

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Попов Михаил Михайлович

**АВТОНОМНЫЕ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
С УПРАВЛЯЕМЫМ БАЛАНСОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики

Научный руководитель:

Лукутин Борис Владимирович

доктор технических наук, профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Официальные оппоненты:

Русина Анастасия Георгиевна

доктор технических наук, доцент, декан факультета энергетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Суслов Константин Витальевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «05» сентября 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.10 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ... ДС.ТПУ.10

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Никитин Д. С.', written over a horizontal line.

Никитин Д. С. к.т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение стабильного энергоснабжения для децентрализованных потребителей в регионах с дефицитом энергии может быть достигнуто за счет использования гидроэнергетического потенциала малых рек и ручьев, а также путем создания высокоэффективного оборудования для малых и микроГЭС в этих районах.

На это указывают глобальные тенденции перехода к устойчивому и экологически чистому энергоснабжению, а также изменения в макроэкономической ситуации в России, связанные с существенным подорожанием энергоносителей. Это объективно приведет к необходимости развития малой гидроэнергетики.

Положительные примеры эффективного использования энергии малых рек и ручьев способствовали формированию понимания среди потенциальных потребителей, административных органов, министерств и ведомств о необходимости и возможности применения малой гидроэнергетики для электрификации населенных пунктов, развития небольших производств и повышения качества жизни населения.

Однако в России этот процесс имеет свои особенности, связанные не только с большими запасами углеводородов, но и с разнообразием природно-климатических условий, включая зоны с экстремальными климатическими характеристиками, что усложняет задачи для разработчиков оборудования для малой энергетики.

Новые материалы и технологии позволяют создавать новое оборудование на базе более совершенных технологических схем и эффективнее использовать гидравлическую энергию. Однако этот процесс сдерживается отсутствием гидроэнергетического оборудования, разработанного на основе последних научных и технологических достижений, которое бы эффективно обеспечивало производство электроэнергии высокого качества в широком диапазоне напоров и расходов речных стоков.

Решение этой задачи связано с проведением анализа рабочего процесса микроГЭС, отбором наиболее совершенных конструктивных схем, анализом их характеристик, разработкой базовых унифицированных решений и оптимизацией составляющих элементов.

Количество электроэнергии, вырабатываемой микроГЭС в единицу времени, носит стохастический характер из-за вариабельности расходов воды в реках. Электропотребление в автономных энергосистемах также изменяется в соответствии с графиком нагрузок объекта электрификации. Указанные обстоятельства затрудняют генерацию электроэнергии необходимого качества и ограничивают эффективность преобразования рабочего потока воды в электроэнергию для потребителя.

Для повышения энергоэффективности микроГЭС широко используются методы стабилизации режима работы гидроагрегата: стабилизация рабочего потока воды гидротурбины с помощью напорного трубопровода и стабилизация графика электропотребления с помощью балластных нагрузок. Деривационные микроГЭС с балластным регулированием режима работы имеют невысокую стоимость, однако качество генерируемой электроэнергии ограничивается возможностями стабилизации активной и реактивной составляющих суммарной электрической мощности гидроагрегата. Другим недостатком балластного регулирования является необходимость сбрасывать значительную часть генерируемой электроэнергии на резистивный балласт, на котором она преобразуется в тепло - полезное для потребителя, либо рассеивается в окружающую среду. В результате электрический коэффициент использования установленной мощности микроГЭС снижается.

Современными тенденциями повышения технико-экономических характеристик микроГЭС являются интеграция в их состав силовой преобразовательной техники и систем накопления электроэнергии. Инверторные микроГЭС позволяют улучшить качество генерируемой электроэнергии и повысить энергоэффективность использования рабочего потока воды.

Среди отечественных учёных, внёсших заметный вклад в развитии теории и практики микрогидроэнергетики следует отметить известных российских и зарубежных ученых, таких как: В.С. Квятковского, Н.И. Воропая, Ж.И. Алфёрова, В.И. Виссарионова, Б.В. Лукутина, Н.Е. Жуковского, В.В. Елистратова, С.Г. Обухова и др. Также трудно не оценить весомый вклад работ Я.И. Бляшко в вопросах применения гидротурбин в составе автономных систем электроснабжения.

За рубежом данная тематика также актуальна, что подтверждается работами A.T. Elsayed, A.A. Mohamed, O.A. Mohammed, D. Borkowski, E. Mudaheranwa, J. Lee, J.-W. Jung и др.

Развитие инверторных микроГЭС, с целью улучшения технико-экономических характеристик хорошо зарекомендовавших себя деривационных энергоустановок с балластным регулированием параметров генерируемой электроэнергии, представляется актуальной задачей. Направлениями решения поставленной задачи являются интеграция систем накопления электроэнергии и балласта с оптимизацией установленной мощности микроГЭС для объекта электрификации.

Комплекс решений рассматриваемой научно-технической задачи, должен быть обоснован разработкой структуры и энергоэффективных алгоритмов управления системы электроснабжения на базе микроГЭС и основываться на интеллектуальных подходах регулирования баланса генерируемой электроэнергии.

Объект исследования – автономный электротехнический комплекс на основе инверторной микроГЭС с аккумуляторными накопителями электроэнергии.

Предмет исследования – структурный синтез и оптимизация электротехнических комплексов на основе микроГЭС с силовыми преобразователями и накопителями электроэнергии, разработка алгоритмов эффективного управления.

Цель работы – повышение технико-экономической эффективности децентрализованных электротехнических комплексов электроснабжения на базе микроГЭС с помощью введения в их энергетический баланс управляемой величины электроэнергии накопительных устройств и интеллектуальных технологий управления резистивным балластом.

Основные задачи исследования:

1. Проанализировать факторы, влияющие на технико-экономические показатели работы микроГЭС, изучить структуры построения автономных комплексов электроснабжения, на базе микроГЭС, определить пути повышения их энергоэффективности.
2. Разработать структуры и математические модели энергопреобразования автономных микроГЭС с силовыми преобразователями и накопителями электроэнергии.
3. Разработать энергоэффективные алгоритмы функционирования микроГЭС с силовыми преобразователями и накопителями электрической энергии, используемыми в качестве управляемого балласта.
4. Разработать структуру и алгоритм функционирования микроГЭС с балластной нагрузкой, управляемой по технологии поиска точки максимальной мощности гидроагрегата.
5. Провести анализ технико-экономической эффективности предлагаемых инверторных микроГЭС с управляемым энергетическим балансом по сравнению с промышленными образцами.

Научная новизна:

1. Предложены структура и алгоритм функционирования системы управления микроГЭС с регулируемым балластом, содержащим резистивные и аккумуляторные элементы, что позволяет практически двукратно повысить электрический коэффициент использования установленной мощности гидроагрегата микроГЭС по сравнению с промышленными образцами с резистивным балластом.
2. Разработана математическая модель поиска точки максимума мощности гидроагрегата микроГЭС, отличающиеся от известных учётом энергетических характеристик гидроагрегатов и динамики изменения водности горных рек.
3. Предложена структура и алгоритм функционирования микроГЭС с МРРТ-контроллером управления балластом, обеспечивающая работу гидроагрегата в режиме максимальной мощности при изменении энергии рабочего потока воды, что позволяет увеличить выработку электроэнергии на величину до 10%.

Теоретическая значимость работы. Основные положения и выводы диссертационного исследования вносят определенный вклад в дальнейшее развитие теории электротехнических комплексов электроснабжения, на основе автономных микроГЭС, с управляемым энергетическим балансом.

- 1) Показаны преимущества микроГЭС с интеграцией резистивного балласта и аккумуляторных накопителей электроэнергии, позволяющие улучшить их технические и

экономические характеристики.

2) Разработаны структуры и алгоритмы энергопреобразования, адаптированы математические и компьютерные модели реализации МРРТ-технологий управления энергетическим балансом автономных электротехнических комплексов на основе инверторной микроГЭС с нерегулируемой гидротурбиной.

Практическая значимость работы. Разработанные и реализованные в программном комплексе MATLAB оригинальные компьютерные модели микроГЭС, а также алгоритмы взаимодействия, преобразовательного, аккумулирующего и генерирующего оборудования могут использоваться в учебном процессе образовательных учреждений, проектными и производственными организациями – разработчиками и поставщиками оборудования микроГЭС.

Методология и методы исследований. При выполнении исследования использовались методы электротехники, инженерного анализа и обобщения результатов, метод полиномиальной аппроксимации экспериментальных данных, метод математического и компьютерного моделирования, метод оптимизации «возмущение и наблюдение», также общенаучные методы познания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Гибридная резистивно-электрохимическая система балластной стабилизации режимов работы гидроагрегата деривационной микроГЭС, управляемая по разработанному алгоритму, отличается от известных, возможностями увеличивать пиковую нагрузку на микроГЭС выше номинальных значений для гидроагрегата или сокращать длину его напорного трубопровода.

2. Комплексная математическая модель работы инверторной микроГЭС деривационного типа с гибридной резистивной и электрохимической системой накопления электроэнергии, построенная на основе паспортных и экспериментальных данных промышленных гидроагрегатов с напорным трубопроводом и преобразующего электрооборудования, позволяет исследовать и оптимизировать по технико-экономическим критериям суточные энергетические балансы автономной системы электроснабжения на основе микроГЭС. Использование в комплексной модели соответствующих элементов библиотеки MATLAB, позволяет исследовать динамические процессы, вызванные переключениями элементов балластной нагрузки МРРТ-контроллера.

3. Структура и алгоритм функционирования МРРТ-контроллера управления мощностью балластной нагрузки гидроагрегата, отличающаяся от известных в возобновляемой энергетике, объектом управления и временными параметрами сканирования мощностной характеристики гидроагрегата, обеспечивают его работу с максимальным использованием энергии рабочего потока воды, не зависимо от внешних факторов, что позволяет увеличивать максимальную мощность, снимаемую с гидроагрегата на величину до 10%.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена необходимым объемом исследований, включающих научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, а также корректным применением известных теорий электротехники и методов математического и компьютерного моделирования электротехнических комплексов, результатами численных экспериментов с использованием общепризнанных программных комплексов.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика» (г. Уфа, 2023 г.), на Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023» (г. Севастополь, 2023 г.), на IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергетики» (Нижний Новгород, 2023 г.), на II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Потенциал и вызовы развития возобновляемой энергетики» (г. Невинномыск, 2024 г.), на IV Всероссийской молодежной конференции с международным участием «Бутаковские чтения» (г. Томск, 2024 г.).

Личный вклад автора. Диссертационная работа является результатом самостоятельных исследований автора, где научные положения и результаты, определяющие научную новизну и практическую значимость работы, получены соискателем лично. Автором лично разработана

модель для оптимизации микроГЭС и накопителей электроэнергии в составе электротехнического комплекса электроснабжения. Лично соискателем разработан алгоритм энергоэффективного управления элементами микроГЭС, использующий интеллектуальное управление поиска максимума отбора мощности. Личное участие автора подтверждено патентом РФ, публикациями и выступлениями на конференциях. Автором разработана принципиальная схема и конструкция физической экспериментальной модели инверторного генератора, для верификации математической модели. В опубликованных в соавторстве печатных работах, автору принадлежит научное обоснование принятых технических решений, разработка имитационных математических моделей, методик и алгоритмов. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований, выполнен автором совместно с научным руководителем.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах, в том числе в 1 статье в изданиях из Перечня ВАК: рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а также в 3 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus, а также получен 1 патент на изобретение РФ и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 75 наименования. Диссертация изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована его цель и ключевые задачи, отмечена научная новизна, практическая значимость степень разработанности темы диссертации в современной науке, указан объект и предмет исследования, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены основные тренды развития микрогидроэнергетики. Благодаря высокому удельному энергетическому потенциалу потока воды и его относительной стабильности, микроГЭС производят более дешёвую электроэнергию по сравнению с энергоустановками, использующими другие виды возобновляемых источников энергии. В настоящее время наиболее распространены микроГЭС с напорным трубопроводом, нерегулируемой гидротурбиной и статической полупроводниковой системой стабилизации генерируемой электроэнергии автобалластного типа. Снижение погрешностей стабилизации напряжения гидроагрегата до необходимого уровня, осуществляется автономным инвертором. Как показал обзорный анализ,

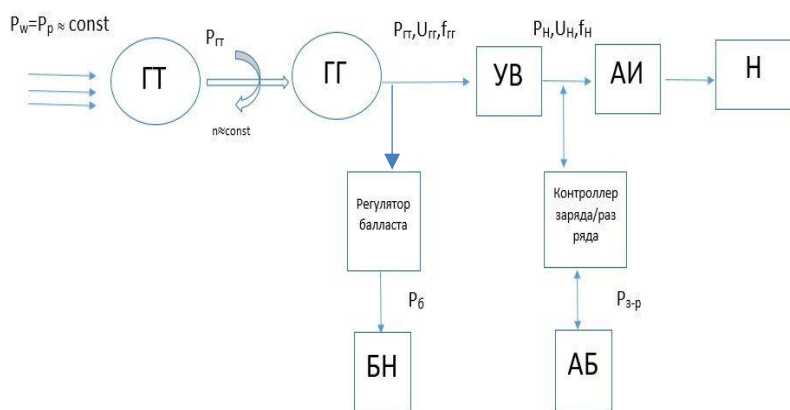


Рисунок 1 – Структурная схема инверторной микроГЭС с автобалластной системой регулирования гидроагрегата и аккумуляторным накопителем электроэнергии.

основными направлениями совершенствования микроГЭС является широкое использование в ее составе силовой преобразовательной техники и накопителей электрической энергии. Стабилизация в определенных пределах величины и частоты генерируемого напряжения осуществляется автобалластной системой, обеспечивающей стабилизацию

электромеханического баланса гидроагрегата деривационного типа с постоянной энергией рабочего потока воды (рисунок 1, где ГТ – гидротурбина, ГГ – гидрогенератор, УВ – управляемый выпрямитель, АИ – автономный инвертор, Н – нагрузка, БН- балластная нагрузка, АБ – аккумуляторная батарея). Снижение погрешностей стабилизации напряжения гидроагрегата до необходимого уровня, осуществляется автономным инвертором Соответственно, направление данной работы – повышение энергоэффективности микроГЭС с помощью генерирующей системы с выпрямительно-

инверторным преобразователем напряжения гидрогенератора и аккумуляторной системой накопления электроэнергии, которая, наряду с резистивным балластом, является частью балластной нагрузки и создание алгоритмического согласования функционирования элементов преобразования электроэнергии, что позволит улучшить технико-экономические характеристики таких микроГЭС.

Во второй главе построены математические модели энергопреобразования в энергетическом оборудовании микроГЭС с использованием технических данных промышленных микроГЭС, предоставленных АОЗТ «МНТО ИНСЭТ», в частности МикроГЭС ПР-10. Экспериментальные энергетические характеристики гидроагрегата выбранной микроГЭС в номинальном режиме при различных напорах приведены в таблице 1, где обозначены H – напор воды (м), n – частота вращения гидроагрегата (об/мин), $P_{\text{агр}}$ – номинальная мощность генератора (кВт), P_t – номинальная мощность турбины (кВт), Q – расход воды (м³/сек), η_t – коэффициент полезного действия турбины (%), $\eta_{\text{агр}}$ – коэффициент полезного действия генератора (%).

Возмущающим воздействием для деривационной микроГЭС является изменяющаяся в течение суток нагрузка. Модель формируется как последовательность рабочих режимов автономной системы электроснабжения в течение характерных суток с интервалом дискретизации 1 (один) час, для различных типов электропотребителей.

Для описания работы гидроагрегата в максимальном режиме работы необходимо рассчитать мощность гидротурбины, которая зависит от напора воды H и расхода воды Q .

Таблица 1 – характеристики гидроагрегата ПР – 10 АОЗТ МНТО ИНСЭТ

n=1500 об/мин						
H, м	n, об/мин	Q, м ³ /сек	P _t , кВт	P _{агр} , кВт	η _t , %	η _{агр} , %
10	1545	0,142	11,7	10,5	81	90
9	1540	0,139	9,81	8,8	80	90
8	1535	0,138	8,7	7,9	81	90
7	1530	0,136	7,6	6,8	81	90
6	1525	0,133	6,2	5,5	79	90
5	1520	0,130	4,6	4,1	72	90

Рабочий напор гидротурбины характеризуется следующими

составляющими:

$$H = H_H - h_{\text{пот}}. \quad (2)$$

Где, H – напор, Q – расход воды, определяется диаметром трубы и скоростью потока, $H_H = \text{const}$ – напор микроГЭС, характерный для данного вида турбин, определяется уклоном русла реки и длиной трубы в номинальном режиме работы станции; $h_{\text{пот}}$ – потери напора воды, за счет

гидравлического трения.

Экспериментальная мощностная характеристика нерегулируемой пропеллерной гидротурбины, рабочий поток воды которой стабилизирован напорным трубопроводом, приведена на рисунке 2. На рисунке 2 показаны зависимости мощности (P) турбины от частоты ее вращения

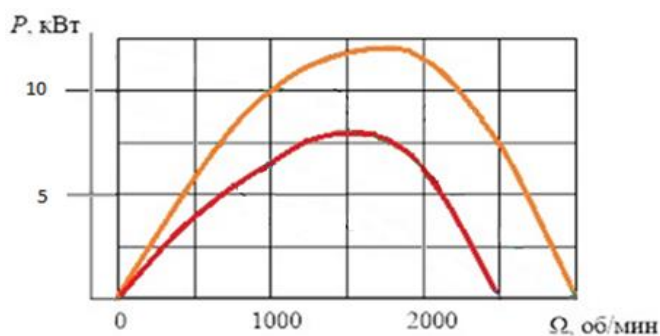


Рисунок 2 – Мощностная характеристика гидротурбины

(Ω) для двух значений открытия направляющего устройства, при неизменном напоре воды, составляющем 10 метров. Рабочая точка на характеристике гидротурбины определяется тормозной мощностью электромашинного генератора, соответствующей текущей мощности электропотребления.

Важным элементом микроГЭС является напорный трубопровод, часто являющийся наиболее дорогим элементом энергоустановки.

Это обстоятельство определяет необходимость уточнения его расчета с

учетом потери напора воды для микроГЭС за счет гидравлического трения. Величина гидравлических потерь в напорном трубопроводе h_n [м] определяется по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$H = \frac{\lambda \cdot l \cdot V^2}{2 \cdot d \cdot g} \quad (3)$$

где, l – длина напорного трубопровода, м; λ – коэффициент гидравлического трения; d – внутренний диаметр напорного трубопровода, м; V – скорость потока воды в трубопроводе, м/с:

$$V = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d^2} \quad (4)$$

где, g – ускорение свободного падения; λ – коэффициент гидравлического трения (определяется по формуле Шифрисона):

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{0,25} \quad (5)$$

где, k – абсолютная шероховатость трубы, мм.

Формула Шифрисона справедлива при условии: $Re > 500 \cdot (d/k)$, где Re – число Рейнольдса, при 20°C кинематическая вязкость воды $\nu = 1,004 \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2/\text{с}$:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (6)$$

где, V – скорость потока воды в трубопроводе, м/с; ν – кинематическая вязкость воды.

В рассматриваемом случае гидроагрегат инверторной микроГЭС работает в одном статическом режиме в течение суток независимо от графика нагрузки благодаря напорному трубопроводу и стабилизации генерируемой мощности балластными нагрузками. При указанных условиях, для исследования энергетических балансов автономной системы электроснабжения возможно полагать постоянными параметры в уравнениях (3–6) и использовать энергетические характеристики промышленного образца микроГЭС фирмы ИНСЭТ 10 ПР.

Для компьютерного моделирования режимов работы аккумуляторной батареи целесообразно использовать статические элементы библиотеки Matlab. Схема имитационной модели в системе MATLAB Simulink приведена на рисунке 3.

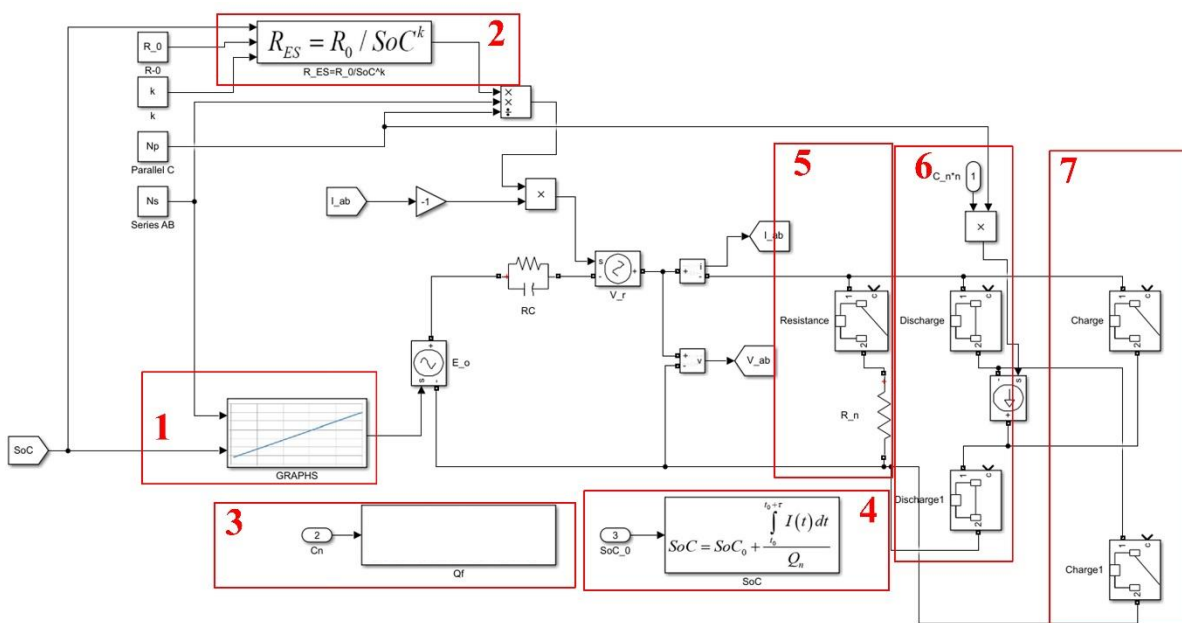


Рисунок 3 – Схема имитационной модели системы накопления энергии в АКБ

Схема имитационной модели, приведенная на рисунке 3, состоит из следующих основных элементов: блока 1 «Graphs», отвечающего за задание зависимости напряжения холостого хода литий-феррумных АБ от емкости заряда, блока 2 «RES», рассчитывающего сопротивление АБ в зависимости от степени заряда, блока 3 «Qf», рассчитывающего фактическую емкость батареи, блока 4 «SoC», отвечающего за вычисление текущей степени заряженности АБ и блоки 5, 6, 7 на

рисунке 3 представляют собой 3 режима работы модели АБ: разряд на заданное значение активного сопротивления (блок 5), разряд с заданным постоянным током (блок 6), заряд с заданным постоянным током (блок 7)

Так же с помощью моделирования получена временная диаграмма включения аккумуляторной батареи на заряд (рисунок 4).

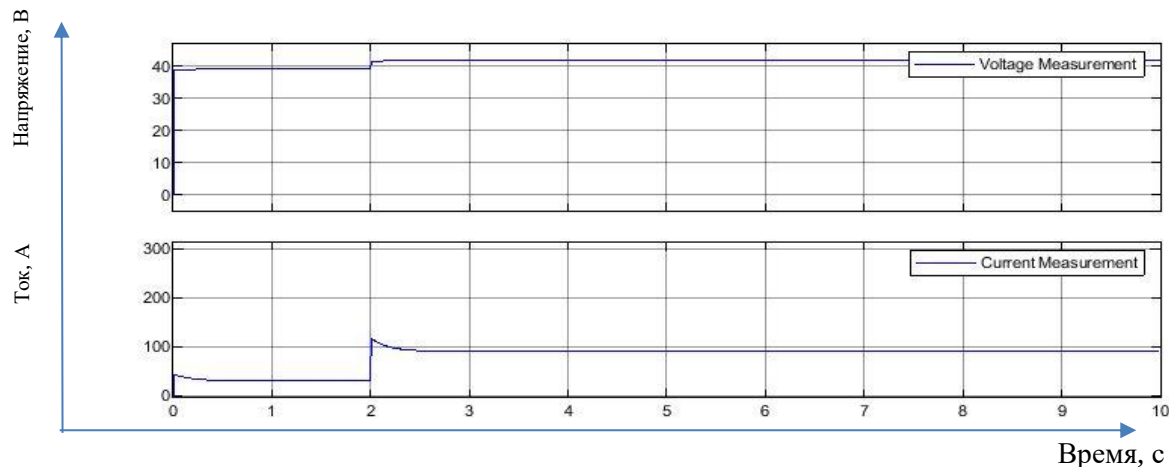


Рисунок 4 – Временная диаграмма включения аккумуляторной батареи на заряд

На диаграмме можно видеть переходный процесс в момент подключения АБ на заряд, временной интервал данного переходного процесса кратковременен, поэтому, для анализа изменения состояния АБ в течение суток, с часовой дискретизацией им можно пренебречь. В подтверждении исследований на математической модели, на экспериментальной установке – рисунок 5 был проведен масштабируемый эксперимент, с фиксацией зарядного тока, в момент подключения аккумуляторной батареи к электромашинному генератору. На рисунке 6 представлен переходный процесс в момент подключения генератора к аккумуляторной нагрузке. Длительность переходного процесса составляет 0,02 секунды, что подтверждает возможность не учитывать инерционность аккумуляторов при исследовании режимов работы на продолжительных временных интервалах: сутки с почасовой дискретизацией возмущающего воздействия – нагрузки. Модели следует строить на основе статических характеристик энергетического оборудования микроГЭС с учетом энергетических возможностей водотока, и географических особенностей использования выбранного участка русла.



Рисунок 5 – Экспериментальный стенд для исследования работы аккумуляторов в цепи постоянного тока инверторной микроГЭС.

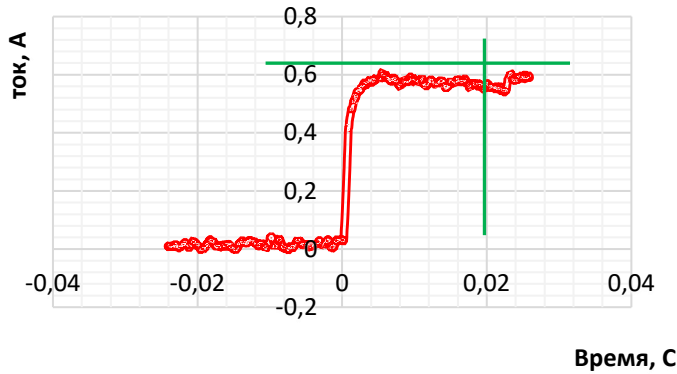


Рисунок 6 – Переходный процесс зарядного тока в момент подключения аккумулятора к генератору

Исследование воздействия на энергетическую систему управляющих устройств в пределах интервала дискретизации, например, воздействие регулятора величины балластной нагрузки, требует создания динамических моделей с учётом инерционности участвующих в переходном процессе элементов микроГЭС. Очевидно, определяющим временным параметром динамики таких процессов будет постоянная инерции вращающихся масс системы гидротурбина – гидрогенератор.

В нашем случае изменение заряда аккумуляторов происходит каждый час суток на величину доступной энергии, определяемой как разность между стабилизируемым уровнем генерации и величиной потребления в соответствии с суточным графиком нагрузки. Ограничением по мощности заряда служат эксплуатационные рекомендации по величине длительного зарядного тока, которые определяют максимальный зарядный ток как $3C$, где C – емкость аккумулятора в ампер-часах. Другим ограничением является глубина разряда, определяемая типом аккумуляторов. Для литий-феррумных аккумуляторов она ограничивается величиной 60–80 % относительно номинального значения емкости.

Учитывая общепринятое представление типовых суточных графиков электропотребления дискретными значениями с интервалом дискретизации 1 час и пренебрежимо малое время отклика системы накопления электроэнергии 0,01–0,02 секунды, уравнения для расчета суточных изменений энергии в аккумуляторном накопителе приобретают вид (7-8):

$$W_{AB} = \sum_{i=1}^{24} W_{ABi} \pm \Delta W_i \quad (7)$$

$$\pm \Delta W_i = (P_{га} - P_{ни}) \cdot 1 \text{ час} = \Delta P_i \cdot 1 \text{ кВт} \cdot \text{час} \quad (8)$$

$$\Delta P_i = (P_{га} - P_{ни}) - \text{приращение зарядной мощности } AB$$

где,

$P_{га}$ – мощность гидроагрегата,

$P_{ни}$ – мощность нагрузки;

ΔP_i – приращение мощности заряда АБ на i -ном интервале

При этом, следует учитывать, что:

Если $\Delta P_i < P_{зар.АБ}$, то зарядная мощность - ΔP_i

Если $\Delta P_i > P_{зар.АБmax}$ то зарядная мощность - $P_{зар.АБmax}$

(9)

$$P_{ГА} - \Delta P_{зар.АБmax} = \Delta P_{балi}$$

где,

$P_{зар.АБ}$ – мощность заряда аккумуляторной батареи;

$P_{балi}$ – мощность балластной нагрузки;

$P_{ном}$ – мощность нагрузки в номинальном режиме работы;

$P_{зар.АБ max}$ – мощность заряда аккумуляторной батареи максимальная.

Результаты моделирования аккумуляторного накопительного устройства микроГЭС для типового графика бытовой нагрузки приведены на рисунке 7.



Рисунок 7 – Диаграмма энергетического баланса автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС

Как следует из рисунка 7, уровень стабилизации средней мощности гидрогенератора, при максимальной емкости аккумуляторов накопителя 24 кВт·ч, полностью обеспечивает энергетические потребности нагрузки при рациональных режимах работы аккумуляторов. Использование резистивного балласта в рассматриваемых условиях не требуется. При других условиях – например, при повышении мощности стабилизации (при той же емкости аккумуляторов) потребуются включение в энергетический баланс автономной системы электроснабжения резистивного балласта в определённые часы суток. На основе предложенных моделей был сделан вывод о том, что переходный процесс, вызванный изменением нагрузки и компенсирующим действием контроллеров заряда-разряда аккумуляторной батареи, имеет минимальное влияние на параметры гидроэнергетической системы в дискретизации 1 час на действующее значение напряжения гидрогенератора, что позволяет не учитывать их при анализе энергетических балансов микроГЭС. Использование в составе микроГЭС накопителей электроэнергии позволяет минимизировать или исключить применение резистивного балласта, что позволяет увеличить коэффициент использования электрической мощности при неизменной генерируемой мощности гидроагрегата.

В третьей главе рассмотрены возможные системы стабилизации частоты генерируемого напряжения микроГЭС в зависимости от типа управления. Основные варианты построения генерирующих систем приведены на рисунке 8, где, ГТ – гидротурбина, ГГ – гидрогенератор, РБ – регулятор балласта, Н – нагрузка, БН- балластная нагрузка, В – выпрямитель, АИ – автономный инвертор, АКБ – аккумуляторная батарея, Кзр – контроллер заряда-разряда, Кз – контроллер заряда, МРРТ – контроллер поиска точки максимальной мощности.

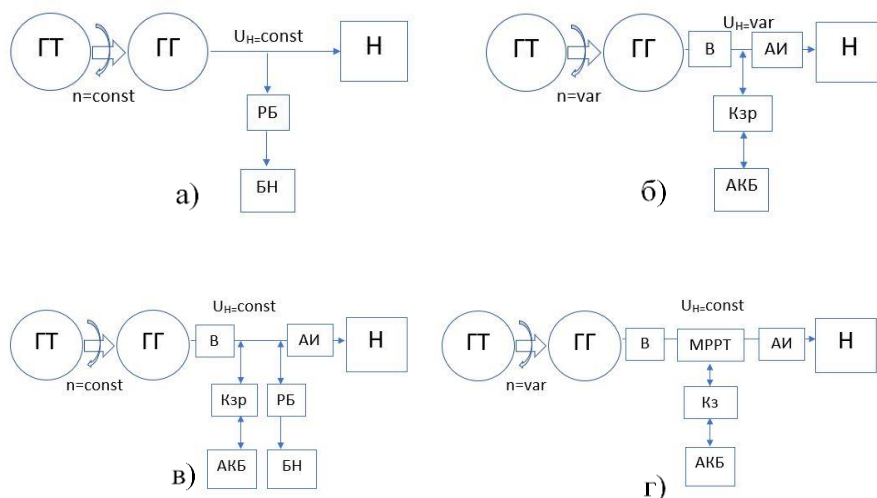


Рисунок 8 – Варианты построения системы стабилизации микроГЭС

регулятор балласта, Н – нагрузка, БН- балластная нагрузка, В – выпрямитель, АИ – автономный инвертор, АКБ – аккумуляторная батарея, Кзр – контроллер заряда-разряда, Кз – контроллер заряда, МРРТ – контроллер поиска точки максимальной мощности. Обеспечение постоянства развиваемой мощности и частоты вращения гидрогенератора позволяет использовать общепромышленные генераторы, предназначенные для

работы с постоянными оборотами, ограничивает диапазон изменения выходного напряжения генератора, что облегчает построение инверторной части гидроэнергетического источника

электропитания, а также даёт возможность выравнивать графики гидрогенерации с помощью аккумулирующей системы.

Выравнивание нагрузки гидрогенератора позволяет уменьшать установленную мощность генерирующего оборудования ориентировочно до среднесуточного потребления, что способствует уменьшению себестоимости производимой электроэнергии. Снижение рабочей мощности стабилизируемого режима гидрогенератора позволяет снижать энергетические характеристики напорного трубопровода, что дополнительно сокращает затраты на строительство микроГЭС. Структурная схема инверторной микроГЭС с комбинированным балластом приведена на рисунке 9, где УУ- управляющее устройство. Электромашинный генератор ГГ приводится во вращение нерегулируемой гидротурбиной ГТ. Частота вращения гидрогенератора может ограничиваться в

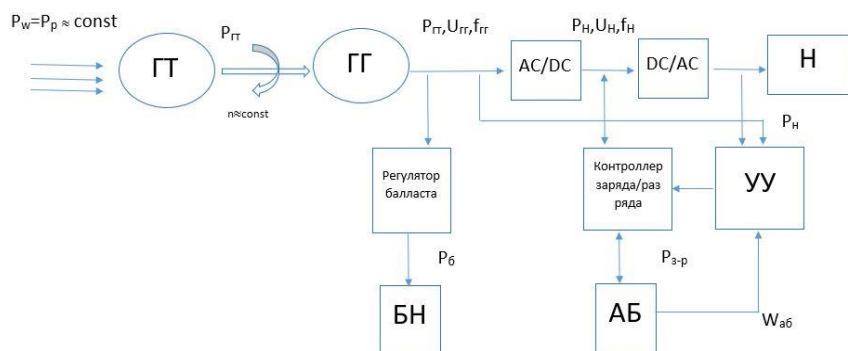


Рисунок 9 – Структурная схема инверторной микроГЭС с автобалластной системой регулирования гидроагрегата и аккумуляторным накопителем электроэнергии

диапазоне от $n_{\min}$ до $n_{\max}$ в зависимости от графиков нагрузки.

Получение электроэнергии переменного тока со стабильными параметрами на нагрузке Н осуществляется с помощью выпрямительно –

инверторного преобразователя частоты AC/DC - DC/AC. Режим работы гидрогенератора, при постоянных параметрах рабочего потока воды на гидротурбине, определяется

мощностью, потребляемой нагрузкой, включая аккумуляторы и балласт, в соответствии с мощностной характеристикой гидротурбины.

Баланс мощностей системы электроснабжения для режима работы микроГЭС, при котором мощность, потребляемая нагрузкой, меньше максимально допустимой мощности гидрогенератора $P_{ГГ\max}$, а аккумуляторы способны принимать заряд, описывается уравнением:

$$P_{ГГ} = P_{Н} + P_{з}$$

где,

$P_{ГГ}$ – мощность гидрогенератора;

$P_{Н}$ – мощность нагрузки;

$P_{з}$ – мощность заряда АКБ.

Аккумуляторный балласт позволяет осуществлять электроснабжение потребителей, мощность которых превышает установленную мощность гидроагрегата микроГЭС без его перегрузки. По сравнению с базовой станцией с балластным регулированием, максимальная мощность нагрузки которой не может превышать номинальную мощность гидроагрегата, инверторная микроГЭС с системой аккумулирования электроэнергии может улучшить технико-экономические характеристики базовой микроГЭС за счёт аккумуляторов, позволяющих покрывать пиковые нагрузки большей мощности.

Алгоритм расчетов рабочих режимов системы электропитания представлен на рисунке 10. Исходными данными для алгоритма являются принятая мощность стабилизации гидрогенератора $P_{ГГ}$ и текущая почасовая мощность электрических нагрузок на начальный момент времени в соответствии с суточным графиком электропотребления $P_{Н}$. Начальный момент времени может выбираться произвольно. Исходное состояние батареи аккумуляторов определяется величиной емкости $C_{аб}$, которая может задаваться произвольно. Параметры ограничивающие режимы работы аккумуляторной батареи: максимальная мощность заряда $P_{зм}$, максимальный $C_{\max}$ и минимальный $C_{\min}$ уровень заряда в соответствии с рекомендациями для конкретных типов аккумуляторов.

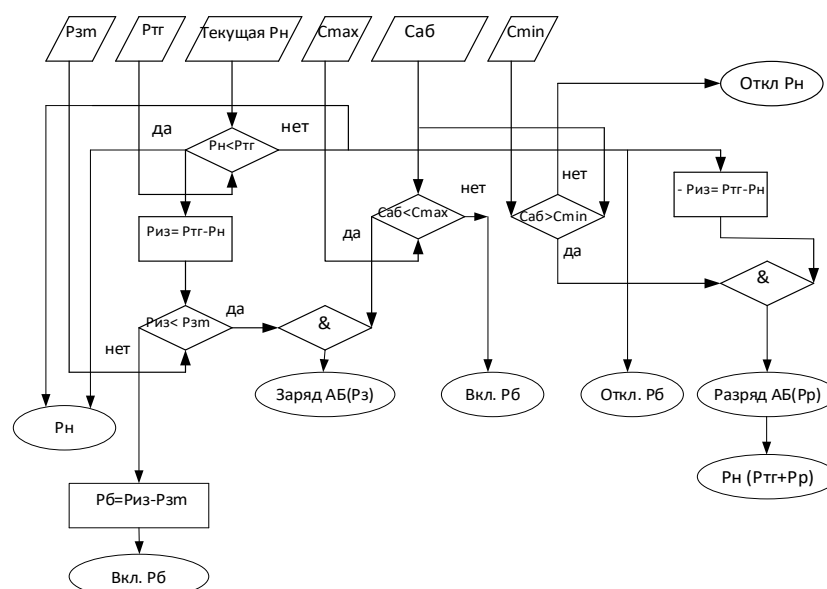


Рисунок 10 – Логическая структура алгоритма функционирования инверторной микроГЭС

Результаты работы алгоритма в графическом виде приведены ниже (рисунок 11). На графике изображены почасовые изменения суточного энергетического баланса автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС, включающего мощности нагрузки, мощности заряда и разряда аккумуляторных батарей, мощность теплового резистивного балласта и мощность гидрогенератора.

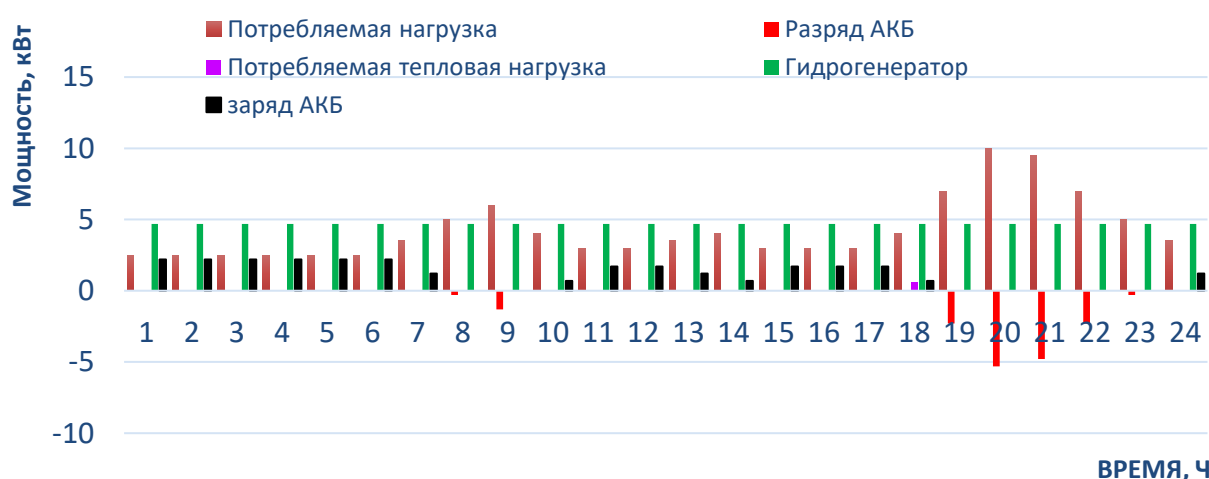


Рисунок 11 – Суточная диаграмма энергетического баланса автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС

Исходя из представленных данных, энергетический баланс системы электроснабжения с рассматриваемой микроГЭС удовлетворяет потребностям объекта в электроэнергии в течение суток.

Одним из ключевых факторов, влияющих на энергоэффективность установки микроГЭС с применением инвертора и накопителя электроэнергии является параметрическая оптимизация емкости АКБ, которая позволяет варьировать уровень мощности гидроагрегата в зависимости от графика нагрузки, необходимой пиковой мощности и т.д.

Экономическая целесообразность построения инверторной микроГЭС достигается если снижение установленной мощности станции за счет выравнивания мощности генерации и, соответственно, уменьшение ее стоимости превысит дополнительные затраты на инвертор и батарею аккумуляторов.

Кроме улучшения технико-экономических характеристик инверторных микроГЭС по сравнению с балластными, снимается проблема качества выходного напряжения, обеспечиваемого современными инверторами.

Сравнительные основные технико-экономические характеристики разных типов балластных

микроГЭС, питающих типового сельского потребителя, приведён в таблице 2.

Таблица 2– Сравнительный технико-экономический анализ разных конфигураций микроГЭС на основе базового комплекта МикроГЭС ПР-10 АОЗТ «МНТО ИНСЭТ».

Показатели	МикроГЭС с балластной нагрузкой №4	МикроГЭС с балластной нагрузкой и инвертором №3	МикроГЭС с балластной нагрузкой, инвертором и накопителем энергии №2	МикроГЭС с балластной нагрузкой, инвертором и накопителем энергии №1
Полные затраты, всего, руб.	850 000	1 147 000 (297 000 стоимость инвертора)	3 940 280 (1 943 280 стоимость АКБ)	5 894 563 (490 000 стоимость инвертора, 4 554 563 стоимость АКБ)
Стоимость напорного трубопровода, руб.	4 817 000		2 263 990	4 817 000
КИУМ по электроэнергии	0,47	0,47	0,94	0,94
Показатели качества электроэнергии	Отраслевой стандарт	ГОСТ 32144-2013	ГОСТ 32144-2013	ГОСТ 32144-2013
Пиковая мощность нагрузки, кВт	10	10	10	20
Вырабатываемая энергия, кВт	4,7	4,7	4,7	9,4
Себестоимость электроэнергии кВт·ч, руб.	68,82	72,43	65,02	65,04

Под показателем КИУМ по электроэнергии подразумевается коэффициент использования установленной мощности относительно фактической мощности генерируемой электроэнергии.

Исходными данными для таблицы 1 выбраны: стоимость оборудования МикроГЭС-10ПР составляет 850 тыс. рублей, стоимость напорного трубопровода (рисунок 12) диаметром 300 мм и длиной 114 метров для обеспечения напора 10 м для местности с уклоном русла водотока в 5 градусов равна 4 817 тыс. рублей.

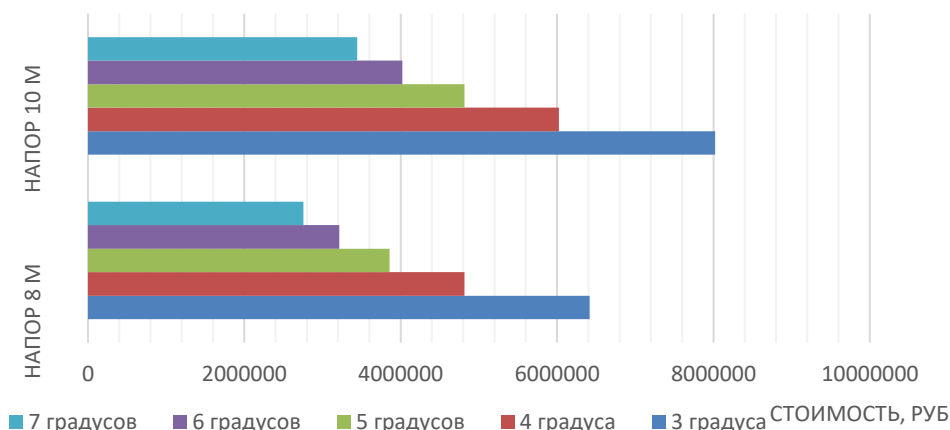


Рисунок 12 – Диаграмма стоимости напорного трубопровода в зависимости от величины напора и уклона русла водотока

В качестве силового модуля - трехфазный инвертор «Импульс форвард 3310» мощностью 10 кВт и стоимостью 297 000 рублей.

При выборе аккумуляторов для накопительного устройства учитывалась возможность их быстрой зарядки с использованием больших токов, а также стойкость в циклическом режиме с учётом ограничений на глубину разряда.

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO₄) в значительной степени отвечают этим требованиям. Степень разрешенного разряда LiFePO₄ может изменяться в зависимости от бренда и

конкретного типа аккумулятора. Стоимость одного блока аккумулятора составляет 16 194 рубля. Для продления ресурса аккумуляторов, рекомендуется ограничивать разряд на уровне 30% от номинальной емкости LiFePO₄ батарей.

С целью увеличения электрического коэффициента использования установленной мощности инверторной микроГЭС, в систему электроснабжения внедряются аккумуляторные батареи.

При использовании микроГЭС с установленной мощностью 10 кВт для обеспечения двухкратного электропотребления требуется внедрение аккумуляторных батарей на сумму 4 554 563 рубля, что сопоставимо со стоимостью напорного трубопровода, однако, при обеспечении электроэнергией потребителя в двухкратном объеме, потребуются наличие двух базовых микроГЭС производства «МНТО ИНСЭТ», соответственно затраты возрастут в два раза, так же при проектировании второго трубопровода, из-за особенностей рельефа могут возникнуть трудности в возможности получения необходимого рабочего потока воды. На рисунке 13 представлен сравнительный график инверторных и базовой микроГЭС.

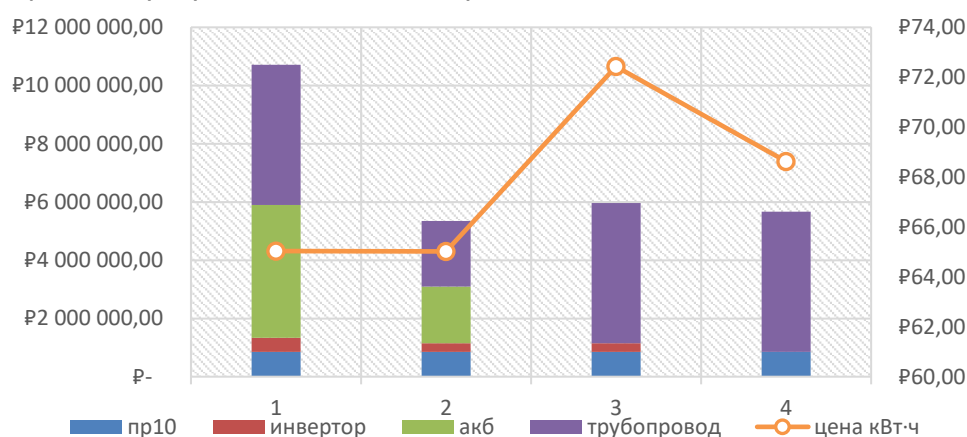


Рисунок 13 – Сравнение финансовых затрат микроГЭС и стоимость 1 кВт·ч электроэнергии

При исследовании режимов работы микроГЭС с балластом и накопителем электроэнергии было установлено, что оптимизация величины емкости АКБ позволяет управлять уровнем загрузки гидроагрегата при разной величине нагрузки. При проведении расчетов автором было выявлено, что наиболее приемлемым вариантом мощности стабилизации гидроагрегата микроГЭС ($P_{ГТ}$) является показатель в 47 % для бытовой сельской нагрузки от максимума пиковой мощности при использовании установки ПР-10 АОЗТ «МНТО ИНСЭТ». В данном случае покрываются не только часы максимумов нагрузки (за счет внедряемой АКБ), но и уменьшается стоимость гидроустановки. Оптимальные уровни мощности генерации гидрогенератора, выбраны на основе средних нагрузок электропотребления с запасом на потери при преобразовании энергии. Вариант стабилизации базовой микроГЭС на полную номинальную мощность и внедрение аккумуляторных батарей позволяет покрывать двухкратную пиковую нагрузку при типовом графике электропотребления. При увеличении покрываемой нагрузки необходим инвертор большей мощности – из возможных вариантов, представленных на рынке, наиболее подходящим вариантом по критериям «цена-качество» является источник бесперебойного питания «Импульс триатлон 20». Данный вариант позволяет увеличить электрический коэффициент использования установленной мощности микроГЭС в 2 раза и при этом сократить экономические и экологические издержки для вновь возводимых или реконструируемых микроГЭС.

В четвертой главе рассмотрены возможности инверторной микроГЭС с управлением балласта по технологии поиска максимума мощности гидротурбины. Изначально метод поиска максимума мощности (MPPT), стал широко использоваться при создании и исследовании фотоэлектрических модулей, для повышения выработки электроэнергии фотоэлектрической станцией.

Структурная схема микроГЭС с технологией поиска точки максимальной мощности гидроагрегата приведена на рисунке 14. Основное энергетическое оборудование микроГЭС включает следующие элементы: гидротурбина ГТ и гидрогенератор ГГ, питающий нагрузку Н стабилизированным напряжением через выпрямительно - инверторный преобразователь В - АИ. Режим работы гидроагрегата контролируется балластными нагрузками, управляемыми

контроллером балласта с MPPT технологией. Балластная система управления режимом работы гидроагрегата выполняет две функции: поиск точки максимума мощности генерации и стабилизация режима работы гидроагрегата в районе этой точки.

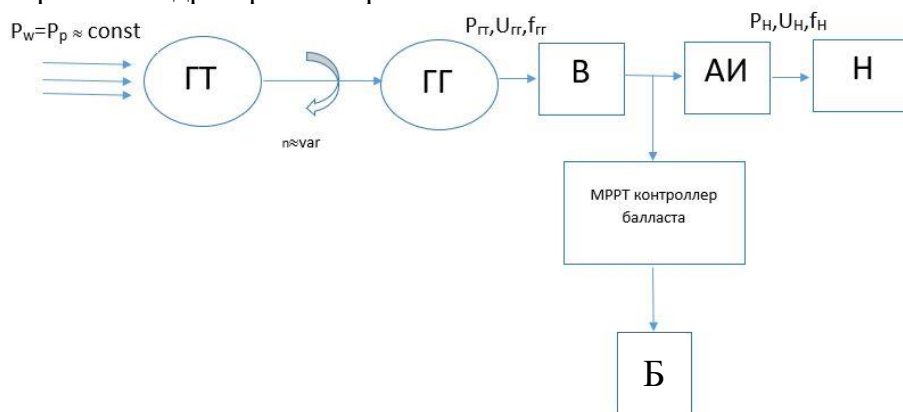


Рисунок 14 – Структурная схема микроГЭС с системой генерации максимума мощности гидроагрегата

На временных интервалах между процессами поиска точек максимальной мощности гидроагрегата функции балластной системы состоят в стабилизации электрической мощности гидрогенератора на уровне максимальной мощности балласта, определённой в результате предыдущего сканирования оборотной характеристики гидротурбины для соответствующей энергии рабочего потока воды. Регулирование величины балластной нагрузки гидрогенератора между процессами сканирования его энергетической характеристики может производиться различными способами, например, использованием разомкнутой системы пропорционального регулирования по току полезной нагрузки микроГЭС.

Функциональная схема микроГЭС с системой генерации максимума мощности гидроагрегата приведена на рисунке 15. Основное энергетическое оборудование микроГЭС включает гидроагрегат ГА, питающий нагрузку Н двукратно преобразованной электроэнергией с помощью управляемого выпрямителя УВ и автономного инвертора АИ. Режим работы гидроагрегата контролируется дозированными балластными нагрузками РБ, коммутируемыми к шине постоянного тока гидрогенератора транзисторными ключами. К силовому оборудованию относится также ключ К, отключающий питание нагрузки от гидроагрегата. Нагрузка, при этом, продолжает получать электропитание от аккумуляторной батареи АБ через контроллер заряда - разряда КЗ-Р.

Управляющими элементами функциональной схемы являются: таймер Т, инициирующий начало работы системы управления по поиску точки максимальной мощности гидроагрегата, измеритель приращения тока гидрогенератора ΔI_{Γ} , MPPT сканер на основе последовательного регистра хранения двоичных кодов, формирователь синхронизирующих импульсов ФИ, блок управления балластом БУ, измерители токов гидрогенератора I_{Γ} и нагрузки $I_{\text{н}}$, логические элементы конъюнкции & и устройство сравнения приращения тока генератора с уставкой приращения $\Delta I_{\Gamma 0}$.

Длительность процесса сканирования определяется выполнением условия превышения заданной уставки приращения тока генератора над фактическим приращением тока в результате очередного увеличения мощности балласта: $\Delta I_{\Gamma 0} > \Delta I_{\Gamma}$.

В соответствии с предлагаемой функциональной схемой микроГЭС с MPPT регулятором балласта и алгоритмом её функционирования, переходные процессы сканирования энергетических характеристик гидроагрегата вызваны последовательностью управляющих воздействий: отключением его текущей нагрузки с выходом в режим холостого хода; переводом питания полезной нагрузки на аккумуляторы; последовательным включением элементов балласта до достижения точки максимальной мощности гидроагрегата для текущего значения энергии рабочего потока воды гидротурбины; фиксация мощности балласта, соответствующей точке максимальной мощности на частной мощностной характеристике гидроагрегата, и подключение к нему текущей нагрузки; определение необходимой части мощности балласта для функционирования гидроагрегата в найденном частном режиме с максимальной генерацией до следующего сканирования.

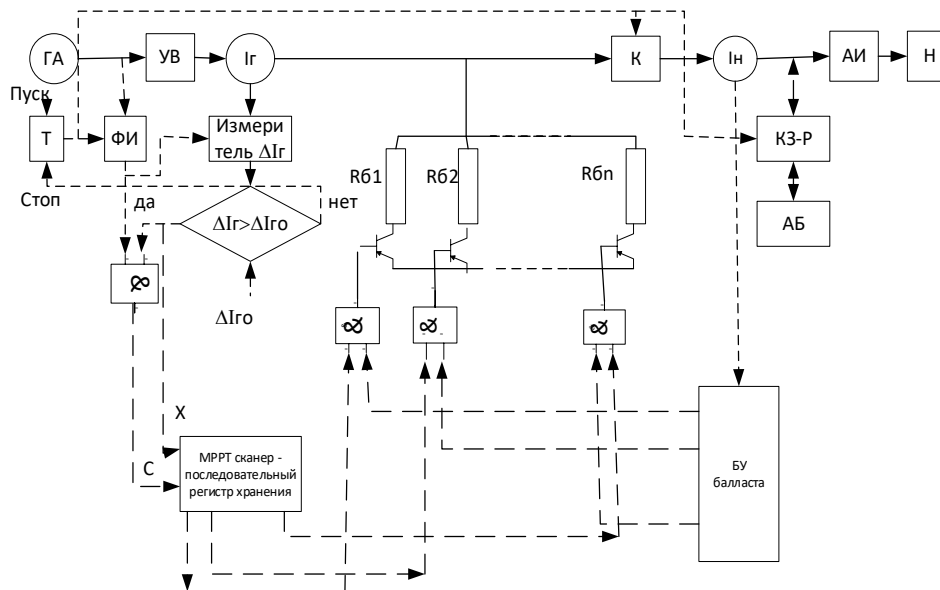


Рисунок 15 – Функциональная схема микроГЭС с системой генерации максимума мощности гидроагрегата

На рисунке 16 представлена имитационная модель автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС, позволяющая исследовать работу гидроагрегата, в процессе его вывода в режим холостого хода, с последующим последовательным включением элементов балластной нагрузки до достижения точки максимальной мощности гидротурбины для различных значений величины открытия направляющего аппарата гидротурбины.

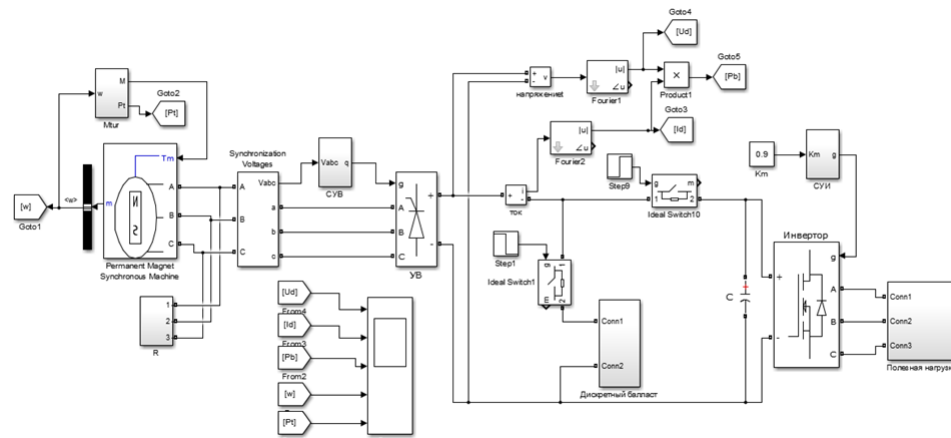


Рисунок 16 – Математическая модель поиска точки максимальной мощности гидроагрегата

В модели, созданной в системе MATLAB Simulink, использованы стандартные моделирующие блоки: синхронный генератор с постоянными магнитами; трёхфазный мостовой управляемый выпрямитель УВ, собранный на тиристорных ключах; трехфазный автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией. Система управления АИН (СУИ) при заданном коэффициенте модуляции k_m формирует эталонные синусоидальные напряжения фаз. Использование УВ позволяет регулировать постоянную составляющую выпрямленного напряжения путем изменения угла открытия тиристорных ключей (СУВ).

Реальные характеристики нерегулируемой пропеллерной гидротурбины с напорным трубопроводом (рисунок 17) представлены аппроксимирующими полиномами в относительных единицах относительно максимума мощности гидроагрегата. При полностью открытом направляющем аппарате зависимость мощности турбины от скорости вращения описывается полиномом

$$P(\omega) = -1,697 \cdot \omega^3 - 1,3581 \cdot \omega^2 + 3,0451 \cdot \omega + 0,0062,$$

при уменьшении степени открытия –

$$P(\omega) = -3,4191 \cdot \omega^3 + 0,5567 \cdot \omega^2 + 1,7655 \cdot \omega + 0,0088.$$

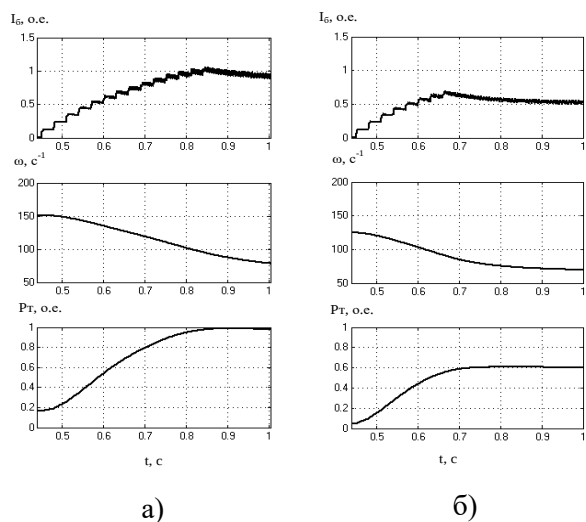


Рисунок 17 – Временные зависимости тока балласта I_6 , мощности турбины P_T и частоты вращения ω гидроагрегата модели микроГЭС (а - при максимальном расходе воды гидротурбиной; б - при ограничении расхода воды)

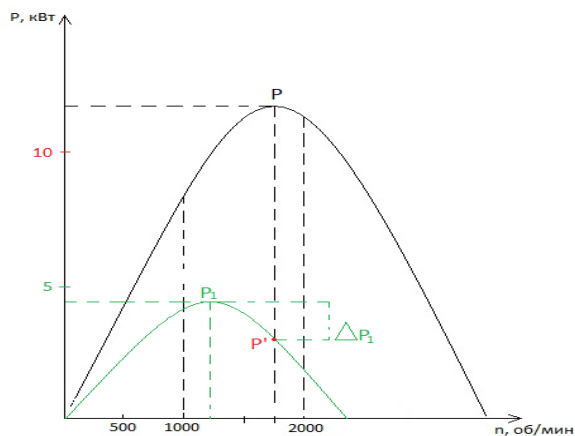
Результаты численного моделирования процесса сканирования мощностной характеристики гидроагрегата приведены на рисунке 17. На рисунке 17а, приведены временные зависимости тока на шине постоянного тока модели микроГЭС I_6 , а также мощности турбины P_T и частоты вращения гидроагрегата ω от управляющих воздействий на гидроагрегат – отключение нагрузки и, после перехода гидроагрегата в режим холостого хода, ступенчатого увеличения мощности балласта до фиксации максимума мощности генерации, при максимальном расходе воды гидротурбиной.

Как следует из рисунка, для сканирования режима микроГЭС с максимальным расходом воды потребовалось 16 ступеней балласта, мощность каждой из них определяется как отношение максимальной мощности гидроагрегата к количеству ступеней – в данном случае 16. Соответственно, в микроГЭС необходимо иметь 16 элементов балласта, управляемых 16 разрядной цифровой логической системой управления.

Временные параметры управляющих воздействий установлены в работе авторов.

Рисунок 17б, показывает процессы сканирования рассматриваемого гидроагрегата при частичном ограничении поступления воды на гидротурбину. Характер переходных электромеханических процессов остаётся неизменным, но их количественные характеристики изменяются. В частности, уменьшился максимум генерируемой гидроагрегатом мощности и, соответственно, сократилась до 8 ступеней вводимая при сканировании мощность балласта. Следовательно, до следующего МРРТ сканирования, регулятор балласта поддерживает суммарную мощность нагрузок микроГЭС на уровне, соответствующем мощности 8 элементов балласта. Уменьшению максимума мощности микроГЭС соответствует уменьшение частоты вращения гидроагрегата. Для рассматриваемого примера снижение частоты вращения составляет 10-15 рад/с по сравнению с режимом работы с максимальной энергией рабочего потока воды гидротурбины. Таким образом, данное исследование показывает возможности применения МРРТ технологий для более полного использования энергии водотока, что способствует улучшению технико-экономических характеристик микроГЭС. Отмечены особенности реализации МРРТ-технологий в микрогидроэнергетике, обусловленные большим удельным энергетическим потенциалом и стабильностью рабочего потока воды гидроагрегата. Это позволяет значительно реже проводить поиск точки максимальной генерации микроГЭС по сравнению с ветро- и фото-генерацией и использовать более простые МРРТ алгоритмы.

Весь цикл поиска точки максимальной мощности гидроагрегата, начиная с его вывода в режим холостого хода, для рассматриваемого примера, занимает время около одной секунды. Достаточно высокое быстродействие предлагаемой МРРТ технологии позволяет применять ее практически для всех типов инверторных микроГЭС. В качестве примера, рассмотрим расчет эффективности использования МРРТ технологии в микроГЭС для экспериментально снятой мощностной характеристики гидротурбины. Вид характеристики приведен на рисунке 18. В качестве энергоносителя примем малую реку с расходом воды $Q = 0,5$ м³/с. Уклон русла реки изменяется от $\Delta H = 1,0$ до $\Delta H = 20,0$ м/км. Имея ключевые параметры турбины при одном напоре, можно определить параметры при другом напоре



Таким образом турбина, работающая при напоре H_1 выдаст энергетические параметры, определяемые следующими уравнениями:

$$n_1 = n \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H_1}}$$

$$Q_1 = Q \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H_1}}$$

$$P_1 = P \frac{H\sqrt{H}}{H_1\sqrt{H_1}}$$

где, n – число оборотов, об/мин;

Q – расход воды, м³/сек;

P – мощность, кВт; H – напор, м.

В качестве примера, рассмотрим номинальные параметры гидротурбины соответствующие рабочему напору $H=10\text{м}$, при этом максимальная мощность P , составляет 12 кВт, при частоте вращения n равной 1750 об/мин. Пересчет мощностной характеристики гидротурбины на рабочий напор $H=5\text{м}$, что практически является минимальной границей допустимых напоров (30-40%) для пропеллерных гидротурбин, показывает, что максимум мощности снижается до 4,24 кВт при частоте вращения $n_1 = 1240$ об/мин. Мощность, соответствующая стабилизируемым оборотам 1750 об/мин в обычных автобалластных микроГЭС снижается до 3 кВт. Таким образом, применяемая МРРТ-технология дает максимальный выигрыш мощности 1,24кВт или около 10% от номинальной мощности гидротурбины. Проведенные по предлагаемой методике расчеты сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Критерии эффективности использования гидроэнергетических ресурсов с применением МРРТ-контроллера.

п, об/мин	п ₁ , об/мин	Н, м	Н ₁ , м	Р', кВт	Р ₁ , кВт	ΔР, кВт
1750	1240	10	5	3,0	4,24	1,24

В заключении представлены основные выводы по научным и практическим результатам, полученным в ходе исследования автономных инверторных микроГЭС с накопителями аккумуляторного типа.

В результате проведенного исследования были определены пути развития технологий преобразования энергии водотока в электроэнергию с помощью микрогидроэлектростанций. Существенно повышена энергоэффективность инверторной микроГЭС, за счет применения комбинированного балласта, позволяющего экономить энергию, которая расходуется на резистивный балласт в классических микроГЭС. Сэкономленная энергия аккумулируется и возвращается в энергетический баланс потребителя, что позволяет повысить электрический коэффициент использования установленной мощности, практически до 1, без учета потерь.

В рамках исследования влияния изменения нагрузки и компенсирующего действия контроллеров заряда-разряда аккумуляторных батарей на параметры генерирующей системы микроГЭС, был проведен анализ переходных процессов. Результаты анализа показали, что при дискретизации процессов 1 час на энергетический баланс автономной системы электроснабжения на базе микроГЭС, влияние переходных процессов минимально. Это позволяет не учитывать их при анализе энергетических балансов системы. Одним из ключевых результатов исследования стало выявление возможности минимизации или исключения применения резистивного балласта при использовании накопителей электроэнергии в составе микроГЭС. Это позволяет максимально увеличить коэффициент использования электрической мощности при неизменной установленной мощности гидроагрегата. Так же анализ показал, что действующее значение напряжения гидрогенератора изменяется в диапазоне от $1,4U_{\text{ном}}$ до $0,65U_{\text{ном}}$ при увеличении мощности нагрузки от 0 до 1,3 номинальной. При этом угловая скорость гидрогенератора изменяется от $0,98\omega_{\text{ном}}$ до $0,52\omega_{\text{ном}}$ для того же диапазона изменения нагрузки при базовой частоте вращения $\omega_{\text{ном}}$.

соответствующей оборотам холостого хода.

В результате предложенного алгоритма функционирования микроГЭС с инвертором и накопителем установлено, что при средней мощности 47% система способна обеспечивать паспортное значение выходной электроэнергии в менее благоприятных условиях ландшафта и водотока. Это позволяет сократить затраты на гидротехнические сооружения и повысить экономическую эффективность проекта. Снижение мощности стабилизации гидроагрегата инверторной микроГЭС приводит к уменьшению стоимости оборудования и увеличению коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) за счет использования аккумуляторного накопителя электроэнергии. Кроме того, предложен вариант использования базовой микроГЭС с загрузкой на полную номинальную мощность с внедрением аккумуляторных батарей для покрытия двухкратной нагрузки типового графика электропотребления. Этот метод позволяет удвоить электрический коэффициент использования установленной мощности микроГЭС и значительно снизить экономические и экологические издержки при строительстве или реконструкции новых микроГЭС.

В работе были проведены численные эксперименты, которые позволили установить временные параметры процесса поиска точки максимальной мощности генерации гидроагрегата. Также было определено количество дискретных элементов балласта и интервал дискретизации его ступеней. Для выбранной гидротурбины с максимальной мощностью 10 кВт процесс сканирования мощностной характеристики длится 0,4-0,5 секунды при последовательном подключении 14 дискретных элементов балласта.

Применение МРРТ-технологий позволяет повысить эффективность гидротурбины на 10% от её номинальной мощности. Это достигается за счёт более точного контроля и управления процессом генерации электроэнергии.

Особенностью реализации МРРТ-технологий в микрогидроэнергетике является большой удельный энергетический потенциал и стабильность рабочего потока воды гидроагрегата. Это позволяет проводить поиск точки максимальной генерации микроГЭС значительно реже (сутки и более) по сравнению с ветро- и фото-генерацией, а также использовать более простые МРРТ-алгоритмы.

Предлагаемые в исследовании структурные схемы и алгоритмы управления инверторными микроГЭС, реализующие МРРТ-технологии, обеспечивают максимально эффективное использование гидравлической энергии водотока.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило возможность эффективного использования инверторной микроГЭС с накопителями электроэнергии. Это позволяет повысить энергетическую эффективность работы микроГЭС и ее экономические характеристики.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию параметров МРРТ-регулятора балласта для различных типов микроГЭС и условий эксплуатации, а также на разработку более эффективных алгоритмов управления процессами энергопреобразования в инверторных микроГЭС.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Попов М.М.** Повышение технико-экономической эффективности инверторной микрогидроэлектростанции деривационного типа. / Б.В. Лукутин, М.М. Попов, // Омский научный вестник. – 2023. – № 3. – С. 68-76.

Результаты, опубликованные в патентах РФ и свидетельствах о регистрации ЭВМ:

1. Патент РФ на изобретение № 2833947, МПК H02J 3/24 (2006.01). Устройство для регулирования частоты тока, вырабатываемого автономным генератором микрогидроэлектростанции / **М.М. Попов**, Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, И.А. Розаев. Заявл. от 11.07.2024, Опубл. 17.12.2024 Бюл. № 14.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025660669. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Программа для ЭВМ «МРРТ-регулятор микрогидроэлектростанции» / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, **М.М. Попов**. Дата регистрации: 25 апреля 2025 года.

Публикации в изданиях, индексируемых базой данных Scopus/WoS:

1. **Попов М.М.** Режимы работы микрогидроэлектростанции со стабилизацией выходного

- напряжения при помощи управления инвертором / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, М.М. Попов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 51–58.
2. **Попов М.М.** МикроГЭС с регулированием гидроагрегата по цепи якоря гидроагрегата / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, М.М. Попов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 158–171.
 3. **Попов М.М.** МикроГЭС с технологией поиска точки максимальной мощности гидроагрегата / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, М.М. Попов // Электротехника. – 2025. – № 1. – С. 67-73.

Публикации в изданиях входящих в РИНЦ:

1. **Попов М.М.** Повышение технико-экономической эффективности микроГЭС деривационного типа [Текст]: Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика: Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции. В 3 частях. Том Часть 1. Уфа, 2023. – С. 58–66.
2. **Попов М.М.** Адаптивные системы управления режимами работы инверторной микроГЭС [Текст] / Б.В. Лукутин, М.М. Попов // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, 2023. – С. 517-522.
3. **Попов М. М.** Интеллектуальные технологии генерирования и стабилизации электроэнергии в микрогидроэлектростанциях / М. М. Попов, Б. В. Лукутин // Актуальные проблемы электроэнергетики : Сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции, Нижний Новгород, 2023. – С. 393-396.
4. **Попов М. М.** Классификация систем генерирования и стабилизации параметров электроэнергии микрогидроэлектростанций / М. М. Попов, Б. В. Лукутин // В сборнике: Потенциал и вызовы развития возобновляемой энергетики, Сборник научных статей II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ставрополь, 2024. – С. 38-42.
5. **Попов М. М.** Стабилизация параметров электроэнергии автономного турбогенератора с нерегулируемой турбиной / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, М.М. Попов // Энергетические установки и технологии. – 2024. – Т. 10. – № 3. – С. 63–69.