [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://www.soitec.com, свободный.

24. Грицута А.Н., Щербаков А.П., Воронин Б.А. Разработка модели инфракрасного солнечного трекера // Вестник науки Сибири. – 2013. – №1(7). – С. 106-110.

25. Eden Full. SunSaluter // SunSaluter [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://www.sunsaluter.com, свободный.

26. Петрусёв А.С., Сарсикеев Е.Ж., Ляпунов Д.Ю. Разработка технических средств повышения эффективности солнечных установок // Вестник науки Сибири. – 2015. – Спецвыпуск (15). – С. 77-82.

27. Pulkit Singh, D.K. Palwalia, Amit Gupta, Prakash Kumar. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. – 2015. – Vol.2. – P. 401-404.

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

29. Roberto Faranda, Sonia Leva. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems // WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS. – 2008. – Vol. 3. – P. 446-455.

30. Gunjan Varshney, Chauhan D.S., Dave M.P. Simscape Based Modelling & Simulation of MPPT Controller for PV Systems // Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2014. – Vol. 9. – P. 41-46.

31. Highly Efficient Maximum Power Point Tracking Using a Quasi-Double-Boost DC/DC Converter for Photovoltaic Systems: Theses and Dissertations / Christopher J. Lohmeier. – University of Nebraska – Lincoln, 2011. – 92 p.

32. Dhananjay Choudhary, Anmol Ratna Saxena. DC-DC Buck-Converter for MPPT of PV System // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. – Vol. 4. – P. 813-821.

33. Sunil Kumar Mahapatro. Maximum Power Point Tracking (MPPT) Of Solar Cell Using Buck-Boost Converter // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2013. – Vol. 2. – P. 1810-1821.

34. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику // MATLAB.Exponenta [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru, свободный.

35. Aït Cheikh M.S., Larbes C., Tchoketch Kebir G.F., Zerguerras A.. Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme // Revue des Energies Renouvelables. – 2007. – Vol. 10. – P. 387-395.

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

37. Винников А. В., Денисенко Е. А., Долбенко Д. В. К вопросу выбора солнечной фотоэлектрической станции // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 108. – С. 1-11.

38. Расчет фотоэлектрической системы // Ваш Солнечный Дом [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://www.solarhome.ru, свободный.

39. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy // International Energy Agency [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://www.iea.org, свободный.

40. Фотоэлектрические системы // G2group [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: http://g2group.ru, свободный.

41. Фронтини Ф., Фризен Т. Фотоэлектрические модули, интегрированные в ограждающие конструкции зданий // Здания высоких технологий. – 2013. – № 35. – С. 87-91.

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

43. Типы АБ и области их применения // Ваш Солнечный Дом [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://www.solarhome.ru, свободный.

44. Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. – Томск: Томский государственный университет, 2006. – 288 с.

45. Кукса П.П. Система моделирования нечетких систем на алгоритмическом уровне // pkuksa.org [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://pkuksa.org, свободный.

46. Шидловский С.В. Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления структурно-перестраиваемых систем // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – № 8. – С. 19-23.

47. Солнечный трекер // Radiofishka [электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://radiofishka.in.ua, свободный.

48. Широтно-импульсная модуляция, ШИМ, РWМ, управление, регулирование, регулятор, модулятор // Энциклопедия радиоэлектроники [электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://gyrator.ru, свободный.

A.B., Козлов 49. Волгин A.B., Юрченко A.B., Китаева M.B. Автоматизированные системы контроля И управления солнечными энергетическими системами // Ползуновский вестник. - 2010. - № 2. - С. 149-154.

50. Аносов, В.Л. Учебное пособие по курсу «Имитационное моделирование» для студентов специальностей 7.050102 «Экономическая кибернетика» и 7.080404 «Интеллектуальные системы принятия решений» / В.Л. Аносов, В.Н. Черномаз. – Краматорск: ДГМА, 2007. – 156 с.

51. Петухов, О.А. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: учеб. пособие / О.А. Петухов, А.В. Морозов, Е.О. Петухова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 288 с.

52. Применение аппарата нечёткой логики для улучшения свойств МРРТалгоритма «возмущение-наблюдение» / Р.У. Гимазов, С.В. Шидловский // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7–11 ноября 2016 г.: в 2 т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 157–158.

53. Исследование влияния симметрии функций принадлежности в нечётком контроллере на качество МРРТ регулирования в фотоэлектрической системе / Р.У. Гимазов, С.В. Шидловский // ИННОВАТИКА–2017. Сборник материалов XIII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 20–22 апреля 2017 г. – Томск: Изд-во «STT», 2017. – С. 356-360.

54. Разработка автономной станции беспилотного летательного аппарата / Р.У. Гимазов, С.В. Шидловский // ИННОВАТИКА-2018. Сборник материалов XIV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 26–27 апреля 2018 г. – Томск: Изд-во «STT», 2018. – С. 77-80.

55. преобразователя Имитационное моделирование импульсного / Р.У. C.B. Шидловский фотоэлектрической установки Гимазов, || ИННОВАТИКА-2019. Сборник материалов XV Международной школыконференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 25–27 апреля 2019 г. – Томск: Изд-во «STT», 2019. – С. 109-113.

56. Имитационное моделирование автономной системы питания с повышенной энергетической эффективностью / Р.У. Гимазов, С.В. Шидловский // Когнитивная робототехника: материалы международной конференции (7–10 декабря 2016 г.) / под ред. В.И. Сырямкина, А.В. Юрченко; Томский государственный университет. Часть 1. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2016.– С. 83.

57. Архитектура адаптивной нейронной сети на основе системы нечеткого вывода для реализации интеллектуального управления в фотоэлектрических системах / Р.У. Гимазов, С.В. Шидловский // Когнитивная робототехника: материалы II международной конференции (22–25 ноября 2017 г.) / под ред. В.И. Сырямкина, А.В. Юрченко; Томский государственный университет. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2017.– С. 22.

58. Имитационное моделирование автономной системы питания с повышенной энергетической эффективностью / Р.У. Гимазов, С.В. Шидловский // Когнитивная робототехника: материалы II международной конференции (22–25 ноября 2017 г.) / под ред. В.И. Сырямкина, А.В. Юрченко; Томский государственный университет. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2017 – С. 44.

59. Повышение энергетической эффективности автономной станции беспилотного летательного аппарата / Р.У. Гимазов, С.В. Шидловский // Когнитивная робототехника: материалы III международной конференции (21–23 ноября 2018 г.) / под ред. В.И. Сырямкина, А.В. Юрченко; Томский государственный университет. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2018.– С. 6.

60. Гимазов Р.У. Автоматизированные системы контроля и управления фотоэлектрическими установками с повышенной энергетической

126

эффективностью / Р.У. Гимазов; науч. рук. С.В. Шидловский // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума, г. Томск, 28 сентября – 2 октября 2015 г., в 3 т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. – С. 113-116.

61. Гимазов Р.У. Имитационное моделирование основных элементов / P.Y. Гимазов, C.B. Шидловский фотоэлектрических систем // IX научно-практическая конференция «Информационно-Международная измерительная техника и технологии» в рамках Международного форума «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции», г. Томск, 21 - 24ноября 2018 года: - Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2018. C. 11-12.

62. Гимазов Р.У., Шидловский С.В. Оптимизация процессов управления в фотоэлектрических установках для повышения энергетической эффективности систем распределенной генерации // Телекоммуникации. – 2018 – № 7. – С. 16-20.

63. Гимазов Р.У., Шидловский С.В. Распределенная система управления фотоэлектрической установкой на основе плат быстрого прототипирования // Телекоммуникации. – 2019 – № 7. – С. 15-19.

64. Gimazov R.U., Shidlovsky S.V. Investigation of the influence of the symmetry of membership functions in the fuzzy controller on the quality of MPPT regulation in the photovoltaic system // MATEC Web of Conferences . - 2017 - Vol. 141, Article number 01016. - P. 1-4.

65. Gimazov R.U. , Shidlovsky S.V. Simulation modeling of intelligent control algorithms for constructing autonomous power supply systems with improved energy efficiency // MATEC Web of Conferences. -2018 - Vol. 155, Article number 01032. -P. 1-7.

66. Gimazov R.U., Shidlovsky S.V. The architecture of adaptive neural network based on a fuzzy inference system for implementing intelligent control in photovoltaic systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, – 2018 – Vol. 363, Article number 012016. – P. 1-5.

67. Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies [Electronic resource] / Yinghao Chu – 2011. – Режим доступа: https://www.geni.org/globalenergy/research/review-and-comparison-of-solar-technologies/Review-and-Comparison-of-Different-Solar-Technologies.pdf. – Загл. с экрана.

68. Press Releases (2011). Enerdata Global Energy Intelligence, World Energy Use in 2010: Over 5% Growth [Electronic resource] / Enerdata – 2011 – Режим доступа:

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/026/48026304.pdf. – Загл. с экрана.

69. World Energy Outlook [Electronic resource] / International Energy Agency – 2011 – Режим доступа: https://www.iea.org/publications/ freepublication/WEO2011_WEB.pdf – Загл. с экрана.

70. Energy, power and climate change [Electronic resource] / Uplift Education – 2019 – Режим доступа: http://www.uplifteducation.org.

71. A Review of Photovoltaic Cells [Electronic resource] / David Toub – 2007 – Режим доступа: http://www2.ece.rochester.edu/. – Загл. С экрана.

72. Technology Roadmap Solar Thermal Electricity [Electronic resource] / International Energy Agency – 2014 – Режим доступа: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSol arThermalElectricity_2014edition.pdf.

73. Fahrenburch, A. and Bube, R., Fundamentals of solar cells, New York: Academic Press, 1983.

74. J. Rizk, and Y. Chaiko. Solar Tracking System: More Efficient Use of Solar Panels // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2008. – P. 784-786.

75. Gökhan Oral, Osman N. Uçan. Solar Tracking Systems and A Two-Axis Active Prototype With Stepwise Movement // International journal of electronics, mechanical and mechatronics engineering. – 2015. – P. 755-764.

76. Clifford M.J., Eastwood D. Design of a novel passive solar tracker // Solar Energy. – 2004. – P. 269–280.

77. Mamlook R., Nijmeh S., Abdallah S.M. A programmable logic controller to control two axis suntracking system // Information Technology Journal. – 2006. – P. 1083-1090.

78. A.F. Boehinger. Self-Adaptive DC Converter for Solar Spacecraft Power Supply // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. – 1968. - P. 102-111.

79. M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato. Voltage-Based Maximum Power
Point Tracking Control of PV Systems // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2002.
– P. 262 - 270.

80. E. Stathatos. Dye Sensitized Solar Cells: A New Prospective to the Solar to Electrical Energy Conversion. Issues to be Solved for Efficient Energy Harvesting // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2012. – P. 9-13.

81. R.Sridhar, N.Thamizh Selvan, Saikat Banerjee. Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm // International Journal of Computer Applications. – 2010 – P. 35-39.

82. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 10.07.2012) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

83. 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.

84. Шиняков Ю. А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2007. – № 1.

85. Шидловский С.В. Система автоматического регулирования, инвариантная к параметрическим возмущениям, на базе нечеткой логики // Вестник Томского государственного университета. – 2006. – № 290. – С. 247-250.

86. Привалов В.Д. Оценка эффективности применения экстремального регулятора в автономных СЭП / В.Д. Привалов, В.Е. Никифоров. – Куйбышев: КПИ, 1981. – 16 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор АО «НИИПП» /Е.А. Монастырев » 2019 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы

Гимазова Руслана Ураловича

«Алгоритмы адаптивного управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе»

Комиссия в составе: И.о. директора по научной работе

Зам. директора по научной работе Ведущий инженер НТО Васильев А.В. Бакин Н.Н. Лунев С.О.

рассмотрев материалы диссертационной работы Гимазова Р.У., установила, что полученные результаты, а именно:

 алгоритм с перенастройкой поискового шага для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе;.

 алгоритм с предсказывающей адаптацией для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе;

 алгоритм на базе математического аппарата теории нечетких множеств для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе;

имеют практическое применение в разработках АО «НИИПП». В частности, использовались при создании нового аппаратно-программного комплекса в рамках прикладных научных исследований ФЦП Соглашение № 14.578.21.0241 «Разработка системы автономного интеллектуального функционирования беспилотным летательным аппаратом на базе реконфигурируемых алгоритмов управления, навигации и обработки информации и создание на ее основе аппаратно-программного комплекса защиты от малогабаритных летательных аппаратов».

> И.о. директора по научной работе Васильев А.В. Зам. директора по научной работе Бакин Н.Н. Ведущий инженер НТО Лунев С.О.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной деятельности Томского государственного

университета .Б. Ворожнов TLA »C

АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук *Гимазова Руслана Ураловича*

«Алгоритмы адаптивного управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: зам. декана по научной работе, к.т.н., доцент каф. УК ФИТ Шашев Дмитрий Вадимович Члены комиссии: зав. каф. УИ ФИТ, д.ф.-м.н., профессор Солдатов Анатолий Николаевич зав. каф. УК ФИТ, д.т.н., профессор Сырямкин Владимир Иванович

Составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Алгоритмы адаптивного управления процессом преобразования энергии В фотоэлектрической Р.У. используются системе» Гимазова на факультете инновационных технологий Томского государственного университета в учебном процессе с 2018/2019 учебного года:

 для студентов направления подготовки 27.03.05 — «Инноватика» по программе бакалавриата «Управление инновациями в наукоемких технологиях» в лекционном курсе и лабораторном практикуме по дисциплине «Теория и системы управления».

- для студентов направления подготовки 27.03.02 – «Управление качеством» по программе бакалавриата «Управление качеством в производственно-технологических

системах» в лекционном курсе и лабораторном практикуме по дисциплине «Теория и системы управления».

 для студентов направления подготовки 27.04.05 — «Инноватика» по программе магистратуры «Управление научно-технической деятельностью и внедрение технологий» в лекционном курсе и лабораторном практикуме по дисциплине «Автоматизация технологических процессов».

 для студентов направления подготовки 27.04.02 – «Управление качеством» по программе магистратуры «Управление качеством в производственно-технологических системах» в лекционном курсе и лабораторном практикуме по дисциплине «Автоматизация технологических процессов».

Диссертационные исследования выполнены в рамках:

- гранта Российского фонда фундаментальных исследований №16-07-01138, «Интеллектуальные реконфигурируемые системы управления, навигации и обработки изображений для автономных подвижных роботов».

гранта Российского фонда фундаментальных исследований №19-29-06078,
 «Разработка и исследование реконфигурируемых быстродействующих алгоритмов распознавания изображений для оценки дорожной ситуации на базе специализированных мобильных устройств с параллельно-конвейерной архитектурой».

 проекта RFMEFI57817X0241. «Разработка системы автономного интеллектуального функционирования беспилотным летательным аппаратом на базе реконфигурируемых алгоритмов управления, навигации и обработки информации и создание на ее основе аппаратно-программного комплекса защиты от малогабаритных летательных аппаратов».

Председатель комиссии 2019 г. зам. декана по Н.Р., доцент УК ФИТ / Д.В. Шашев

Члены комиссии « 10 » cryocho 2019 г. 2019 г.

зав. каф. УИ ФИТ / А.Н. Солдатов зав. каф. УК ФИТ / В.И. Сырямкин