

ГОУ ВПО «АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. И.И. ПОЛЗУНОВА»

На правах рукописи

СВИТ Павел Петрович

РАЗРАБОТКА МИКРО-ГЭС  
С АСИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ДЛЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и  
электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, СЁМКИН Борис Васильевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор, ХУДОНОВ Анатолий Михайлович  
кандидат технических наук, доцент, МЕНОВЩИКОВ Юрий Александрович

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «23» мая 2007 г. в 9-00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 Алтайского государственного технического университета им И.И. Ползунова по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

[www.astu.secna.ru](http://www.astu.secna.ru) E-mail: ntsc@desert.secna.ru; Elnis@inbox.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им И.И. Ползунова

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Куликова Л.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Экологическая ситуация, непрерывный рост территориально разнесенных и удаленных от электрических сетей сельскохозяйственных объектов небольшой мощности, располагающихся вблизи водных потоков с напорами от 1 до 6 м и мощностью от 1 до 100 кВт, ставят задачи создания недорогих и эффективных автономных автоматизированных микро-ГЭС с целью удовлетворения бытовых и производственных потребностей в электрической энергии. Высокая энергетическая плотность потоков воды, широкие возможности по регулированию их энергии и относительная временная стабильность режима стока большинства рек позволяют использовать простые и дешевые системы генерирования и стабилизации параметров производимой электроэнергии. Экстраполяция известных решений создания микро-ГЭС на область малых напоров и расходов водных потоков показала, что наиболее перспективными в указанном выше диапазоне являются электростанции с водоналивными колесами (ВК) и асинхронными самовозбуждающимися генераторами (АСГ). ВК просты по конструкции, имеют низкую стоимость, высокий коэффициент полезного действия (КПД), надежны и просты в эксплуатации, но использование их в качестве нерегулируемых гидродвигателей в микро-ГЭС значительно повышает требования к системе стабилизации величины и частоты вырабатываемого напряжения. Однако современные достижения в области электромашиностроения, конденсаторостроения, полупроводниковой и преобразовательной техники позволяют создавать надежные и недорогие автономные автоматизированные микро-ГЭС, обеспечивающие получение высококачественной электроэнергии при минимальных требованиях к гидродвигателю.

Разработка низконапорных микро-ГЭС с ВК и АСГ – задача комплексная, поэтому для создания электрооборудования микро-ГЭС требуется предварительное изучение диапазонов и динамики частоты вращения вала генератора применительно к возможностям ВК при различных расходах и напорах водотока. В связи с этим приобретают первостепенное значение вопросы исследования режимов работы и определения характеристик АСГ, построения систем автоматического управления (САУ) параметрами электроэнергии для микро-ГЭС с эффективными ВК, проведения глубоких исследований рабочих режимов микро-ГЭС с учетом всех ее основных элементов.

**Цель работы.** Разработка основ проектирования автономных низконапорных автоматизированных микро-ГЭС с индивидуальным характером электрической нагрузки для сельскохозяйственных потребителей и отработка их на опытных образцах.

### **Основные задачи исследований:**

1. Обоснование требований к качеству электроэнергии и гидроагрегатам с ВК и АСГ в сравнении с существующими, изыскание эффективных технических решений по составу и структуре автоматизированных низконапорных микро-ГЭС для автономных сельскохозяйственных потребителей небольшой мощности.

2. Разработка математических моделей, позволяющих определить диапазон и зависимость частоты вращения вала генератора от параметров ВК и водотока, рабочие характеристики АСГ, параметры схем замещения трехфазного асинхронного двигателя (АД) и ВК, а также комплексной методики расчета низконапорных микро-ГЭС по параметрам водотока и вырабатываемой электроэнергии.

3. Изучение принципов построения и разработка эффективных технических решений по составу и структуре систем автоматической стабилизации параметров электроэнергии, вырабатываемой автономной микро-ГЭС.

4. Проведение лабораторных и натурных испытаний микро-ГЭС с системами стабилизации параметров генерируемой электроэнергии.

**Методы исследований.** Научные и практические результаты работы базируются на научных основах электротехники, теории электрических машин и нелинейной теории колебаний. В работе использовались математическое и физическое моделирование. Постановка, обоснование и обработка результатов экспериментов проводилась с применением теории планирования эксперимента.

Теоретические данные проверялись при испытаниях макетных, опытных и промышленных образцов микро-ГЭС и их элементов. Испытания проводились в научно-исследовательской лаборатории кафедры «Естествознание и системный анализ», лаборатории гидротехнических сооружений, малых гидроузлов и микро-ГЭС кафедры «Теплотехники, гидравлики, водоснабжения и водоотведения» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, а также на Колыванском камнерезном заводе им. И.И. Ползунова.

#### **Научная новизна работы.**

1. Создана расчетная модель, позволяющая определить диапазон и зависимость частоты вращения вала генератора от параметров водоналивного колеса, напора и изменяющегося расхода водотока.

2. Разработана математическая модель автономного трехфазного асинхронного самовозбуждающегося генератора, основанная на уравнениях идеализированной асинхронной машины с постоянными коэффициентами совместно с уравнениями емкостной нагрузки, приведенной Г-образной схеме замещения и балансе мощностей.

3. Обоснована и создана комплексная методика расчета низконапорных автоматизированных микро-ГЭС по напору и расходу водотока и параметрам вырабатываемой электроэнергии.

#### **Практическая ценность работы состоит в следующем:**

1. Создано эффективное техническое решение по составу и структуре автоматизированных низконапорных микро-ГЭС на основе ВК и АСГ с автобалластной тиристорной системой фазного регулирования выходных параметров электрической энергии, что подтверждено патентом на изобретение РФ «Устройство для преобразования энергии воды в электроэнергию» (заявка № 2005133292/06 (037271), положительное решение от 18 января 2007 г.).

2. Разработаны основы проектирования низконапорных микро-ГЭС на базе ВК, АСГ и САУ параметрами вырабатываемой электроэнергии с целью

создания недорогих, надежных и эффективных энергоустановок, предназначенных для электроснабжения автономных сельскохозяйственных потребителей небольшой мощности.

3. Разработаны схемы регуляторов амплитуды и частоты выходного напряжения АСГ на основе серийных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором общепромышленного использования, позволяющие поддерживать высокое качество электроэнергии в широком диапазоне изменения параметров водотока и электрической нагрузки.

4. Создано программное обеспечение для ЭВМ, позволяющее автоматизировать процессы проектирования и оптимизации параметров основных элементов микро-ГЭС, исходя из напора и расхода водотока и параметров вырабатываемой электроэнергии.

5. Разработаны, изготовлены и испытаны САУ параметрами электроэнергии, вырабатываемой микро-ГЭС, обеспечивающие режимы работы гидроагрегатов в соответствии с требованиями сельскохозяйственных потребителей.

6. Созданы опытный образец микро-ГЭС мощностью 4 кВт с ВК диаметром 3 м и действующая с 2002 г. на Колыванском камнерезном заводе им. И.И. Ползунова микро-ГЭС мощностью 12 кВт с ВК диаметром 5,5 м.

Работа выполнена в рамках решения ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)» и программы «Старт-05» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической среде. По результатам исследований получен патент РФ «Гидротурбина» (заявка № 2005133291/06 (037270), положительное решение от 18 января 2007 г.).

**Достоверность** полученных результатов обеспечена:

- достаточным объемом экспериментальных данных и их статистической обеспеченностью;
- использованием поверенной измерительной аппаратуры с достаточной для поставленных целей погрешностью;
- удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных данных, сопоставлением результатов, полученных разными методами, сравнением и согласованностью их с результатами литературных источников и их соответствием современным теориям электротехники, электрических машин и колебаний;
- результатами длительной эксплуатации в штатном режиме микро-ГЭС, разработанной по комплексной методике, предложенной в настоящей работе.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Микро-ГЭС на диапазоны водотоков с напорами от 1 до 6 м и расходами от 0,3 до 3,0 м<sup>3</sup>/с на основе ВК, АСГ на базе серийных трехфазных АД с короткозамкнутым ротором общепромышленного использования и автобалластными тиристорными системами стабилизации амплитуды и частоты напряжения с фазным регулированием являющиеся эффективным техническим решением, которые позволяют успешно конкурировать с другими энергоустановками, предназначенными для электроснабжения автономных сельскохозяйственных потребителей небольшой мощности.

## 2. Модели систем:

- математическая модель автономного трехфазного АСГ, основанная на уравнениях идеализированной АМ совместно с уравнениями емкостной нагрузки, приведенной Г-образной схеме замещения и балансе мощностей;
- расчетная модель, устанавливающая взаимосвязь частоты вращения вала генератора с параметрами ВК, напором и изменяющимся расходом водотока.

## 3. Методика:

- аналитического расчета параметров схем замещения АД по справочным данным, не требующая экспериментального определения характеристик холостого хода и короткого замыкания;
- графо-аналитического расчета рабочих характеристик АСГ при переменной частоте статора и при различных скоростях вращения ротора, которая позволяет определить границу устойчивой работы генератора.

4. Комплексная методика расчета микро-ГЭС для малых напоров и расходов водных потоков, подтвержденная результатами экспериментов, натурных испытаний и длительной эксплуатацией микро-ГЭС в штатном режиме.

**Личный вклад автора** состоит в реализации основных задач исследований, в том числе в обосновании состава и структуры микро-ГЭС и САУ, в разработке математических моделей и методик расчета, в создании необходимой технической документации образцов, в организации и выполнении лабораторных и заводских испытаний, а также в планировании и проведении экспериментов, в анализе и обобщении результатов исследований, формулировке выводов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: на Третьей Международной конференции «Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов», Барнаул, 1995 г.; Научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава Алтайского государственного технического университета, Барнаул, 1996 г., 2000 г., 2001 г.; 2002 г., 2004 г.; Научно-технической конференции «Охрана природы, гидротехническое строительство, инженерное оборудование», Новосибирск, 1996 г.; Международной научно-практической конференции «Горы и человек: в поисках устойчивого развития», Барнаул, 1996 г.; Региональной научно-практической конференции «Малая энергетика Новосибирской области. Современное состояние и перспективы развития», Новосибирск, 2003 г.; Второй международной научно-практической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт», Тобольск, 2004 г., IX Ползуновских чтениях, Барнаул, 2006 г.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 26 печатных работ, из них 3 – в центральной печати.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка использованной литературы из 109 наименований и 7 приложений. Работа изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок, 14 таблиц.

Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору В.М. Иванову за консультации по гидравлической части и помощь в проведении лабораторных и натурных испытаний.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны методы исследования, определены научная новизна и практическая ценность результатов исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации основных результатов.

**В первом разделе** на основе анализа литературных источников дается оценка современного состояния и перспектив развития нетрадиционной энергетики на базе использования природных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в труднодоступных и удаленных от центральных электросетей районах и, прежде всего, для электроснабжения сельскохозяйственных объектов малой мощности. Обоснованы факторы, характеризующие автономных сельскохозяйственных потребителей: территориальная разнесенность; малая мощность и индивидуальный характер нагрузки, допускающий отклонение норм качества электроэнергии от ГОСТ 13109-97; низкий уровень квалификации персонала, обслуживающего электроустановки.

Использование ВИЭ неразрывно связано с проблемой разработки альтернативных вариантов автономных электроэнергетических систем (АЭЭС) и установок (АЭЭУ) и недорогого, надёжного и эффективного оборудования к ним. В работе выполнен анализ особенностей и показателей эффективности АЭЭС для электроснабжения потребителей малой мощности, на основании которого произведен выбор ВИЭ и основных элементов АЭЭУ. Сравнительный анализ эффективности использования ВИЭ, уровня промышленного освоения нетрадиционных энергоустановок показал, что наиболее перспективной АЭЭУ малой мощности для районов с водными потоками являются микро-ГЭС, отличающиеся мобильностью, экономичностью, высокими надёжностью и качеством вырабатываемой электроэнергии. Анализ разработанных в России и за рубежом микро-ГЭС, диапазонов напоров, расходов и мощностей, на которые они выпускаются, показал, что в качестве преобразователя энергии водного потока в механическую энергию вращательного движения вала генератора низконапорных микро-ГЭС в диапазоне мощностей от 1 до 50 кВт предпочтительнее использовать ВК, которые могут эффективно работать при напорах от 0,5 до 6 м и расходах воды от 0,03 до 3,0 м<sup>3</sup>/с.

На основании анализа литературных источников и факторов, характеризующих автономных сельскохозяйственных потребителей, выбраны параметры электроэнергии, вырабатываемой микро-ГЭС.

Сравнение характеристик отечественного электрооборудования показало целесообразность использования в качестве источников электропитания, вырабатывающих электроэнергию хорошего качества, АСГ на базе трехфазных АД с короткозамкнутым ротором общепромышленного использования, обладающих

малой удельной массой, надежностью, простотой конструкции и низкой стоимостью. Промышленностью выпускается большое разнообразие АД по типу исполнения, мощности, скорости вращения, что обеспечивает возможность создания АЭЭУ с АСГ, сочленяющихся с различными по размерам и мощности ВК. С целью обеспечения надежности и эффективности работы простых, надежных дешевых нерегулируемых гидродвигателей применяют системы стабилизации параметров выходного напряжения электростанций. Актуальность разработки САУ параметрами АСГ обусловлена особенностями преобразования энергии малых водотоков в электроэнергию. Соизмеримость мощностей нагрузки и ВК, случайный характер изменения энергии малых водотоков, необходимость обеспечения устойчивой работы микро-ГЭС в широком диапазоне нагрузок ужесточают требования к системе регулирования выходных параметров генератора. На основе анализа существующих конструкций микро-ГЭС и факторов, характеризующих сельскохозяйственных потребителей, сделан вывод, что наиболее перспективным является вариант АЭЭУ, оборудованной ВК и АСГ с автобалластными тиристорными системами стабилизации амплитуды и частоты напряжения с фазовым регулированием. Микро-ГЭС, как объект исследования в данной работе, состоит из следующих основных элементов: верхненаливного ВК, серийного АД с короткозамкнутым ротором и конденсаторным самовозбуждением, САУ автобалластного типа, включающей тиристорный преобразователь, балластную нагрузку, коммутационную, защитную и регулирующую аппаратуру.

Создание эффективных микро-ГЭС требует разработки аналитических методов расчета и проведения научных исследований, направленных на системное изучение рабочих параметров и режимов основных элементов микро-ГЭС.

В конце раздела сформулированы основные задачи исследования, главной из которых является создание методик проектирования низконапорных автоматизированных микро-ГЭС с ВК и АСГ, предназначенных для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей небольшой мощности.

**Второй раздел** посвящен вопросам математического моделирования и разработке методов расчета основных узлов низконапорных микро-ГЭС, исходя из параметров водотока и электроэнергии. Приводным двигателем АСГ является ВК, скорость вращения которого зависит от его конструкции, параметров водотока и момента сопротивления, создаваемого генератором. Поэтому задачи расчета рабочих характеристик АСГ, оптимизации конструкции и параметров ВК взаимосвязаны.

В разделе рассмотрены механизм, условия мягкого и жесткого самовозбуждения АСГ. С помощью характеристик и векторных диаграмм проанализированы режимы работы автономного АСГ. Получены зависимости для расчета емкости основных конденсаторов возбуждения по номинальным электрическим данным АД.

Необходимость создания расчетной модели, позволяющей определить диапазон и зависимость частоты вращения вала АСГ от параметров ВК и водотока, диктуется многообразием возможных сочетаний мощности гидроустано-

Определение диапазона частоты вращения ВК ( $\omega_K$ ) основано на уравнении движения системы «ВК - АСГ»:

где  $M_c$  и  $J_K$  - моменты сопротивления на валу и инерции колеса.

$$M_k = \rho g l \left| \int XF_k(X) dX \right|, \quad (2)$$

The diagram illustrates the construction of a three-level system of circles. It shows three concentric circles centered at the origin of a coordinate system where both axes range from -1.5 to 1.5. The outermost circle is brown and labeled \$R\_1\$. Inside it is a blue circle labeled \$R\_2\$, and the innermost is a smaller blue circle labeled \$R\_3\$. Points \$i\_1, i\_2, i\_3\$ are marked on the \$R\_1\$ circle, and their coordinates \$(x\_{i1}, y\_{i1})\$, etc., are given. Points \$x\_{1i}, x\_{2i}, x\_{3i}\$ are marked on the \$R\_2\$ circle, with \$x\_{2i} = R\_2 \cos(\beta\_i)\$ and \$y\_{2i} = R\_2 \sin(\beta\_i)\$ provided. Lines connect these points to the origin and to each other, forming various triangles. Angles \$\alpha, \beta\_1, \gamma\_1\$ are shown between radial lines. Several green arcs represent levels, labeled \$\Pi\_1\$ through \$\Pi\_5\$. A specific level is labeled "уровень роты". A pink line segment is labeled "лопат" (spade). Other labels include \$Y\_1, Y\_2, Y\_3\$ and \$m, f, \varphi\$.

Рисунок 1- Структурная схема расчета ВК

$F_k(X)$  - функции, ограничивающие сечения объемов воды в  $k$ -х карманах колеса.

Функции  $F_k(X)$  находят по координатам точек ( $\Pi_1$ - $\Pi_k$ ) пересечения уровня воды с лопатками или ободом, точек изгиба ( $xi_3; yi_3$ ) и присоединения лопаток к внутреннему ( $xi_2; yi_2$ ) и внешнему ( $xi_1; yi_1$ ) диаметрам кольцевых боковин.

Количество лопаток ( $n$ ) и основные размеры ВК ( $l$  - ширина,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $\angle \varphi$ ) определяют так, чтобы при заданных параметрах водотока и вычисленной  $\omega_K$  наполнение карманов ВК было наибольшим, а момент  $M_K$  и мощность  $N_K$ , развиваемые колесом, были максимальными.

В работе приведена структурная схема и разработана программа расчета параметров ВК на ЭВМ, по которой выполнен анализ наполнения карманов водой в рабочем секторе колеса и его КПД в зависимости от размеров и числа лопаток для различных значений напоров и расходов водотока, произведены расчеты диапазонов частот вращения валов АСГ при различных расходах. Результаты расчетов приведены в пятом разделе и положены в основу проектирования опытного образца и промышленной микро-ГЭС.

На основании уравнений идеализированной АМ при общепринятых допущениях, Т- и Г-образных схем замещения разработаны математическая модель трехфазного АД с короткозамкнутым ротором и аналитическая методика расчета параметров его схем замещения. Описанные в литературе графические и графоаналитические методы расчета параметров схем замещения АД требуют трудоемких графических построений с использованием результатов экспериментальных исследований процессов холостого хода, короткого замыкания и работы АД под нагрузкой. В отличие от них в настоящей работе предложен расчет параметров схем замещения АД, не требующий эксперимента, основанный на разработках авторов Костенко М.П., Пиотровского Л.М., Сыромятникова И.А., Петрова Г.Н., Торопцева Н.Д., Алюшина Г.Н. Исходными данными для расчета служат номинальные электрические и механические параметры, конструктивные данные АД, содержащиеся в справочной литературе. С достаточной для практических целей точностью определяются активные и индуктивные сопротивления статора ( $r_1$  и  $x_1$ ), ротора ( $r_2'$  и  $x_2'$ ) и цепи намагничивания ( $r_\mu$  и  $x_\mu$ ). Критерием оптимизации параметров АД служит значение коэффициента насыщения магнитной цепи. Вычисляют полное сопротивление цепи намагничивания ( $\dot{Z}_\mu$ ) и сумму  $(1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_\mu)$ , где  $\dot{Z}_1$  - полное сопротивление статорной цепи.

По выражению: 
$$\dot{c}_1 = 1 + (\dot{I}_{\mu n} / 2k_i \dot{I}_{1n}) \quad (3)$$

находят поправочный коэффициент  $\dot{c}_1$ . В выражении (3)  $k_i$ ,  $\dot{I}_{\mu n}$  и  $\dot{I}_{1n}$  - кратность пускового тока номинальному, номинальные токи намагничивания и статора.

Если сумма  $(1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_\mu)$  отличается от значения  $\dot{c}_1$ , расчет повторяют, корректируя коэффициент насыщения магнитной цепи.

На основе анализа Т- и Г-образных схем замещения (рисунок 2 а и б) совместно с уравнениями емкостной нагрузки и АМ с постоянными коэффициентами, приведенной Г-образной схемой замещения (рисунок 2 г) и балансом мощностей разработана математическая модель автономного АСГ, адекватно отражающая его работу в установившихся режимах. Режиму холостого хода

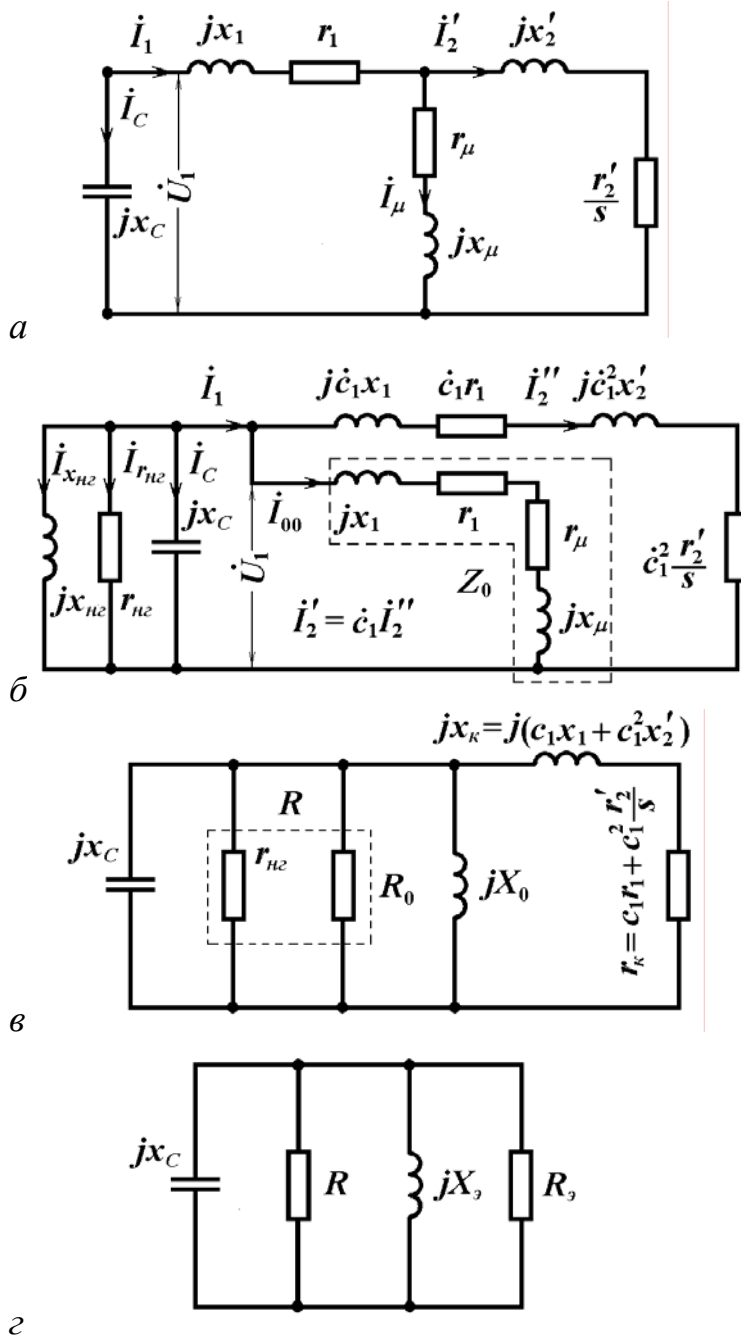


Рисунок 2 – Схемы замещения АСГ: а - Т-образная; б - Г-образная; в - преобразованная Г-образная; г - приведенная

соответствует Т-образная, а режиму нагрузки – Г-образная схемы замещения АСГ. Величина реактивной составляющей нагрузки ( $jx_{н2}$ ) учитывается в значении сопротивления ёмкости подключаемых конденсаторов ( $jx_C$ ). На рисунке 2 в сопротивления внешней цепи показаны в виде параллельно соединенных сопротивлений активной нагрузки ( $r_{н2}$ ) и конденсаторов возбуждения ( $jx_C$ ). Т-образной схеме замещения в установившемся режиме соответствует система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_\mu = \dot{I}_1 - \dot{I}'_2 \\ \dot{E}_1 - \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = \dot{U}_1 \\ \dot{I}'_2(jx'_2 - r'_2/s) = \dot{E}'_2 \end{cases} \quad (4)$$

При преобразовании Т- в Г-образную схему замещения АСГ первичный ток и мощность, потребляемая из сети, остаются неизменными. Приведенный вторичный ток АМ и другие параметры главной и намагничивающей цепей Г-образной схемы изменяются с учетом поправочного коэффициента  $\dot{c}_1$ . Активное ( $R_0$ ) и реактивное ( $X_0$ ) сопротивления преобразованной Г-образной схемы замещения равны:

$$R_0 = r_1 + r_\mu + (x_1 + x_\mu)^2 / (r_1 + r_\mu) \quad \text{и} \quad X_0 = x_1 + x_\mu + (r_1 + r_\mu)^2 / (x_1 + x_\mu) \quad (5)$$

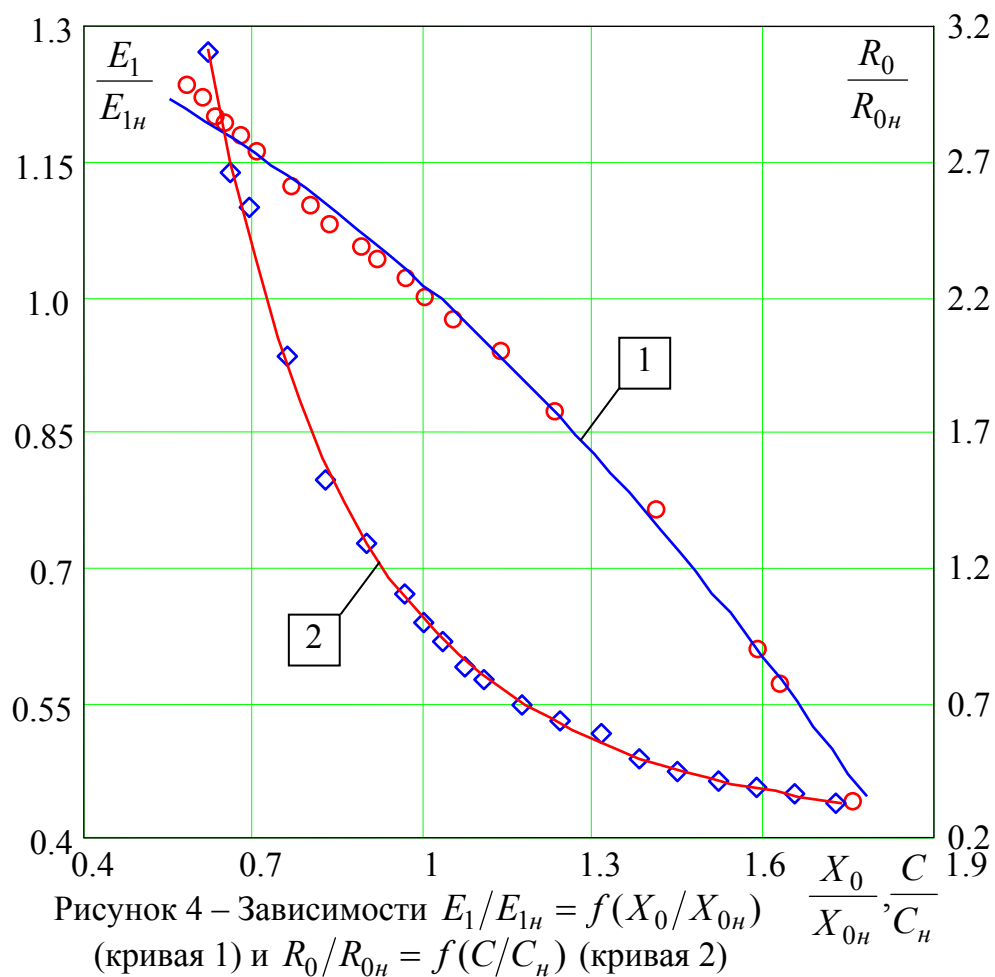
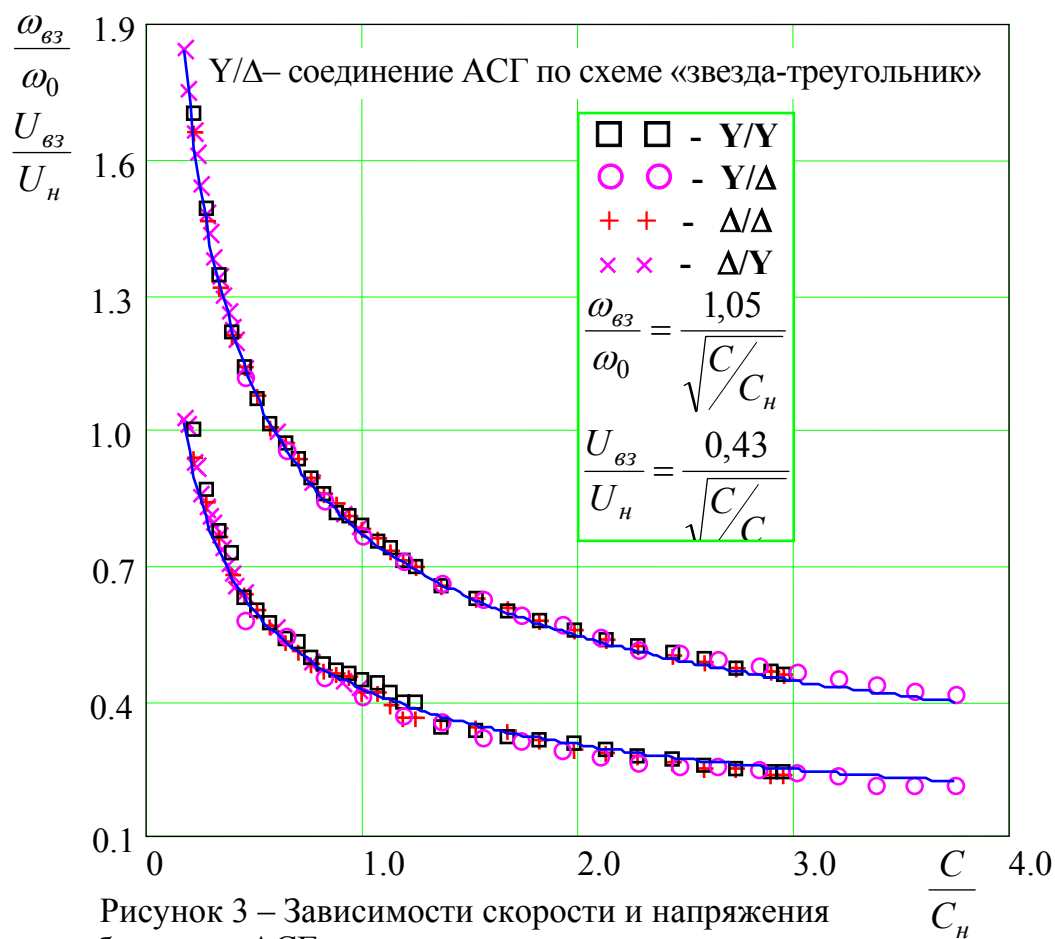
Сопротивление  $R_0$  зависит от изменения сопротивления взаимной индукции генератора и определяется током намагничивания, равным току статора на холостом ходу. Сложность процессов самовозбуждения АСГ, нелинейность намагничивания железа машины, наличие скольжения между магнитным полем и ротором не позволяют получать простые уравнения генератора как объекта управления.

Приводимые в литературе расчеты рабочих характеристик АСГ основаны на графическом или графо-аналитическом методах анализа круговых диаграмм и составлении баланса активных и реактивных проводимостей генератора. Применение их на практике связано с определенными трудностями, т.к. каждой частоте в первичной цепи соответствует свой круг и кривые проводимостей намагничивающего контура. Они громоздки, трудоемки и неприемлемы при проектировании микро-ГЭС. В данной работе предлагается метод расчета, основанный на переходе от Г-образной к приведенной схеме замещения (см. рисунок 2 з) и балансе активных и реактивных мощностей. Для этого определяют параметры схем замещения АД, и экспериментальным путем устанавливают зависимости  $E_1 = f(X_0)$  и  $R_0 = f(C)$ , изучая работу генератора на холостом ходу. Сущность эксперимента сводится к определению величин напряжения ( $U_1$ ), тока статора ( $I_1$ ) и частоты вращения ротора ( $\omega_p$ ) при постоянной частоте напряжения ( $f_1=50$  Гц) и различных значениях емкости конденсаторов возбуждения ( $C$ ). По полученным результатам для каждой емкости конденсаторов определяют полное сопротивление цепи намагничивания ( $Z_0$ ) Г-образной схемы замещения и по уравнению  $Z_0 = r_1 + r_\mu + j(x_1 + x_\mu)$  рассчитывают индуктивные сопротивления взаимоиндукции. Из системы уравнений (4) определяют ЭДС генератора ( $E_1$ ), а по формулам (5) вычисляют сопротивления  $R_0$  и  $X_0$  цепи намагничивания. По величине номинальной емкости  $C_n$  находят соответствующие номинальные значения  $E_{1н}$ ,  $R_{0н}$  и  $X_{0н}$ . Используя уравнения регрессии, описывающие экспериментальные зависимости  $E_1/E_{1н} = f(X_0/X_{0н})$  и  $R_0/R_{0н} = f(C/C_n)$  (кривые 1 и 2 на рисунке 4), рассчитывают приведенное сопротивление  $R$  и внутреннюю ЭДС генератора ( $E_1$ ) по заданным рабочим значениям емкости конденсаторов возбуждения, активного сопротивления нагрузки ( $r_{н2}$ ) и частоты вращения ротора ( $\omega_p$ ).

Новый метод позволяет вычислить момент, фазное напряжение и ток статора, коэффициент мощности, ток главной цепи, полезную фазную мощность, КПД, частоту напряжения и скольжение АСГ. По сравнению с расчетами, применяемыми в литературе, предлагаемый метод менее трудоемкий. Рабочие характеристики АСГ, определенные по этому методу при переменной частоте напряжения, вырабатываемого генератором, и различной скорости вращения ротора, использованы при проектировании САУ и других узлов микро-ГЭС.

**Третий раздел** содержит результаты экспериментального исследования работы АД в генераторном режиме на лабораторном стенде, состоящем из приводного двигателя, АМ, конденсаторов возбуждения, активной нагрузки, системы регулирования и контроля работы двигателей. Генератором служили трехфазные АД серии АИР 80А4СУ2 и АИР 56А2У3, приводными двигателями - двигатели постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением – ДП-12 и ПС 31МУХЛ4.

В ходе эксперимента изучены: режимы возбуждения и развозбуждения генератора на холостом ходу и под нагрузкой; нагрузочные характеристики



АСГ, работающего с приводным двигателем соизмеримой мощности; зависимость максимального тока нагрузки АСГ от напряжения, тока фазы и частоты вращения ротора на холостом ходу; характеристика холостого хода. Обработка экспериментальных данных проводилась по методу регрессионного анализа. Результаты исследований приведены в виде графических зависимостей параметров АСГ и уравнений, описывающих эти зависимости. Для примера на рисунке 3 представлены зависимости скорости и напряжения возбуждения АСГ на холостом ходу от приведенной емкости конденсаторов. Результаты исследования показали, что экономически более выгодной является схема соединения АСГ «звезда-треугольник»; возбуждение АСГ необходимо производить на холостом ходу; ёмкости основных конденсаторов возбуждения должны быть постоянно подключены к статорным обмоткам АД, а их величина должна быть в пределах 0,9-1,1 от  $C_n$ .

Представленные на рисунке 4 зависимости  $E_1/E_{1н} = f(X_0/X_{0н})$  (кривая 1) и  $R_0/R_{0н} = f(C/C_n)$  (кривая 2), необходимые для расчета рабочих характеристик АСГ, строятся по данным холостого хода.

На рисунке 5 для сравнения приведены экспериментальные и расчетные характеристики АСГ, вычисленные по предложенному нами методу. Из рисунка видно, что расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 5-8 %. Это убеждает, что разработанный нами метод адекватно описывает работу АСГ в установившихся режимах. Методика позволяет определять границу устойчивой работы АСГ (рисунок 5 б), выбирать алгоритмы управления его параметрами при проектировании САУ автономных микро-ГЭС.

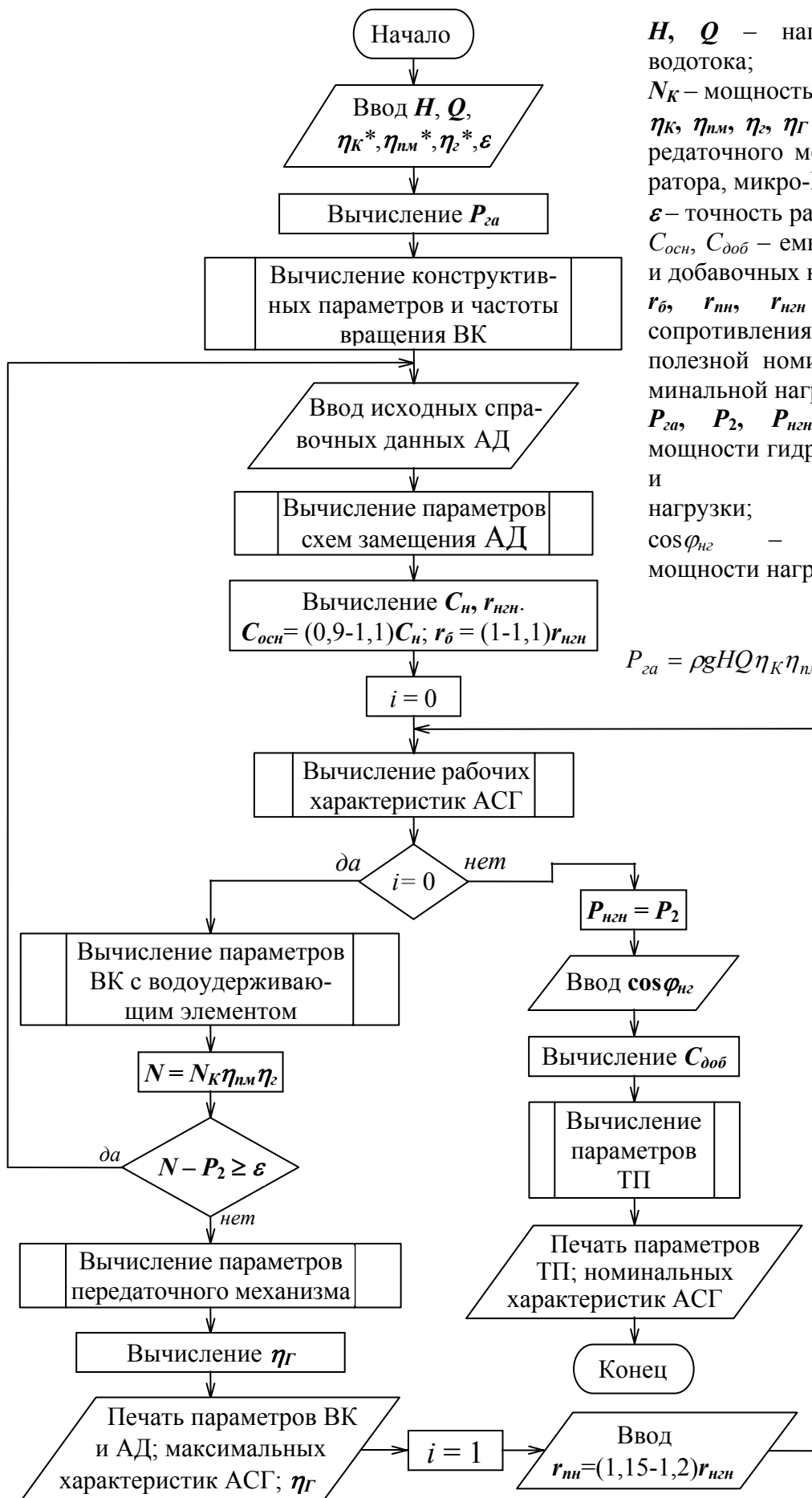
Экспериментальное изучение работы АСГ с приводным двигателем соизмеримой мощности и рабочих характеристик АСГ показало, что стабилизировать напряжение на зажимах генератора при переменной частоте вращения приводного двигателя возможно за счет изменения величины активного сопротивления нагрузки (активной мощности нагрузки), а стабилизация частоты напряжения может быть осуществлена изменением емкости конденсаторов возбуждения (тока намагничивания).

**Четвёртый раздел** посвящен разработке САУ параметрами АСГ, обеспечивающей устойчивый режим работы гидроагрегата и удовлетворяющей сельскохозяйственных потребителей небольшой мощности по стоимости и качеству стабилизации параметров выходного напряжения.

Анализ существующих систем автоматического регулирования напряжения АСГ позволил сделать вывод, что наиболее простым, дешевым, быстродействующим, позволяющим регулировать параметры напряжения в широком диапазоне нагрузки, является автоматический регулятор напряжения с линейными конденсаторами в качестве регулирующего органа.

АСГ, входящий в состав микро-ГЭС с автобалластной системой стабилизации, кроме обычной нагрузки, имеет вентильную нагрузку соизмеримой мощности. Она работает на сложную результирующую нагрузку, характер которой зависит от параметров полезной нагрузки, типа регулятора, закона регу-





$H, Q$  – напор и расход водотока;

$N_K$  – мощность ВК;

$\eta_K, \eta_{нм}, \eta_z, \eta_{г}$  – КПД ВК, передаточного механизма, генератора, микро-ГЭС;

$\varepsilon$  – точность расчета;

$C_{осн}, C_{доб}$  – емкости основных и добавочных конденсаторов;

$r_b, r_{нн}, r_{нзн}$  – активные сопротивления балластной, полезной номинальной и номинальной нагрузок;

$P_{за}, P_2, P_{нзн}$  – полезные мощности гидроагрегата, АСГ и номинальной нагрузки;

$\cos \varphi_{нз}$  – коэффициент мощности нагрузки

$$P_{за} = \rho g H Q \eta_K \eta_{нм} \eta_z = \rho g H Q \eta_{г}$$

Рисунок 7 – Алгоритм расчета микро-ГЭС

емкостью блока добавочных конденсаторов возбуждения (БДКВ) таким образом, чтобы ток добавочных конденсаторов компенсировал индуктивную составляющую ПН. Таким образом, САУ, регулируя величину БН и емкость конденсаторов возбуждения, поддерживает амплитуду и частоту напряжения на зажимах АСГ в пределах допустимых значений. Блок защиты (БЗ), вырабатывающий сигналы управления коммутационной аппаратурой, соединяющей БОКВ со статорными обмотками АД, предназначен для защиты САУ от перенапряжения.

Одноканальная САУ отличается от двухканальной отсутствием БРУЧ, поэтому ТП состоит из одного тиристорного регулятора. Конденсаторы БДКВ подключаются к статору АД вручную.

Таким образом, стабилизация величины напряжения осуществляется регулированием мощности БН по отклонению напряжения от номинального. Стабилизация частоты напряжения осуществляется изменением напряжения на добавочных конденсаторах в соответствии с отклонением частоты напряжения от номинальной. Емкость основных конденсаторов принимается равной номинальной, емкость дополнительных конденсаторов зависит от коэффициента мощности нагрузки.

В разделе приведены принципиальные электрические схемы блока питания, БРУН, БРУЧ и БЗ. Разработаны методика расчета емкости основных и дополнительных конденсаторов возбуждения.

На рисунке 7 представлен алгоритм расчета микро-ГЭС. Разработанная комплексная методика расчета позволяет по напору и расходу водотока, параметрам вырабатываемой электроэнергии оптимизировать преобразование энергии воды в электроэнергию путем подбора АД, сопротивлений балластной ( $r_0$ ) и полезной ( $r_n$ ) нагрузок, рабочих характеристик и момента АСГ, параметров ВК. С целью стабилизации величины и частоты напряжения электроэнергии, вырабатываемой микро-ГЭС, производится расчет параметров ТП.

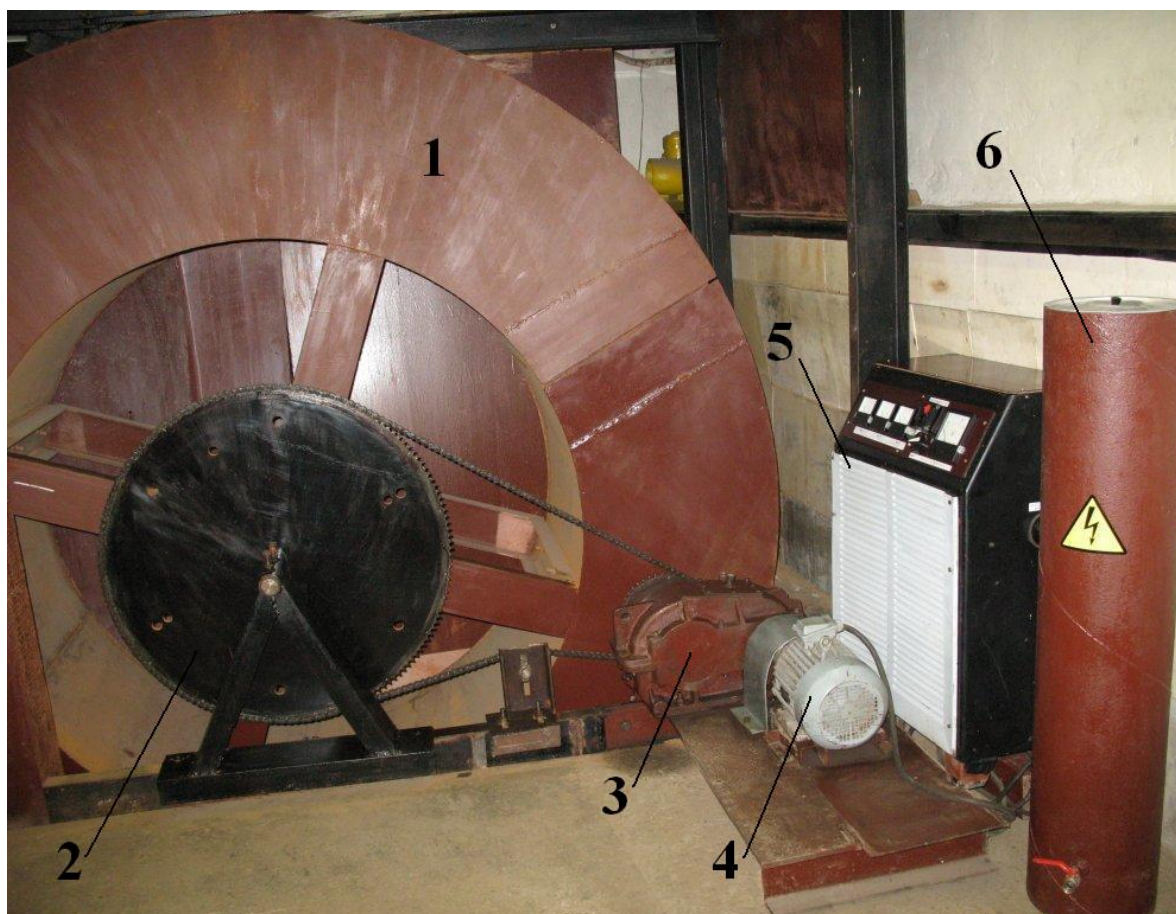
Описание алгоритмов и подпрограмм расчета основных узлов микро-ГЭС представлены в разделе 2 диссертации.

**В пятом разделе** приведены результаты испытания опытного образца и промышленной микро-ГЭС с САУ БАУЭН-1.

По предложенной в разделе 4 комплексной методике была разработана микро-ГЭС мощностью 15 кВт с ВК диаметром 3. Основные характеристики микро-ГЭС приведены в таблице 1. Оптимальное количество лопаток,

Таблица 1 – Характеристики микро-ГЭС с ВК диаметром 3 м

| Мощность, кВт         |                        | Напор, м         |              | Расход,<br>м <sup>3</sup> /с | Номинальное<br>напряжение, В      |                                   | Номи-<br>нальная<br>частота,<br>Гц | КПД<br>микро-<br>ГЭС,<br>% |
|-----------------------|------------------------|------------------|--------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| номи-<br>наль-<br>ная | мак-<br>сималь-<br>ная | стати-<br>ческий | рабо-<br>чий |                              | фазное                            | ли-<br>нейное                     |                                    |                            |
| 15,0                  | 18,0                   | 3,5-4,0          | 3,0          | 1,0                          | 230 <sup>+15</sup> <sub>-30</sub> | 400 <sup>+25</sup> <sub>-50</sub> | 50 ± 2,5                           | 65                         |



1 - ВК диаметром 3 м; 2 - ведущая звездочка цепной передачи;  
3 - редуктор; 4 - АД; 5 - БАУЭН-1; 6 - электродогреватель  
Рисунок 8 – Опытный образец микро-ГЭС

геометрические размеры и параметры колеса определены по методике, изложенной в разделе 2. Размеры и форма лопаток обеспечивают свободное и полное заполнение карманов колеса водой. Гидравлический КПД и КПД объемного наполнения составили 83 и 88 %, соответственно. Для контроля и стабилизации частоты и величины напряжения на зажимах АСГ применяется двухканальная САУ. Основные конденсаторы возбуждения соединялись треугольником, а дополнительные – звездой. КПД генератора составил 0,86. В качестве балластной нагрузки использовался водяной котел мощностью 18 кВт. ТЭНы общей мощностью 6 кВт в каждой фазе подключались к статорным обмоткам АД и фазам тиристорного регулятора ТР<sub>1</sub>.

На основе разработанной микро-ГЭС мощностью 15 кВт был создан

Таблица 2 – Характеристики микро-ГЭС с ВК диаметром 5,5 м

| Мощность, кВт |              | Напор, м    |         | Расход,<br>м <sup>3</sup> /с | Номинальное напряжение, В         |                                   | Номинальная частота, Гц | КПД микро-ГЭС, % |
|---------------|--------------|-------------|---------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------|
| номинальная   | максимальная | статический | рабочий |                              | фазное                            | линейное                          |                         |                  |
| 12            | 15           | 6-6,5       | 5,5     | 0,55                         | 230 <sup>+15</sup> <sub>-30</sub> | 400 <sup>+25</sup> <sub>-50</sub> | 50 ± 2,5                | 51               |

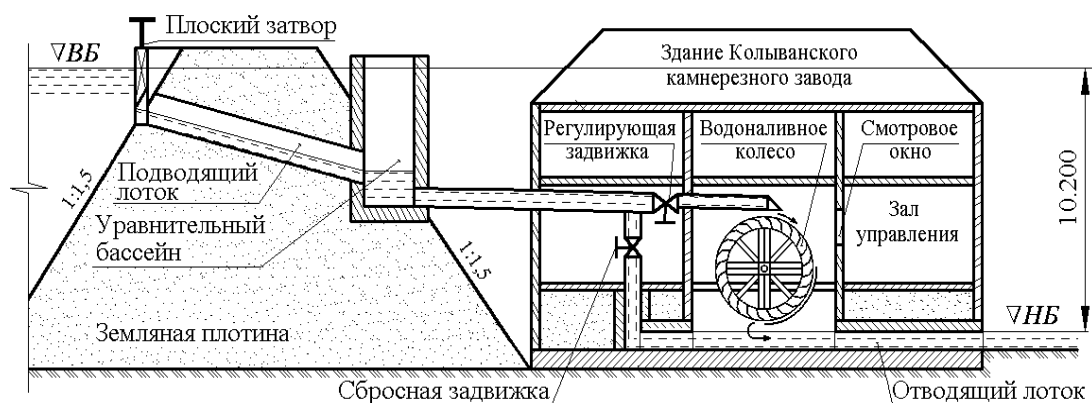


Рисунок 9 – Разрез по оси водовода плотины и здания завода

опытный образец микро-ГЭС, фотография которого показана на рисунке 8. В лаборатории проведены испытания работы ВК с АСГ различной мощности и скоростями вращения. Установлено, что для получения эффективной микро-ГЭС необходимо оптимально определить параметры водотока, размеры и число лопаток, параметры ВК, подобрать АД и рассчитать рабочие характеристики АСГ, выбрать редуктор и цепную передачу передаточного механизма.

По результатам исследования работы опытного образца микро-ГЭС с использованием комплексной методики была разработана микро-ГЭС мощностью 12 кВт с ВК диаметром 5,5 м и одноканальной САУ, которая установлена и запущена в эксплуатацию на Колыванском камнерезном заводе им. И.И. Ползунова в 2002 г.. Основные характеристики микро-ГЭС приведены в таблице 2. На рисунке 9 приведен разрез по оси водовода каменно-земляной плотины и здания завода. Электроэнергию, вырабатываемую микро-ГЭС, используют для освещения здания завода. Для стабилизации параметров вырабатываемой электроэнергии разработан и изготовлен блок автоматического управления электрической нагрузкой (БАУЭН-1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача создания эффективных низконапорных автоматизированных микро-ГЭС с верхненаливными водяными колесами (ВК) и асинхронными самовозбуждающимся генераторами (АСГ) с автобалластными тиристорными системами стабилизации частоты и величины напряжения с фазовым регулированием. Микро-ГЭС предназначены для электроснабжения автономных сельскохозяйственных потребителей небольшой мощности, характеризующихся территориальной разнесенностью, низким уровнем квалификации персонала, обслуживающего электроустановки, индивидуальным характером электрических нагрузок, допускающих отклонение норм качества электроэнергии от ГОСТ 13109-97.

По результатам исследований поданы две заявки (№ 2005133291/06(037270) и № 2005133292/06(037271)) на получение патентов РФ, на которые получены решения о выдаче от 18 января 2007 г.

*Основные результаты и выводы диссертации заключаются в следующем:*

1. Обоснованы требования к качеству электроэнергии и эффективный вариант микро-ГЭС с ВК и АСГ с автобалластными системами автоматического управления (САУ) параметрами вырабатываемого напряжения на диапазоны водотоков с напорами от 1 до 6 м и расходами от 0,3 до 3,0 м<sup>3</sup>/с для автономных сельскохозяйственных потребителей небольшой мощности.

2. Разработаны основы проектирования низконапорных микро-ГЭС, позволяющие разрабатывать автономные автоматизированные электроустановки с индивидуальным характером электрической нагрузки по параметрам водотока и вырабатываемой электроэнергии.

3. Теоретически и экспериментально обоснованы математическая модель автономного трехфазного АСГ и графо-аналитическая методика расчета его рабочих характеристик при переменной частоте статора и различных скоростях вращения ротора, позволяющая определить границу устойчивой работы генератора.

Адекватность результатов расчета рабочих характеристик АСГ по разработанной модели подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных, расхождение между которыми не превышает 5-8 %.

4. Создана расчетная модель и методика, позволяющие определить диапазон и зависимость частоты вращения вала генератора от параметров ВК, напора и изменяющегося расхода водотока.

5. Оптимальной САУ, удовлетворяющей требованиям сельскохозяйственных потребителей, является система, основанная на автобалластном способе стабилизации параметров вырабатываемой электроэнергии с помощью тиристорных преобразователей с фазовым регулированием:

- мощности балластной нагрузки по отклонению напряжения от номинального значения;

- изменения напряжения на добавочных конденсаторах по отклонению частоты напряжения от номинальной величины.

6. Разработаны САУ, обеспечивающие стандартные отклонения параметров напряжения от номинальных значений при изменении электрических нагрузок и расходов воды в широких диапазонах.

7. Изготовлены и испытаны две одноканальные САУ БАУЭН-1 (блок автоматического управления балластной нагрузкой), автоматически стабилизирующие величину напряжения, в составе опытного образца и промышленной микро-ГЭС.

8. Испытания опытного образца микро-ГЭС с ВК диаметром 3 м в лаборатории гидротехнических сооружений, малых гидроузлов и микро-ГЭС кафедры ТГиВВ и промышленной микро-ГЭС с ВК 5,5 м мощностью 12 кВт на Колыванском камнерезном заводе им. И.И. Ползунова и ее успешная работа в штатном режиме с августа 2002 г. подтверждают адекватность разработанных математических моделей, соответствие экспериментальных данных расчетным, по-

лученным по комплексной методике, эффективность и надежность разработанной конструкции микро-ГЭС.

**Основные положения и результаты диссертации  
опубликованы в следующих работах:**

1) Семкин, Б.В. Разработка систем управления "малой" энергетикой / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов. Тез. докл. к Третьей Междунар. Конф. Том II, часть I. - Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1995. - С. 118.

2) Семкин, Б.В. Выбор типа электрогенератора для мини-ЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Научн.- техн. творч. студ.: Сборник тез. 53-й научн.- техн. конф. студ., аспирантов и проф.- преподавателей состава Алт. гос. техн. ун-та. Часть 2, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1996. - С. 141-142.

3) Семкин, Б.В. Использование возобновляемых энергоресурсов в малой энергетике / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Теплоэнергетика. – 1996, № 2. – С. 6-7.

4) Семкин, Б.В. Факторы, определяющие работу систем управления микро-ГЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Научн.- техн. творч. студ.: Сборник тез. 54-й научн.- техн. конф. студ., аспирантов и проф.- преподавателей состава Алт. гос. техн. ун-та. Часть 2. Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. - 1996. С. 10-11.

5) Свит, П.П. Ветроэнергетические установки. Перспективы их использования / П.П. Свит, А.М. Касьянов // там же. – С. 12-13.

6) Семкин, Б.В. Опытнo-конструкторская разработка микро-ГЭС/ Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит, Э.Л. Пурдик // Охрана природы, гидротехническое строительство, инженерное оборудование: Сборник тез. докл. научн.- техн. конф. Часть 3. НГАС.- Новосибирск. - 1996. С.126-127.

7) Семкин, Б.В. Микро-ГЭС как автономный источник энергии / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Горы и человек: в поисках устойчивого развития. Тез. докл. на междунар. научн.- практ. конф. - Барнаул. – НИИ Горного природопольз. - 1996. - С. 248-250.

8) Семкин, Б.В. Проблемы использования микро-ГЭС на территории Алтайского края / Б.В. Семкин, А.П. Кротов, В.М. Иванов, П.П. Свит // Проблемы энергетики и пути их решения. Тез. докл. научн.- техн. семинара (Барселона). – Москва, 24-31 мая 1997. - С. 49-50.

9) Семкин, Б.В. Перспективы размещения малых и микро-ГЭС в предгорных районах Алтайского края и проблемы охраны окружающей среды в зонах их водохранилищ / Б.В. Семкин, В.М. Иванов, П.П. Свит, Т.Ю. Родивилина // Обской вестник. – 1997, № 1. - С. 55-66.

10) Свит, П.П. Потребности людей и охрана окружающей среды / П.П. Свит, М.А. Лапшин // Сб. тез. докл. 55-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-преподавателей состава АлтГТУ им.И.И. Ползунова. Ч.1, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 1997.- С.72.

11) Семкин, Б.В. К вопросу о рациональном использовании автономных электростанций в труднодоступных районах / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Ползуновский альманах. – 1999, № 3. – С. 99-103.

12) Семкин, Б.В. Работа асинхронного генератора с приводным двигателем соизмеримой мощности / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Электрические станции. – 2000, № 9. – С. 51-54.

13) Свит, П.П. Стабилизация выходных параметров автономного асинхронного генератора / П.П. Свит, П.Н. Манухин, К.С. Ашиток // Научно-техническое творчество молодежи. Сб.тез.докл. 58-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Ч.1, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2000.- С.144.

14) Свит, П.П. Зависимость скорости развозбуждения самовозбуждающегося асинхронного генератора от параметров возбудителя и нагрузки. / П.П. Свит // Научно-техническое творчество молодежи: Сб. тез. докл. 59-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Часть 1, Барнаул: изд -во АлтГТУ. – 2001. – С. 103.

15) Свит, П.П. К вопросу о напряжении развозбуждения асинхронного генератора. / П.П. Свит // там же. – С. 104.

16) Свит, П.П. Автобалластная нагрузка в качестве регулятора электрических параметров асинхронных генераторов. / П.П. Свит, А.Р Книппенберг // Научно-техническое творчество молодежи: Сб. тез. докл. 59-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Часть 1, Барнаул: изд-во АлтГТУ. – 2001. – С. 110.

17) Овчинников, А.А. Исследование на модели водяного колеса Колыванского камнерезного завода / А.А. Овчинников, В.М. Иванов, П.П. Свит, Т.А. Никанорова. Юбилейная 60-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и проф.-препод. состава, посвященная 60-летию АлтГТУ. Часть 4, Барнаул: изд -во АлтГТУ. – 2002. (<http://edu.secna.ru/main/review>).

18) Иванов, В.М. Микро-ГЭС на базе гидротурбины с рабочим колесом от центробежного насоса / В.М. Иванов, А.П. Кротов, В.Н. Юренков, П.П. Свит, Т.Ю. Родивилина, Г.О. Клейн, Д.А. Бычков, П.В. Иванова // Сб. “Труды НГАСУ”. – Новосибирск: изд-во НГАСУ. – 2003, №4. – С. 18-29.

19) Семкин, Б.В. Малая энергетика – решение вопроса энергоснабжения Алтайского края / Б.В. Семкин, В.М. Иванов, П.П. Свит, Г.О. Клейн, Д.А. Бычков // Вестник алтайской науки: эффективность и безопасность энергосбережения. – Барнаул: изд-во АлтГТУ – 2004, №1 – С. 62-109.

20) Свит, П.П. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности / П.П.Свит, Б.В. Семкин // Ползуновский альманах. – 2004, № 3. – С. 96-99.

21) Семкин, Б.В. Микро-ГЭС на основе водоналивных колес и асинхронных самовозбуждающихся генераторов / Б.В. Семкин, П.П. Свит, В.М. Иванов // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт. Часть 1. – Тобольск: Новосиб. Гос. Акад. Водн. Трансп. – 2004. (Труды второй международной научно-практической конференции, 8-11 сентября 2004 г.) С. 334-340.

22) Иванов, В.М., Решение проблем малой гидроэнергетики Алтайского края / В.М. Иванов, Т.Ю. Родивилина, П.П. Свит, Г.О. Клейн, Д.А. Бычков, П.В. Иванова, А.Ю. Воронов // там же. – С. 361-366.

23) Свит, П.П. Проектирование водоналивных колес для микро-ГЭС/ П.П. Свит // 62-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь ". Секция «Энергетика». – Барнаул: изд-во АлтГТУ. – 2004. – С. 12- 16. (<http://edu.secna.ru/main/review>).

24) Семкин, Б.В. Разработка систем автоматического управления асинхронными генераторами микро-ГЭС на основе водоналивных колес – развитие технической мысли XVIII в. на Алтае в современных условиях / Б.В. Семкин, П.П. Свит, В.М. Иванов // Ползуновский альманах. – 2006, № 1. – С. 112-123.

25) Семкин, Б.В. К вопросу о максимальном токе нагрузки асинхронного генератора микро-ГЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2006, №2. – С. 14-18. - 180 с.

26) Свит, П.П. Расчет характеристик асинхронного генератора автономной микро-ГЭС / П.П.Свит, Б.В. Семкин, В.М. Иванов // Ползуновский вестник. – 2007, № 1. (в печати).

---

Подписано в печать 19.04.2007 г. Формат 60×84 1/16

Печать – ризография. Усл. п.л. 1,39

Тираж 100 экз. Заказ 2007 – 30

Отпечатано в типографии АлтГТУ

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Лицензия на полиграфическую деятельность

ПЛД № 28-35 от 15.07.1997 г.