

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск - 2020

Работа выполнена в научно-образовательном центре И. Н. Бутакова Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук

Шидловский Станислав Викторович

Официальные оппоненты:

Титов Виталий Семенович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», кафедра вычислительной техники, заведующий кафедрой.

Курносов Михаил Георгиевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», федеральное агентство связи, кафедра вычислительных систем, профессор.

Защита состоится 10 апреля 2020 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.16, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, дом 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «_____» 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук,

доцент



Козин Кирилл Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Солнечная энергетика является быстро растущей и перспективной отраслью. На сегодняшний день область внедрения фотоэлектрических установок (ФЭУ) охватывает самые различные сферы человеческой деятельности: аэрокосмическую, робототехническую, бытовую, аграрную и др. Стремительное развитие автономных систем и их использование в различных отраслях ставит **актуальную задачу** создания эффективного автономного энергоснабжения, решением которой может являться применение ФЭУ.

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.

Проблемой фотоэлектрических установок является их низкий КПД, составляющий порядка 10%. В связи с этим возникает противоречие между потенциалом использования ФЭУ в автономных системах и низким КПД. Из этого вытекает **актуальная задача** повышения эффективности ФЭУ.

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. Теушаков, К.В. Аржанов, А.В. Юрченко, А.В. Скороходов.

- метод использования режима экстремального регулирования мощности (ЭРМ), также известный как технология MPPT (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.

Данная работа посвящена экстремальному регулированию мощности. Технология MPPT показывает высокую эффективность при применении даже в условиях рассеянного света, что наделяет ее дополнительным преимуществом.

Наиболее распространённым алгоритмом управления, поддерживающим поиск точки максимальной мощности, является алгоритм «возмущение и наблюдение». В этом методе управляющее устройство на небольшую величину изменяет напряжение и измеряет мощность, если мощность увеличивается – контроллер продолжает изменять напряжение в этом же направлении, пока мощность не перестанет увеличиваться. Недостатками алгоритма «возмущение

и наблюдение» являются колебания мощности и фиксированное время поиска точки максимальной мощности. Уменьшение времени поиска приводит к увеличению амплитуды колебаний, что ведёт к недовыработке мощности. Уменьшение амплитуды колебаний мощности приводит к увеличению времени поиска точки максимальной мощности.

Указанные проблемы стимулируют исследования, целью которых является поиск наиболее эффективных алгоритмов МРРТ, обеспечивающих требуемое качество отбора энергии в фотоэлектрических системах.

Среди перспективных путей реализации адаптивных алгоритмов МРРТ, можно выделить такие, как: применение нечёткой логики (рассмотрено в работах: M.S. AïtCheikh, C. Larbes, G.F. TchoketchKebir, A. Zerguerras); использование систем с моделью-эталоном, чему посвящены работы: Б.Н.Петрова, В.Ю.Рутковского, И.Н.Крутовой, С.Д.Землякова, Е.М.Фирсовой; методы *параметрической адаптации*, описанные в работах Л. А.Растригина, О.В.Абрамова, Ф.И.Бернацкого, В.В.Здора, Е.М. Воскресенского.

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 аналитического моделирования исследуемых процессов в фотоэлектрической системе, реализующего физику требуемых процессов, содержащего разрабатываемые адаптивные алгоритмы, позволяющее 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 вольт-ваттной характеристики (ВВХ)ФЭУ, что улучшает работу системы с нечетким управлением.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные адаптивные алгоритмы экстремального регулирования мощности для управления процессом энергопреобразования 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: солнечная энергетика, робототехника, космонавтика. Результаты диссертационного исследования также могут использоваться в задачах автономного энергоснабжения, проектирования фотоэлектрических систем, системах с экстремальным управлением.

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

Методология и методы исследования. В рамках выполнения диссертационного исследования, для решения поставленных задач использовались методы математического и аналитического 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 аппарата теории нечетких множеств, 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 ВВХ 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, получена 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 15 работ, среди которых 2 – в журналах из перечня ВАК; 2 – в изданиях, индексируемых Scopus; 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена и обоснована актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, описывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость; излагаются основные положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности результатов и их апробация.

В первой главе дается анализ состояния фотоэлектрических систем и энергетически эффективных технологий, приводятся базовые понятия о фотоэлектрических системах, выделяются преимущества таких систем и их недостатки.

Далее подробно рассматриваются методы повышения энергетической эффективности ФЭУ: режим экстремального регулирования мощности, солнечный трекер, оптимизация конструкции модулей, применение концентраторов.

Затем рассматривается вопрос адаптивного управления для фотоэлектрической системы: выделяется задача управления, осуществляется выбор стандартного алгоритма управления, приводится классификация адаптивных алгоритмов, формулируется подход к совмещению стандартного алгоритма и адаптивного алгоритма.

Результаты исследований, приведенные в первой главе, позволяют сформулировать основные задачи диссертационной работы, решение которых описывается в следующих главах.

Вторая глава посвящена решению задачи математического моделирования фотоэлектрической установки, а также вопросам адаптивных алгоритмов управления.

Здесь рассматриваются общие понятия и подходы математического моделирования.

Далее приводится моделирование элементов фотоэлектрической системы, рассматривается концепция построения модели фотоэлектрической системы, описывается поэлементное моделирование системы, включающее модель фотоэлектрического модуля (ФМ), модель управляющего устройства.

Структурная схема модели представлена на рисунке 1.

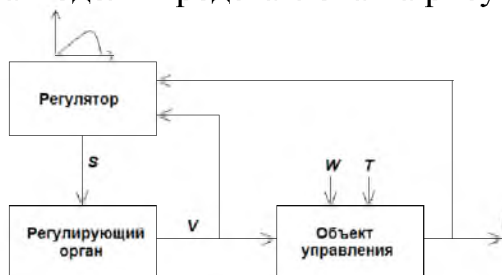


Рисунок 1 – Структурная схема экстремального регулирования мощности ФЭУ: Регулятор – контроллер с сигналом задания на поиск максимума; Регулирующий орган – импульсный преобразователь; Объект управления – фотоэлектрический модуль; S – ШИМ-сигнал; V – сигнал по напряжению; I – сигнал по току; W , T – внешние возмущения по освещенности и температуре соответственно.

Предложены следующие математические модели основных элементов фотоэлектрических систем:

- модель фотоэлектрического модуля

$$I = I_{ph} - I_d,$$

$$I_{ph} = (I_{к.з} + K_i \cdot \Delta T) W \cdot \sin(\alpha),$$

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

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

$$I_{dn} = \frac{I_{к.з}}{\exp \left[\frac{V_{х.х}}{a \cdot V_{tn}} \right] - 1}.$$

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

где $I_{к.з}$ – номинальный ток короткого замыкания; $V_{х.х}$ – номинальное напряжение холостого хода; $\Delta W = 1,2$ эВ – энергия, соответствующая ширине запрещённой зоны; T – температура фотоэлемента; T_n – номинальная температура 298 К; T_0 – температура окружающей среды, К; V – приложенное напряжение, В; R_s – сопротивление диода, Ом; I – ток на фотоэлементе, А; $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, – заряд одного электрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, – постоянная Больцмана; a – фактор идеализации, обеспечивающий согласование с реальными характеристиками;

- модель регулировочной характеристики импульсного преобразователя понижающего типа:

$$V_{\Phi M}^* = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}^*}{\gamma^2} \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{к.з}} \right)^{\frac{V_{х.х} - V_{\Phi M}}{V_{х.х} - V_0}} \right),$$

где γ – относительная длительность открытого состояния транзистора; $R_{L1}^* = R_{L1} \cdot I_{к.з} / V_{AB}$ – потери в дросселе на сопротивление; R_{L1} – сопротивление дросселя; $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания, А; $V_{х.х}$ – напряжение холостого хода, В; I_0 – оптимальное значение тока, А; V_0 – оптимальное значение напряжения; $V_{\Phi M}^*$ –

отношение напряжения на ФМ к напряжению на АБ; $V_{\text{ФМ}}$ – напряжение на ФМ, В; $V_{\text{АБ}}$ – напряжение на аккумуляторной батарее.

Компьютерная модель реализована в среде MATLAB/Simulink. Для моделирования динамических характеристик предложенная модель дополнена силовыми элементами электрических цепей из библиотеки элементов SimPowerSystems.

Особое внимание в этой главе уделено вопросу разработки адаптивных алгоритмов для управляющей системы. Приводятся три подхода к адаптации стандартного управляющего алгоритма.

В качестве стандартного алгоритма управления, поддерживающего режим экстремального регулирования мощности, выбирается алгоритм «возмущение и наблюдение», как наиболее распространенный. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.

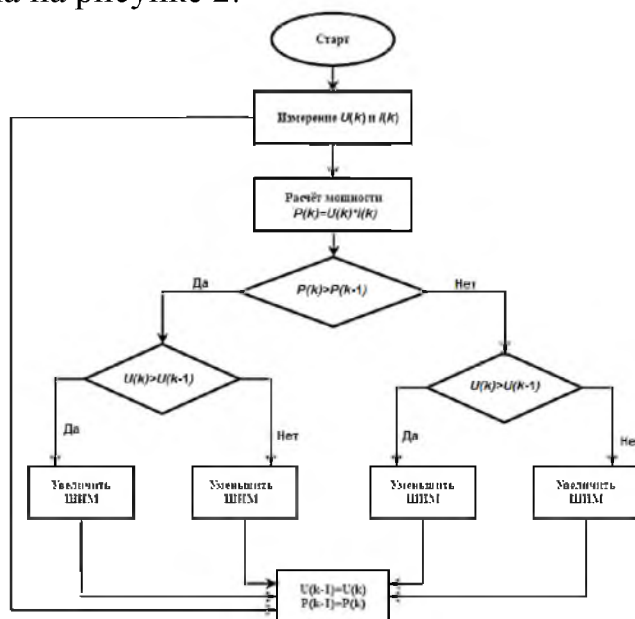


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма «возмущение и наблюдение»

Для улучшения алгоритма «возмущение и наблюдение» предлагаются следующие варианты адаптации:

Алгоритм с перенастройкой эталонного шага предлагает параметрическую адаптацию шага поискового алгоритма, с целью уменьшения времени регулирования и нейтрализации «рыскания» около рабочей точки, характерного для шаговых алгоритмов.

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

$$E = \frac{P_k - P_{k-1}}{V_k - V_{k-1}};$$

$$k = \frac{E}{I_k},$$

где P_k – текущее расчетное значение мощности, P_{k-1} – расчетное значение мощности на предыдущем шаге, V_k – текущее значение напряжения, V_{k-1} – значение напряжения на предыдущем шаге, E – скорость приращения мощности от приращения напряжения, I_k – текущее значение силы тока.

Блок-схема алгоритма приведена рисунке 3.

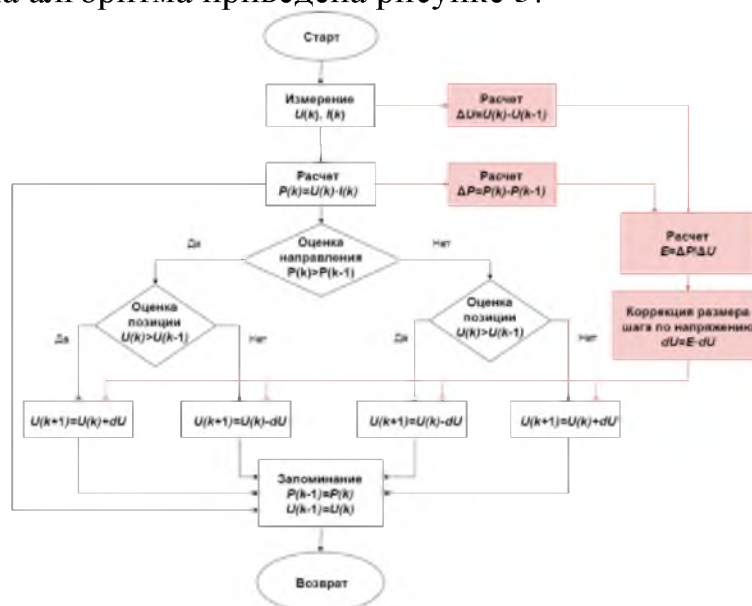


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма «возмущение и наблюдение» с перенастройкой эталонного шага

Алгоритм с предсказывающей адаптацией предполагает использование в контуре управления модель-эталон системы, позволяющую с некоторым расхождением с реальной системой определить рабочую точку. Такой подход минимизирует время регулирования, но требует наличия дополнительных датчиков, собирающих информацию для модели-эталона.

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 4.

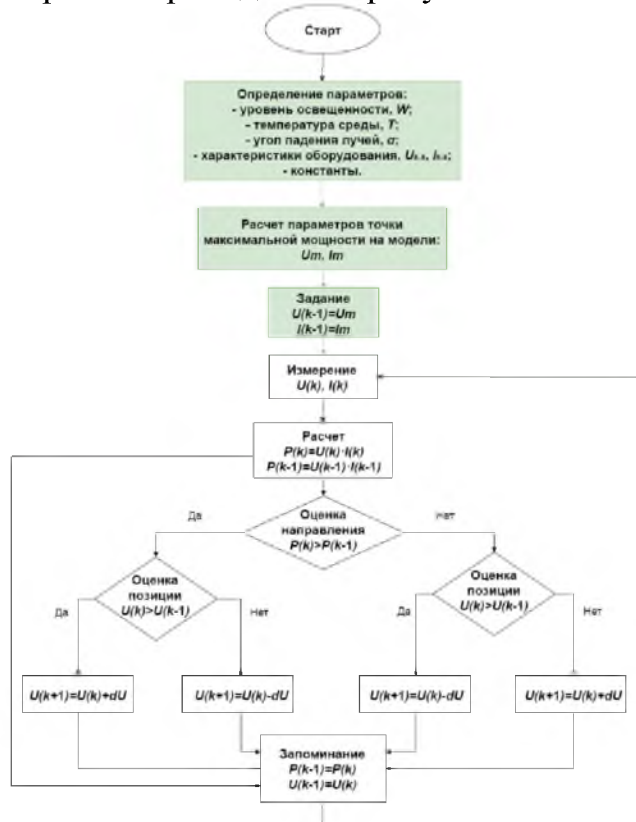


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма «возмущение и наблюдение» с предсказывающей адаптацией

Алгоритм с настройкой нечетким регулятором использует возможности нечеткой логики для обеспечения эффективного управления режимом экстремального регулирования мощности. В этом методе строится нечеткая модель, связывающая характеристические параметры алгоритма «возмущение и наблюдение» с масштабирующим коэффициентом шага алгоритма. 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):

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

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

В качестве выходной переменной блока нечеткой логики выступает масштабирующий коэффициент шага алгоритма, далее обозначаемый D .

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 5.

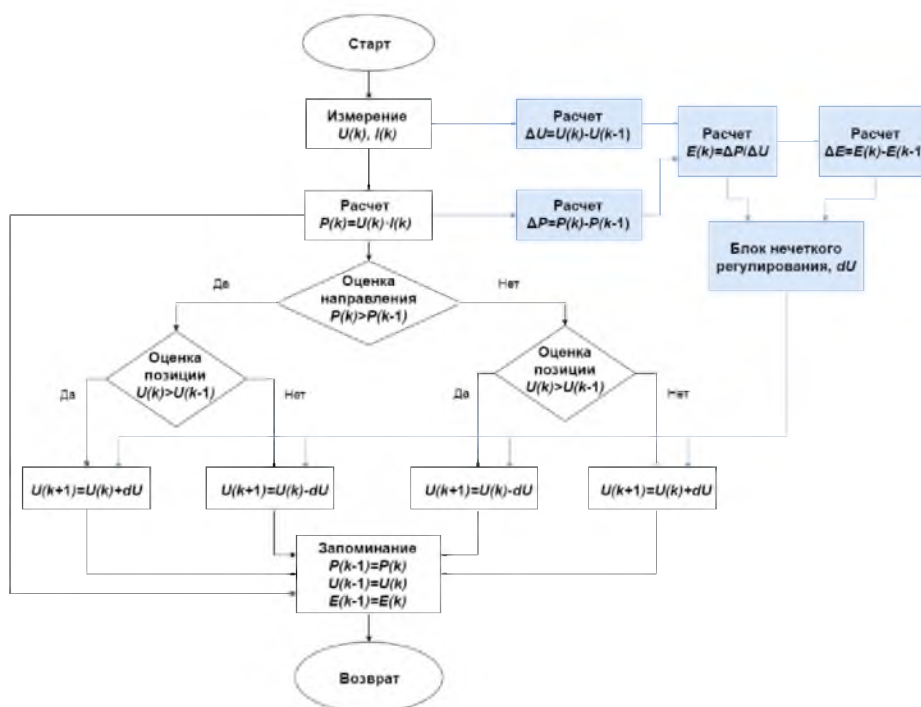


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма «возмущение и наблюдение» с настройкой нечетким регулятором

Алгоритм настройки нечеткого регулятора с помощью оценки диапазона регулирования и дрейфа экстремума мощности позволяет дополнительно улучшить алгоритм с настройкой нечетким регулятором.

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

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

Оценка левой и правой границ диапазона осуществляется по лучшим (низкая температура, высокий уровень освещенности) и худшим (высокая температура, слабая освещенность) условиям эксплуатации. Семейство ВВХ ФЭУ при таких условиях приведено на рисунке 6.

Условие дрейфа ВВХ определено для реальных условий, когда освещенность влияет на нагрев фотоэлементов, дополнительно повышая их температуру. Так, для дрейфующей ВВХ, аппроксимированной квадратичной параболой, с допущением, что дрейф сопровождается малым искажением формы, получено уравнение, позволяющее определить допустимый размер шага поискового алгоритма для устойчивого регулирования.

$$\Delta P_{\text{ФМ}} = 2a(t)\Delta V_{\text{ФМ}}[V_{\text{ФМ}} - V_{\text{ФМ_опт}}(t)]2a(t)\Delta V_{\text{ФМ_опт}}(\Delta t)[V_{\text{ФМ}} - V_{\text{ФМ_опт}}(t)] - \\ - a(t)[\Delta V_{\text{ФМ}} - \Delta V_{\text{ФМ_опт}}(\Delta t)]^2 + \Delta P_{\text{ФМ_max}}(\Delta t),$$

где $\Delta V_{\text{ФМ_опт}}(\Delta t)$ – дрейф точки экстремума по напряжению; $\Delta P_{\text{ФМ_max}}(\Delta t)$ – дрейф точки экстремума по мощности; $\Delta V_{\text{ФМ}}$ – поисковой шаг по напряжению; $\Delta P_{\text{ФМ}}$ – изменение мощности при изменении напряжения ($\Delta V_{\text{ФМ}}$); $V_{\text{ФМ}}$ – текущее напряжение.

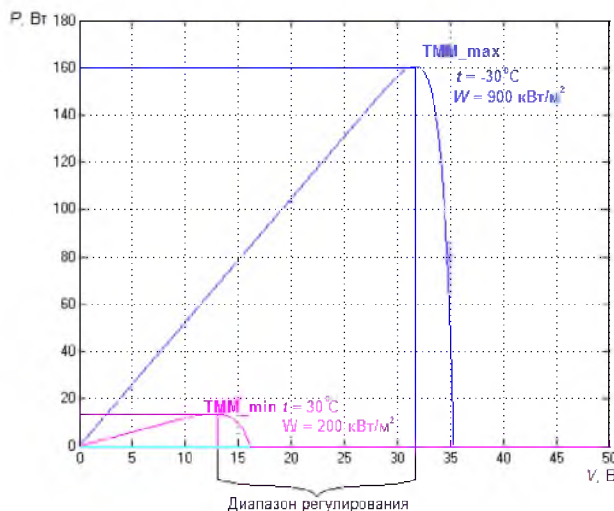


Рисунок 6 – К определению диапазона регулирования

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

1. Производится анализ семейства ВВХ фотоэлектрической системы при лучших и худших условиях эксплуатации, определяются характеристические параметры $I_{\text{к.з.}}$, $U_{\text{х.х.}}$, $I_{\text{опт}}$, $U_{\text{опт}}$ для этих ВВХ.
2. Производится оценка диапазона регулирования исходя из полученных в п.1 результатов.
3. Проводится оценка дрейфа ВВХ, 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 регулирования или ошибку регулирования, соответственно.

Результаты второй главы сводятся к полученным математическим моделям элементов фотоэлектрической системы и адаптивным алгоритмам управления для этой системы.

Третья глава посвящена решению задачи аналитического моделирования системы. Рассматривается задача аналитического моделирования элементов фотоэлектрической системы: фотоэлектрического модуля, управляющего устройства, аккумуляторной батареи, стандартной нагрузки. Итоговая модель фотоэлектрической системы, реализованная в среде Matlab/Simulink, приведена на рисунке 7.

Далее на базе полученной аналитической модели проводится исследование различных адаптивных алгоритмов. Приводится их сравнительный анализ и оценка эффективности.

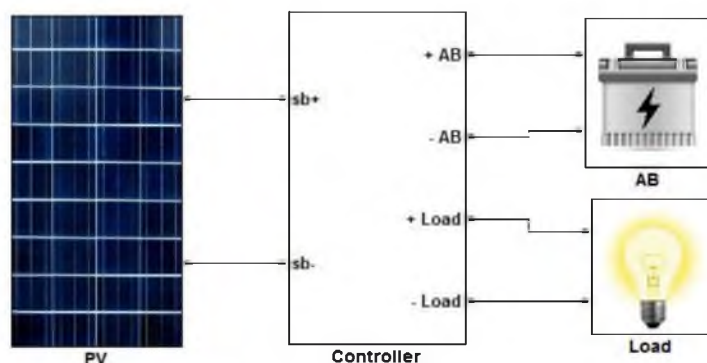


Рисунок 7 – Модель фотоэлектрической установки

На рисунке 8 приведены графики работы алгоритмов.

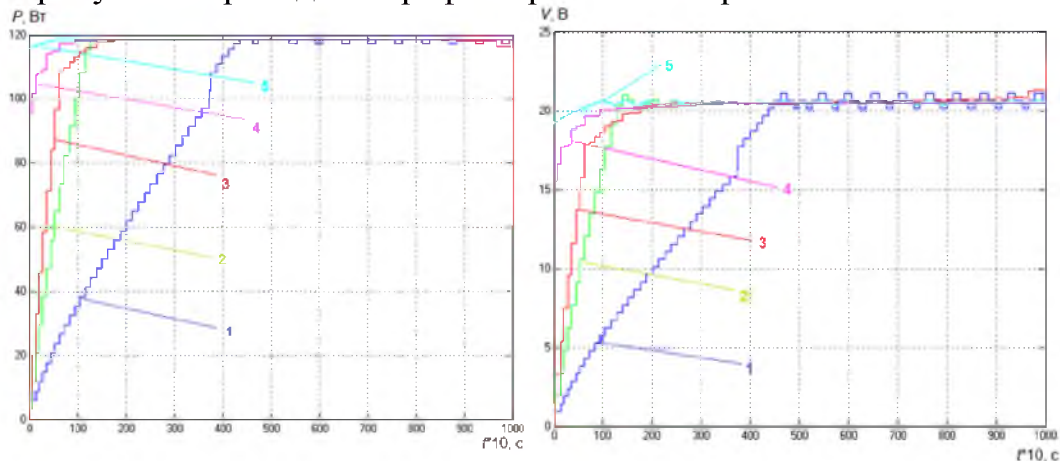


Рисунок 8 – Графики работы алгоритмов: 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией

Оценка управления осуществляется по первому и второму интегральным критериям и времени выхода на экстремум. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Оценки качества

Название алгоритма	I_1	I_2	$T_{п}, c$
ВиН	15000	27050	50
С перенастройкой поискового шага	424,7	409,7	20
С предсказывающей адаптацией	12,35	21,44	5
С настройкой нечетким регулятором	321,5	149,2	20

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

Далее исследовано поведение алгоритмов при возмущениях, вызванных изменением температуры, освещенности и комбинации этих параметров. Результаты отработки алгоритмов приведены на рисунке 9.

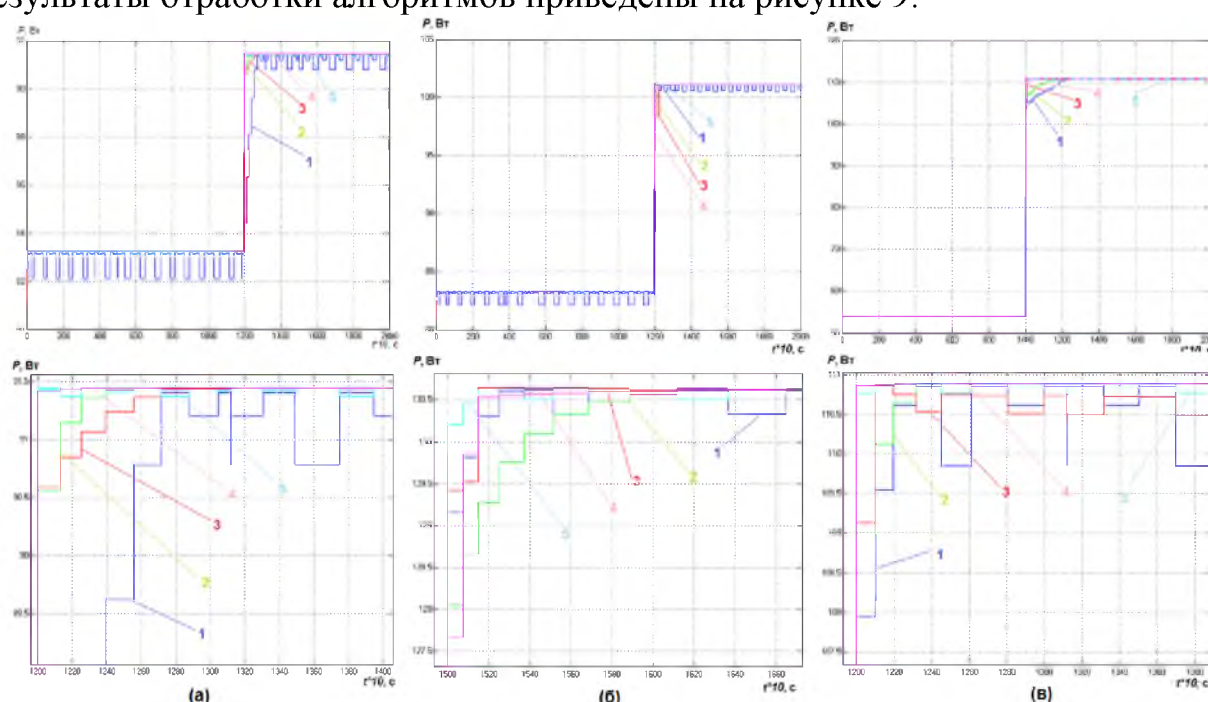


Рисунок 9 – Графики работы алгоритмов при возмущении: (а) – по температуре; (б) – по освещенности; (в) – комбинированное возмущение. 1 – обычный алгоритм ВиН, 2 – алгоритм ВиН с перенастройкой шага, 3 – алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 4 – улучшенный алгоритм ВиН с настройкой нечетким регулятором, 5 – алгоритм ВиН с предсказывающей адаптацией

Оценка качества управления в условиях возмущающего воздействия проведена по интегральным критериям и времени выхода на экстремум, результаты сведены в таблицу 3.

Результатами работы по третьей главе являются полученные модели элементов фотоэлектрической системы, пригодная в исследовательских и проектировочных целях модель фотоэлектрической установки, сводная база знаний о разработанных адаптивных алгоритмах с рекомендациями к применению.

Таблица 3 – Оценки качества

Название алгоритма	Возмущение по температуре			Возмущение по освещенности			Возмущение по комбинации параметров		
	I_1	I_2	$T_{п, с}$	I_1	I_2	$T_{п, с}$	I_1	I_2	$T_{п, с}$
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 нечетким регулятором	3,363	0,05	3	133,1	154	4	137,6	11,94	2

Четвертая глава описывает решение прикладной задачи реализации фотоэлектрической системы с адаптивным алгоритмом управления, повышающим энергетическую эффективность системы.

Здесь рассматривается построение управляющего устройства фотоэлектрической установки на базе импульсного преобразователя и контроллера myRio фирмы «NationalInstrument».

На основе приведенной схемы строится прототип, пригодный для исследования. Прототип установки представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Прототип фотоэлектрической установки

Далее рассматривается серия опытов на представленном прототипе, в качестве сравнительного эталона выступает МРТ контроллер, приведенный на рисунке 11.. Оценка эксперимента осуществлялась по таким показателям как: математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, доверительные границы. Результаты эксперимента представлены на рисунке 12.

Результаты эксперимента показывают адекватность работы прототипа, а также указывают на увеличение эффективности отбора энергии при применении адаптивного алгоритма управления.



Рисунок 11 – Эталонный и разрабатываемый контроллеры

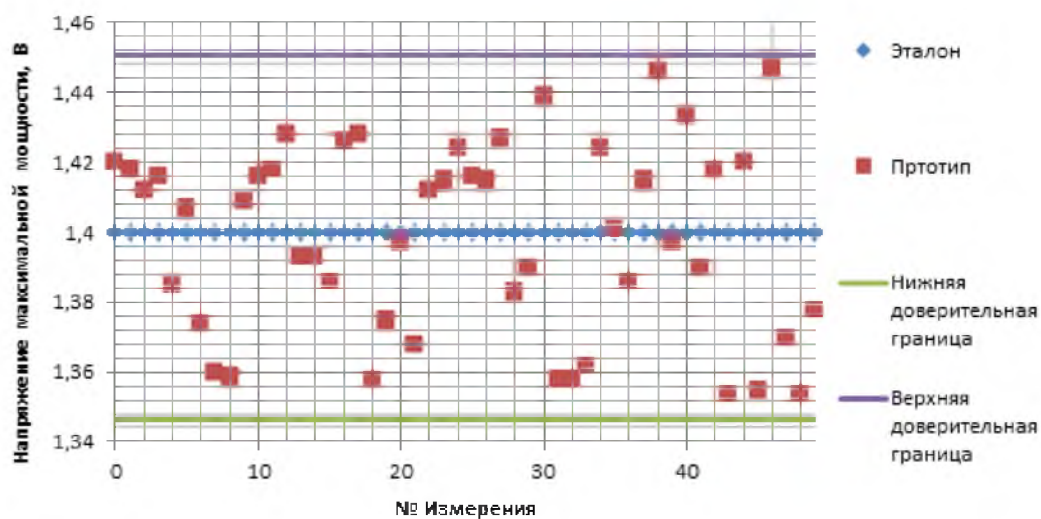


Рисунок 12 – К оценке экспериментальных данных

Результаты работы предложено использовать для реализации мобильной станции беспилотного летательного аппарата, концепция которого представлена на рисунке 13.



Рисунок 13 – Концепция мобильной станции БПЛА

Заключение содержит основные результаты, оценки и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы. Здесь даны рекомендации к дальнейшим исследованиям и разработкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

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 аналитического моделирования результаты.

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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Применение аппарата нечёткой логики для улучшения свойств МРРТ алгоритма "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].

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

3. 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 26–27 апреля 2018 г. г. Томск, Россия: Изд-во «СТТ», 2018. – [С. 77-80].

4. Имитационное моделирование импульсного преобразователя фотоэлектрической установки / Р. У. Гимазов, С. В. Шидловский // ИННОВАТИКА-2019 Сборник материалов XV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 25–27 апреля 2019 г. г. Томск, Россия: Изд-во «СТТ», 2019. – [С. 109-113].

5. 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].

6. 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].

7. 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].

8. 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].

9. Гимазов Р. У. Автоматизированные системы контроля и управления фотоэлектрическими установками с повышенной энергетической эффективностью / Р. У. Гимазов ; науч. рук. С. В. Шидловский // Интеллектуальные энергосистемы : труды III Международного молодежного форума, 28 сентября - 2 октября 2015 г., г. Томск : в 3 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2015. — Т. 1. — [С. 113-116].

10. Гимазов Р. У. Имитационное моделирование основных элементов фотоэлектрических систем / Р. У. Гимазов, С. В. Шидловский // IX Международная научно-практическая конференция "Информационно-измерительная техника и технологии" в рамках Международного форума "Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции", 21-24 ноября 2018 года, г. Томск : сборник тезисов конференции. Томск, 2018. С. 11-12.

11. Гимазов Р. У. , Шидловский С. В. Оптимизация процессов управления в фотоэлектрических установках для повышения энергетической эффективности систем распределенной генерации // Телекоммуникации. – 2018 - № 7. - p. 16-20
12. Гимазов Р. У. , Шидловский С. В. Распределенная система управления фотоэлектрической установкой на основе плат быстрого прототипирования// Телекоммуникации. – 2019 - № 7. - p. 15-19
13. 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
14. 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
15. 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