

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

**Давлатов Азамджон Махмадиевич**

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО-  
КОМПЛЕКСА МИНИ-ГЭС НА БАЗЕ МНОГОФАЗНОГО  
ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Ганджа Сергей Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Петроченков Антон Борисович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет», заведующий кафедрой микропро-  
цессорных средств автоматизации;

**Вавилов Вячеслав Евгеньевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образова-  
ния «Уфимский государственный авиационный  
технический университет», заведующий кафедрой  
электромеханики;

**Мошкин Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образова-  
ния «Курганский государственный университет»,  
заведующий кафедрой цифровой энергетики.

Защита состоится «14» декабря 2022 г. в 10:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3997>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета



Хальясмаа Александра Ильмаровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Постоянное наращивание потребления электроэнергии является общей тенденцией развития стран европейского и мирового сообщества. Основные потребности в настоящее время в электроэнергии удовлетворяет углеводородная энергетика. Но в наши дни неоспоримым фактором, ограничивающим использование углеводородов, является экология. В этих условиях мировое сообщество вынуждено развивать альтернативные виды энергетике, которые используют природную энергию, преобразованную от солнечной энергии, и которые не оказывают существенного давления на экологию окружающей среды. Гидроэнергетика в этом балансе занимает ведущую роль, запасы ее достаточно велики, расположены примерно равномерно по всему земному шару и технологически использовать эти запасы гораздо проще, чем запасы атомной энергии, термоядерной энергии, биоэнергии. Но гидроэнергетика содержит в себе существенные противоречия. Практически все крупные реки уже освоены. Годовой прирост крупной гидроэнергетики не превышает 2 %. В связи с этим, интересы и интеллектуальные усилия ученых стали направляться в сторону гидроэнергетики средней и малой мощности. Энергетический потенциал этой части энергетики на порядок превышает запасы мощной гидроэнергетики и в настоящее время практически не использован, но развитие этой отрасли имеет свои особенности и существенные отличия. Эффект от использования малой и средней гидроэнергетики можно получить только при создании энергосети из большого количества микро, мини- и средних ГЭС (далее мини-ГЭС). Если мощные гидроэлектростанции сконцентрированы в отдельных местах, где можно создать рабочие места для обслуживающего и эксплуатационного персонала, то мини и микро-ГЭС такой возможности не имеют. Они будут просто экономически не выгодны, если к ним будет прикреплено хотя бы одно рабочее место. Это должны быть станции роботы с интеллектуальной системой управления и эксплуатации, работающие весь свой ресурс с минимальным регламентом обслуживания и ремонта. В связи с такой постановкой задачи на первый план выходят вопросы надежности работы энергетического комплекса мини-ГЭС. Одним из направлений повышения надежности вентильных генераторов является увеличение числа фаз. Так для трехфазного генератора выход из строя одной фазы приводит к аварии, для многофазного генератора это приведет только к ухудшению выходных параметров, которые могут оставаться в пределах допустимой нормы.

Следует отметить, что увеличение количества фаз приводит к очередному техническому противоречию. Увеличивается количество вентилях, увеличивается объем и стоимость коммутационной аппаратуры, усложняется токоподвод к якорю. **В связи с этим возникает проблема оптимизации количества фаз для многофазных приводов вообще и для мини-ГЭС в частности.** Их должно быть достаточно, чтобы обеспечить с одной стороны требуемую надежность, а с другой стороны приемлемые габаритные размеры и стоимость.

### Степень научной разработанности исследуемой темы

Анализ российских источников показывает, что тема увеличения фаз для приводов разных назначений развивается уже более 30 лет.

Значительный вклад в эту научную тему внесли следующие ученые:

- Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва: Беспалов В.Я., Каржавов Б.Н., Сидоров А. Красовский А.Б., Панихин М.В., Фисенко В.Г

- Московский государственный строительный университет (национальном исследовательском университете): Вильданов К.Я., Забора И.Г., Чернов Р.О

- Омский государственный университет путей сообщения: Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Петров П.Г., Краузе

- Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина: Бердичевский А.С., Лопатин Е.Г., Недзельский В.Е., Берая Р.К., Соколов Н.В., Пластун А.Т.

- Южноуральский государственный университет: Лифанов В.А., Зильберман С.З., Воронин С.Г., Ганджа С.А.

- Самарский государственный технический университет: Грачев П.Ю., Костырев М.Л.

- Уфимский государственный авиационный технический университет: Исмагилов Ф. Р., Вавилов В.Е, Фаррахов Д. Р., Минияров А. Х., Веселов А. М.

- Курганский государственный университет: Мошкин В.И., Шестаков Д.Н., Угаров Г.Г.

- Пермский национальный исследовательский политехнический университет: Петроченков А.Б., Мишуриных С.В

Анализ международной наукометрической базы Scopus и Web of Science выявил большое количество исследований, касающихся изучению многофазных систем. Среди них:

- G. K. Singh, K. B. Yadav, R. P. Saini Indian Institute of Technology.

- C. Kalaivani, K. Rajambal, Department of Electrical and Electronics Engineering, Pounicherry Engineering College.

- Steven Jordan, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester.

- F. Barrero, M.J. Duran, Electronic Engineering Department of the University of Seville, Spain.

- E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H.A. Toliyat and S. Williamson, Liverpool John Moores University, Department of Electronics and Electrical Engineering.

- J. Liu, L. Huang, H. Yu, C. Wen and W. Zhong, School of Electrical Engineering Southeast University, Nanjing, China. Исследовали 6-тифазный линейный двигатель.

- E. Jung, H. Yoo, S. Sul, H. Choi and Y. Choi, Doosan Infracore, Yongin, South Korea.

- M. Jones, S.N. Vukosavic, D. Dujic and E. Levi, Faculty of Engineering and Technology, Liverpool John Moores University, Liverpool, U.K.

- A.G. Yepes, J. Malvar, A. Vidal, O. López and J. Doval-Gandoy, Applied Power Electronics Technology Research Group Universidade de Vigo, Vigo, Spain.

- S.S.R. Bonthu, J. Baek and S. Choi, CNC Table Products Cincinnati Incorporated Harrison, OH, USA.

Фонд Федерального института промышленной собственности содержит большое количество патентов на изобретения и патентов на полезные модели, относящийся к проблеме многофазных электрических двигателей и генераторов.

Анализ отечественных и зарубежных научных публикаций, а также анализ патентного фонда говорит о том, что разработка многофазных систем энергоснабжения является важной и актуальной задачей. В этой области учеными сделаны большие научные заделы и проведены обширные исследования. С одной стороны, изучены различные схмотехнические решения для выпрямления тока, разработаны конструкции многофазных асинхронных, синхронных, реактивных и индукторных генераторов, исследованы квазистационарные и переходные процессы в электрической машине и системе управления, разработаны системы диагностики аварийных ситуаций. Но с другой стороны, большое количество научных исследований, в том числе, проведенных в последние пять лет, говорят о том, что тема многофазных приводов остается актуальной и многие вопросы не решены и до конца не проработаны. В частности, не решен вопрос оптимизации количества фаз многофазных генераторов с точки зрения обеспечения необходимой надежности, нет обоснованных рекомендаций по схемам соединения фаз, применительно к гидрогенератору не изучены вероятности отказа якорной обмотки и ключей силового выпрямителя, не исследован уровень допустимых пульсаций при аварийных режимах обрыва и короткого замыкания. Эти вопросы применительно к гидрогенераторам мини-ГЭС требуют своего решения как на инженерном, так и на научном уровне.

**Цель диссертационного исследования.** Основной целью диссертационного исследования является изучение аварийных режимов работы вентильного синхронного магнитоэлектрического генератора с произвольным числом фаз, являющегося источником генерации для мини-ГЭС, на основе цифровой модели электромагнитного анализа и цифровой модели подключенного пассивного выпрямителя, выбор оптимального количества фаз из условий обеспечения требуемого уровня пульсаций и вероятности отказа обмотки и силовых ключей.

**Задачи исследования.** Для достижения этой цели необходимо последовательно решить следующие **научные задачи**:

- определить структуру автономной необслуживаемой мини-ГЭС;
- разработать цифровую комплексную модель генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз для анализа штатных и аварийных ситуаций;
- провести исследование различных отказов в виде обрывов для различного количества фаз генератора и выпрямителя по критерию пульсаций выходного напряжения;
- исследовать вероятность отказов якорной обмотки и силовых ключей применительно к работе мини-ГЭС;
- определить оптимальное количество фаз по критериям уровня пульсаций и вероятности отказов якорной обмотки и силовых ключей;
- экспериментально подтвердить теоретические результаты, выполненные на цифровой модели.

**Объект исследования.** Объектом исследования является электротехнический комплекс мини-ГЭС на базе вентильного синхронного магнитоэлектри-

ческого генератора с произвольным числом фаз, работающего на неуправляемый выпрямитель.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются методы анализа вентильного синхронного магнитоэлектрического генератора с произвольным числом фаз, работающего на неуправляемый выпрямитель в нормальных и аварийных режимах на основе цифровой модели электрической машины и электронной системы, методы статистического и вероятностного анализа отказов якорной обмотки и электронных компонентов.

**Методология и методы исследования.** Поставленные научные задачи решены с применением общей теории электрических машин, теории электрических цепей, теории полупроводниковой преобразовательной техники, методов на основе схем замещения, метода конечных элементов для цифрового моделирования, методов физического моделирования.

**Научная новизна.** Представленная работа восполняет пробел в исследовании многофазных электрических генераторов в части создания цифровой модели комплекса генератор - выпрямитель при произвольном числе фаз, исследовании пульсаций выходного напряжения при различных вариантах отказов, исследовании вероятности отказов компонентов электротехнического комплекса автономной необслуживаемой мини-ГЭС.

**Теоретическая значимость.** В работе представлены дальнейшее развитие электротехнических комплексов, включающих в себя многофазные генераторы и выпрямители, в части исследования среднеквадратичного выпрямленного напряжения и уровня пульсаций выпрямленного напряжения при разных вариантах отказов якорной обмотки и компонентов выпрямителя. Проведен анализ этих показателей для разного количества фаз, вариантов соединения якорной обмотки и схем выпрямления. Проведены исследования вероятности отказов элементов комплекса, позволяющие оптимизировать число фаз с точки зрения наименьшей вероятности отказа.

**Практическая значимость.** Основным практическим результатом проведенных исследований является разработка цифровой комплексной модели генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз для анализа штатных и аварийных ситуаций. Кривые выпрямленного среднеквадратичного напряжения и кривые пульсаций выпрямленного напряжения в инженерной практике позволяют провести предварительный анализ вариантов исполнения многофазной якорной обмотки и схем выпрямления. Практическую ценность имеют рекомендации по выбору оптимального числа фаз применительно к работе автономной мини-ГЭС.

**Положения, выносимые на защиту:**

- аналитические зависимости среднеквадратичного выпрямленного напряжения, уровня пульсаций выпрямленного напряжения и коэффициента использования обмотки якоря для работы генератора на пассивные выпрямители однополупериодного выпрямления, двухполупериодного выпрямления и полномостового выпрямления, **отличающиеся тем**, что выведены для произвольного числа фаз.

- цифровую комплексную модель генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз, **отличающуюся от известных моделей тем**, что генератор для всех вариантов анализа имеет одинаковые га-

бариты, число полюсов и якорную обмотку с одинаковым общим количеством проводников, разложенных по фазам, что позволяет в одинаковых условиях формирования ЭДС вращения сравнить эффективность различных схем выпрямления, включая штатные режимы и нештатные режимы обрыва фаз и диодов;

- результаты исследования среднеквадратичного выпрямленного напряжения и уровня пульсаций выпрямленного напряжения для различных схем многофазной якорной обмотки и схем выпрямителя, **которые для нештатных ситуаций обрыва фазы или диода позволяют определить оптимальное количество фаз и эффективную схему выпрямителя;**

- результаты исследования вероятности отказа многофазной якорной обмотки генератора и электронных компонентов выпрямителя применительно к работе в мини-ГЭС при нештатных ситуациях обрыва фаз и диодов, **отличающиеся тем, что позволяют выбрать оптимальное число фаз по критерию наименьшей вероятности отказа.**

**Соответствие паспорту специальности.** Проведенные исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы: Проведенные исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы: п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления; п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

**Внедрение результатов работы.** Математические модели электрических машин с выпрямителем, зависимости среднеквадратичного выпрямленного напряжения и уровня пульсаций выпрямленного напряжения для многофазных систем, методики анализа коротких замыканий используются в учебном процессе при подготовке специалистов электротехнических специальностей ЮУрГУ и Института энергетики Таджикистана.

**Апробация работы.** Основные положения результатов диссертационной работы и отдельные ее части докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

– Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Казань, 20-21 марта 2019 г;

– Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on GreenEnergy» (Челябинск 2019).

– Международная научная конференция по энергетическому, экологическому и строительному инжинирингу «ЕЕСЕ-2019» (Санкт-Петербург 2019).

- Молодая мысль – развитию энергетики. 20-24 апреля 2020 года. Братский государственный университет. г. Братск
- Международная научно-техническая конференция, «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing» (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020
- Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021» (Магнитогорск 2021)

#### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано **14** научных работ, из них **8** статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая **5** статей в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus, **1** патент РФ на изобретение.

#### **Личный вклад автора в диссертационное исследование**

Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором, включая математическое, имитационное и компьютерное моделирование комплексной модели генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз для анализа штатных и аварийных ситуаций; разработка безопасной и эффективной эксплуатации на основе диагностики различных видов отказов; исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Гандже Сергею Анатольевичу за конструктивную критику и содействие при работе над диссертацией.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из определений, используемых научных терминов, основных обозначений и сокращений, введения, 5 глав, заключения, списка литературы из наименований, приложений. Работа изложена на 169 страницах, из них 143 страницы основного текста. Работа содержит 134 иллюстрации, 70 аналитических выражений, 21 таблицу, 3 приложения.

Диссертация имеет следующую структуру и логику построения.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность освоения гидроэнергопотенциала малых и средних рек, степень научной разработанности исследуемой темы, задачи исследования, объект и предмет исследования, примененные в работе методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, теоретическая значимость, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

**В первой главе** рассмотрены принципы построения автоматизированной мини-ГЭС, сделан выбор типа генератора и выпрямительных схем.

Особенностью существующих мини-ГЭС является наличие механических регулировочных устройств частоты вращения гидротурбины, которые

устанавливаются для стабилизации выходного напряжения в нормируемых пределах. Практика показала, что механические устройства регулировки частоты работают крайне ненадежно. Каждую мини-ГЭС обслуживает в среднем 2...3 человека непрерывно. К этому персоналу необходимо добавить людей, работающих в районных системах электроснабжения и занятых конкретной станцией. Таким образом, стоимость производства электроэнергии возрастает весьма значительно из-за высоких эксплуатационных расходов. Практика показала, что решением проблемы может быть создание сети автоматизированных мини-ГЭС. Для построения такой сети необходимо совершенствовать элементный состав мини-ГЭС с целью повышения его надёжности и сокращения эксплуатационных расходов. Предлагается обеспечить стабилизацию амплитуды и частоты выходного напряжения ГЭС с помощью электронного преобразователя напряжения, а возбуждение генератора осуществлять от постоянных магнитов. Реализации мини-ГЭС в таком виде способствует, во-первых, значительное развитие электронной элементной базы в части существенного повышения передаваемой мощности, уменьшения потерь преобразования, массы и габаритов аппаратуры, во-вторых, появление новых магнитных материалов с высокой удельной энергией. С учётом изложенного функциональная схема мини-ГЭС, как автономного электротехнического комплекса может быть представлена в структуре, изображенной на рис.1.

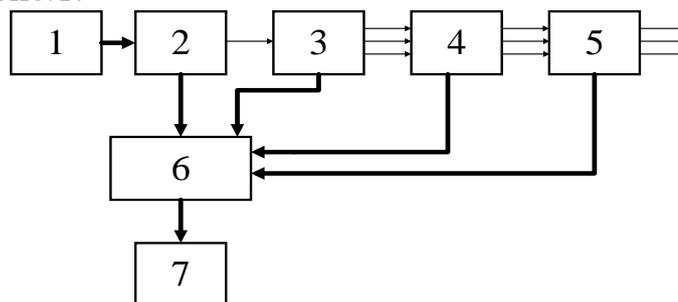


Рис.1. Функциональная схема автономной автоматизированной мини-ГЭС (1- гидротурбина, 2- синхронный трёхфазный генератор (СГ), 3- силовой преобразователь напряжения (СПН), 4- блок датчиков выходных параметров ГЭС (ДВП), 5- блок коммутационно - защитной аппаратуры (КЗА), 6- блок контрольно-диагностической аппаратуры (КДА), 7- блок связи (БС))

**Наиболее слабым звеном в структуре с точки зрения отказов является генератор.** Анализ различных вариантов генератора (асинхронный, вентильно-индукторный, синхронный реактивный, асинхронизированный синхронный, комбинированного возбуждения, синхронный с постоянными магнитами) для автоматической мини-ГЭС с точки зрения надёжности работы показывает, что последний вариант является наиболее предпочтительным. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет минимизировать объем и массу и получить высокие удельные энергетические показатели. Отсутствие потерь на возбуждение делает КПД максимально возможным. Применение специальных конструкторских решений позволяет изготовить его в водопогружном варианте. Современная силовая электроника дает возможность стабилизировать выходные параметры при изменении частоты вращения по якорной цепи, коммутируя большие токи. Перечисленные преимущества позволяют выбрать вариант вен-

тильной синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов в качестве базового для разработки мини-ГЭС.

В работе рассмотрены схемы преобразование напряжения применительно к мини-ГЭС. Как было указано выше, в предлагаемой структуре автоматизированной мини-ГЭС отсутствует непосредственное регулирование частоты и амплитуды выходного напряжения, поскольку на практике она показала низкую надежность и стала основной причиной отказов и аварий. Эта функция возложена на электронную систему управления. В качестве генератора для мини-ГЭС выбрана вентильная синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов, которая серийно производится и имеет хорошие показатели надежности. Но данный класс электрогенераторов не может обеспечить стандартную частоту выходного напряжения при изменении частоты вращения ротора, обусловленной изменением водотока и нагрузкой потребителя. Это обусловлено тем, что постоянные магниты системы возбуждения не могут изменить магнитный поток, определенный намагниченностью высококоэрцитивного материала. В синхронной машине частота жестко привязана к частоте вращения ротора, которая меняется от нагрузки на валу турбины. В этих условиях единственным вариантом получения стандартного напряжения является вариант преобразования переменного нестандартного напряжения в постоянное напряжение, постоянного напряжения в стандартное переменное напряжение.

Исходя из функциональных генерирующей установки, ее структурную схему можно изобразить следующим образом (рис.2)



Рис.2. Структура генерирующей установки мини-ГЭС

Следует отметить, что преобразование переменного напряжения в постоянный является достаточно хорошо изученной проблемой. При всем многообразии пассивных выпрямителей, которые по сути представляют собой индустрию преобразовательной техники, их можно разделить на следующие классы: однополупериодные выпрямители (схема Миткевича В.Ф.) и двухполупериодные выпрямители (схема Ларионова А.Н.). Менее известны полномостовые выпрямители по схеме «параллельные мосты» или «последовательные мосты», которые по многим параметрам превосходят названные выпрямители.

Наиболее отработанными являются схемотехнические решения, привязанные к трехфазной сети. Для наглядности эти варианты трехфазных пассивных выпрямителей приведены на рис.3.

При выборе наиболее приемлемой для мини-ГЭС схемы пассивного выпрямителя следует учесть два противоречивых фактора. С одной стороны, это качество выпрямленного напряжения, с другой стороны это надежность и минимальная цена. Повышение надежности можно достичь только при комплексном подходе. Как известно, вероятность отказа всей системы определяется произведением вероятности отказа ее составных частей, поэтому производитель комплектующих и компонентов стремятся повысить их надежность, чтобы си-

стемы, из которых она строится, имела высокие показатели в отношении отказов. Производители электрических машин и электротехнических комплексов ведут исследования по повышению надежности. Наиболее очевидным путем решения проблемы является увеличение числа фаз обмотки генератора. Этому благоприятствует тот фактор, что генератор работает на выпрямитель и от него не требуется выдать трехфазное напряжение нужной частоты, а также то обстоятельство, что при увеличении числа фаз существенно снижаются пульсации выпрямленного напряжения и увеличивается его среднее значение. При определенном числе фаз качество выпрямленного напряжения настолько улучшается, что можно отказаться от ненадежных, дорогих и громоздких фильтров. Отказ одной из фаз из-за обрыва или выхода из строя диода не приводит всю систему в аварийное состояние, а только несколько снижает качество выпрямленного напряжения, которое может оставаться в пределах нормы.

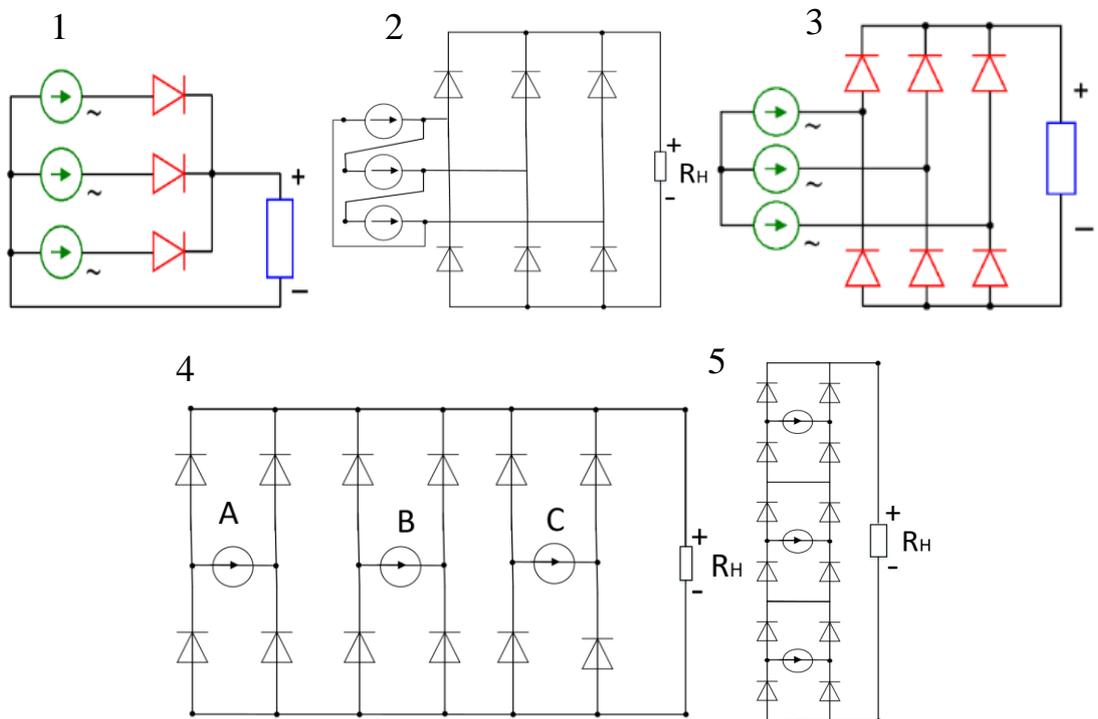


Рис.3. Схемы пассивных выпрямителей (1-однополупериодный, 2-двухполупериодный при соединении фаз в кольцо, 3-двухполупериодный при соединении фаз в звезду, 4-соединения мостов параллельно, 5-соединении мостов последовательно)

Анализ состояния вопроса по разработки многофазных систем электропитания в области авиации, космоса, специальной техники позволяет сделать вывод, что проведенные исследования касаются изучения нормальных неаварийных режимов работы. Основной недостаток проведенных НИОКР заключается в том, что они рассматривают отдельно многофазный генератор и многофазный преобразователь. **Исследованию комплекса многофазный генератор – многофазный выпрямитель уделено очень мало внимания, а это ограничивает использование уже полученных результатов.** Кроме этого, практически не исследованы вопросы надежности и вероятности отказов такого комплекса. С одной стороны, увеличение числа фаз повышает надежность работы генератора и его энергетические параметры, с другой стороны, увеличение количества силовых диодов повышает вероятность их отказа в соответствии с законом произведения вероятности. Эти два противоречивых фактора должны привести к оп-

тимальному решению по выбору числа фаз, как для систем электроснабжения вообще, так и для энергетического комплекса мини-ГЭС в частности.

**Во второй главе** делается теоретический анализ многофазной модели генератор-выпрямитель. Рассмотрены следующие пассивные выпрямители: однополупериодная схема, двухполупериодная схема при соединении фаз в звезду и кольцо, полномостовая схема при соединении мостов параллельно и последовательно. Выведены аналитические зависимости для среднеквадратичного выпрямленного напряжения, уровня пульсаций и коэффициента использования обмотки якоря. Проведен сравнительный анализ схем выпрямления.

При совместной работе генератора и выпрямителя выпрямительные схемы не позволяют фазам генератора работать одновременно на полную мощность. В зависимости от тактов выпрямления диоды запирают фазы, отключая их от нагрузки. При этом якорная медь подключенных фаз работает только на межкоммутационном интервале. Это снижает энергетические показатели генератора. В связи с этим возникает задача выбора схемы выпрямления и числа фаз по критерию качества выходного напряжения, эффективности использования якорной обмотки и показателям надежности.

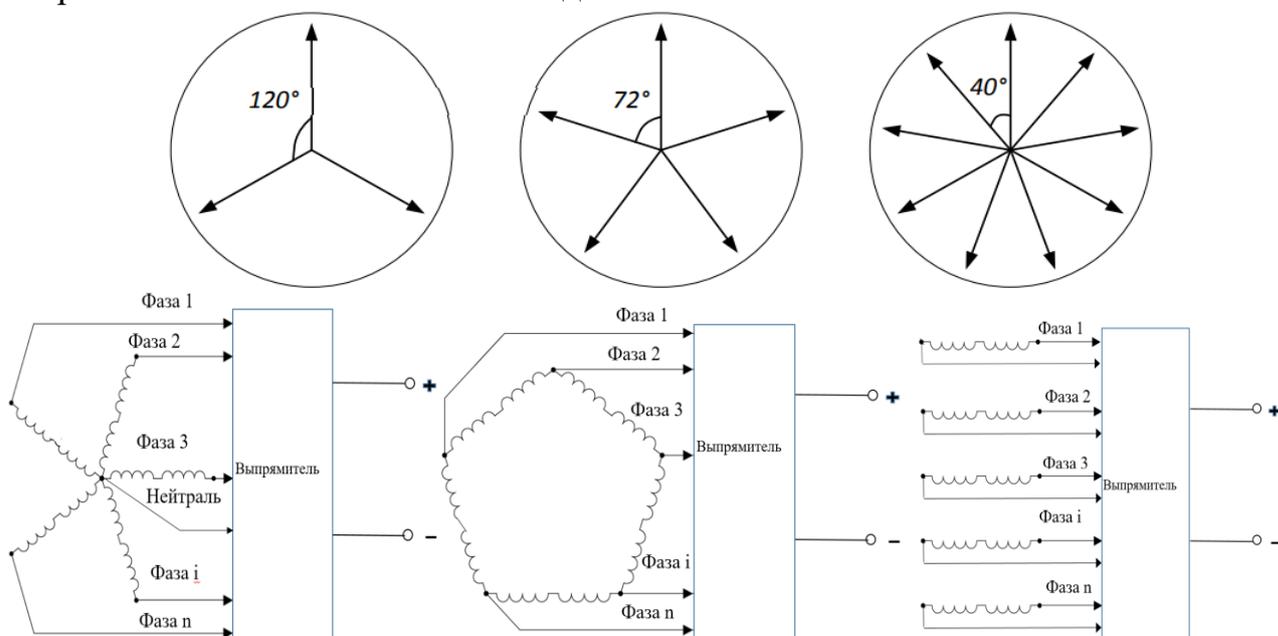


Рис.4. Векторы фаз многофазной системы и схемы соединения фаз с выпрямителем.

Теоретически возможны следующие варианты соединения фаз в системе генератор-выпрямитель: соединение фаз в звезду, соединение фаз в кольцо, соединение фаз в мосту независимо друг от друга (рис.4).

Из схем выпрямления взяты наиболее применяемые на практике: однополупериодная, двухполупериодная и мостовая. Для всех этих схем были теоретически выведены средноквадратические значения выпрямленного напряжения, среднее значение выпрямленного напряжения, уровень пульсаций выпрямленного напряжения и коэффициент использования якорной обмотки при изменении числа фаз от 3-х до 9-ти.

В качестве примера результаты этого анализа представлены внизу для двухполупериодного выпрямления и соединения фаз в кольцо.

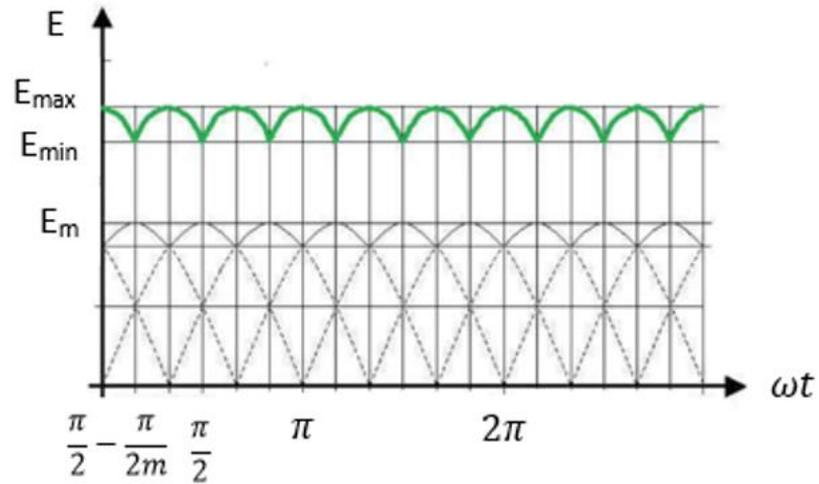


Рис.5. Зависимость выпрямленного напряжения при произвольном числе фаз, соединенных в кольцо, для двухполупериодного выпрямления

Максимальное значение выпрямленного напряжения определим для всех вариантов количества фаз от 3 до 9 исходя из равенства суммы ЭДС фаз параллельной ветви.

Для 3-х фаз:

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = E_m$$

Для 4-х фаз:

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 1.414E_m$$

Для 5-ти фаз:

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) = 1.618E_m$$

Для 6-ти фаз:

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{2\pi}{6}\right) + E_m = 2.0E_m$$

Для 7-ми фаз:

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{2\pi}{7}\right) + E_m = 2.247E_m$$

Для 8-ми фаз:

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) + E_m \cos\left(\frac{\pi}{8} + \frac{2\pi}{8}\right) = 2.613E_m$$

Для 9-ти фаз:

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{9}\right) + E_m \cos\left(\frac{\pi}{9} + \frac{2\pi}{9}\right) = 2.879E_m$$

Минимальное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{min} = E_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}\right).$$

Среднее значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}{2}$$

Пульсации выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$\Delta E = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{\text{сркв}} = \frac{m \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi}$$

В таблице 1 приведены параметры для этого варианта выпрямления

Таблица 1. Показатели двухполупериодного выпрямителя для различного количества фаз, соединенных в кольцо

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{\text{сркв}}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{\text{ср}}$	Пульсации выпрямленного напряжения $\Delta E$	Коэффициент использования обмотки $K_{\text{исп\_якоря}}$
3	0.955	0.933	0.072	1.0
4	1.378	1.36	0.04	1.0
5	1.592	1.578	0.025	1.0
6	1.977	1.966	0.017	1.0
7	2.228	2.219	0.013	1.0
8	2.596	2.588	0.0097	1.0
9	2.865	2.721	0.00765	1.0

Аналогичный анализ был выполнен и для других вариантов выпрямления.

Сравнительный анализ схем выпрямления показал, что однополупериодное выпрямление имеет низкий коэффициент использования якорной обмотки, так как в единицу времени при этой схеме работает только одна фаза. Соответственно с увеличением числа фаз этот показатель снижается. Данный вариант уступает рассмотренным схемам по среднеквадратичному выпрямленному напряжению и по среднему выпрямленному напряжению. Кроме этого, данная схема имеет наибольшее значение пульсаций выпрямленного напряжения, по сравнению с другими рассмотренными схемами. Для реализации данной схемы необходимо наличие доступной нейтрали при соединении фаз, что тоже вызывает некоторые технологические сложности. Из положительных факторов следует отметить минимальное количество диодов для данной схемы, что упрощает монтаж и благоприятно сказывается на снижении стоимости комплекса. По совокупности показателей данный вариант является наименее предпочтительным для применения к автоматизированной мини-ГЭС, тем не менее он будет рассмотрен далее при анализе надежности в случае аварийных отказов.

Двухполупериодные схемы выпрямления имеют лучшие энергетические показатели по сравнению с однополупериодной схемой. Это объясняется тем, что в единицу времени в преобразовании энергии задействовано большее количество фаз. При этом при соединении в звезду работают две фазы. Это

повышает выпрямленное напряжение и коэффициент использования якорной обмотки. Для этой схемы выпрямления наиболее выгодно соединить фазы в кольцо. При этом все фазы вступают в работу и коэффициент использования обмотки якоря становится равным 1.0. Выпрямленное напряжение определяется количеством фаз в параллельной ветви между включенными в данный момент диодами. При увеличении количества фаз среднее квадратичное выпрямленное напряжение и среднее выпрямленное напряжение растут. С точки зрения этого показателя количество фаз следует увеличивать. Для двухполупериодной схемы выпрямления пульсации выпрямленного напряжения снижаются по сравнению с однополупериодной схемой. Для схем соединения в звезду и кольцо они одинаковы. Негативным фактором для этого варианта является увеличение числа силовых диодов в 2 раза. Это увеличивает стоимость и повышает вероятность отказов при эксплуатации. Тем не менее по совокупности показателей двухполупериодный многофазный выпрямитель с генератором могут быть применены для автоматической мини-ГЭС и он будет рассмотрен в дальнейшем с точки зрения устойчивости к отказам.

Рассмотрение полной мостовой выпрямительной схемы дало следующие результаты. Отметим, что данный вариант имеет в 4 раза больше диодов по сравнению с однополупериодной схемой и в 2 раза больше по сравнению с двухполупериодной схемой. Количество токоподводов от генератора к выпрямителю тоже увеличивается в 2 раза. Это повышает вероятность отказов, усложняет электромонтаж, увеличивает стоимость.

Вариант параллельного соединения мостов показал низкую эффективность по анализируемым показателям. Это связано с тем, что в данный момент времени работает только один мост и, соответственно одна фаза. Эта схема лучше по сравнению с однополупериодной по показателям выпрямленного напряжения и пульсациям, но не существенно. Коэффициент использования якорной обмотки низкий. Он уменьшается с увеличением числа фаз.

Вариант последовательного соединения мостов показал самые высокие показатели по сравнению со всеми рассмотренными выше схемами. Он имеет наибольшие среднее квадратичное и среднее выпрямленные напряжения. Это обусловлено тем, что в данной схеме на выпрямленное напряжение работают все фазы. Коэффициент использования якорной обмотки для этого варианта равен 1.0.

**В третьей главе** разрабатывается цифровая модель генератора и пассивного выпрямителя. Необходимость разработки цифровой модели обусловлена тем, что на выпрямленное напряжение, помимо схем выпрямления, влияют такие параметры якорной обмотки, как коэффициент укорочения, коэффициент распределения, коэффициент скоса. При создании цифровой модели для корректности сравнения был выбран генератор одних и тех же габаритов, имеющих одни и те же размеры активных частей, одинаковое количество проводников. Изменялось только количество пазов для возможности уложить симметричные обмотки с различным количеством фаз. На основе цифровой модели были исследованы штатные и нештатные режимы работы при обрывах фаз и диодов для различных схем выпрямления. Проведен сравнительный анализ вариантов. В качестве критериев сравнения были выбраны среднее напряжение и уровень пульсаций.

Цифровая модель была создана в программной среде Ansys Electronics Desktop с приложением имитации электронных компонентов Maxwell Circuit (рис.6).

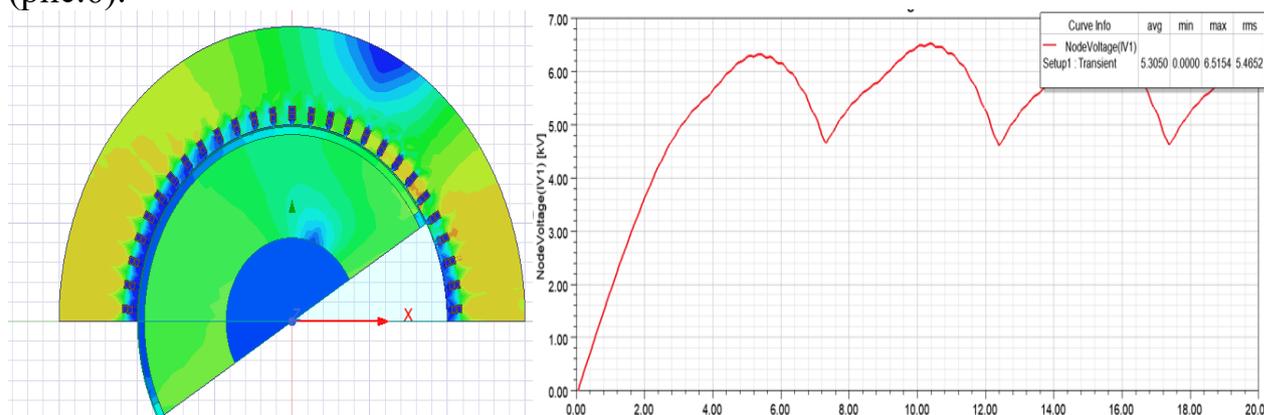


Рис.6. Цифровая модель генератора и выпрямителя в Ansys Electronics Desktop

На данных цифровых моделях был проведен анализ вариантов выпрямления напряжения для различного количества фаз и различных схем выпрямителя для нормального режима и аварийных режимов. Результаты тестирования представлены ниже.

Таблица 2. Выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения при нормальном режиме работы на холостом ходу для различного числа фаз

Нормальный режим	Однополупериодная схема	Двухполупериодная схема				Мостовая схема				
		звезда		кольцо		в параллель		послед.		
Количество фаз	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$
3 фазы	2.96	0.55	5.33	0.15	3.5	0.12	3.2	0.4	6.06	0.072
4 фазы	2.26	0.4	4.5	0.14	3.58	0.1	2.5	0.34	6.1	0.04
5 фаз	1.88	0.34	3.93	0.13	3.6	0.1	2.1	0.3	6.2	0.03
6 фаз	1.58	0.3	3.07	0.13	3.67	0.08	1.7	0.27	6.3	0.02
7 фаз	1.25	0.27	2.5	0.12	3.8	0.05	1.4	0.23	6.4	0.017
8 фаз	1.19	0.23	2.0	0.12	3.9	0.05	1.3	0.2	6.5	0.015
9 фаз	1.06	0.19	1.18	0.12	4.17	0.03	1.1	0.17	6.67	0.1

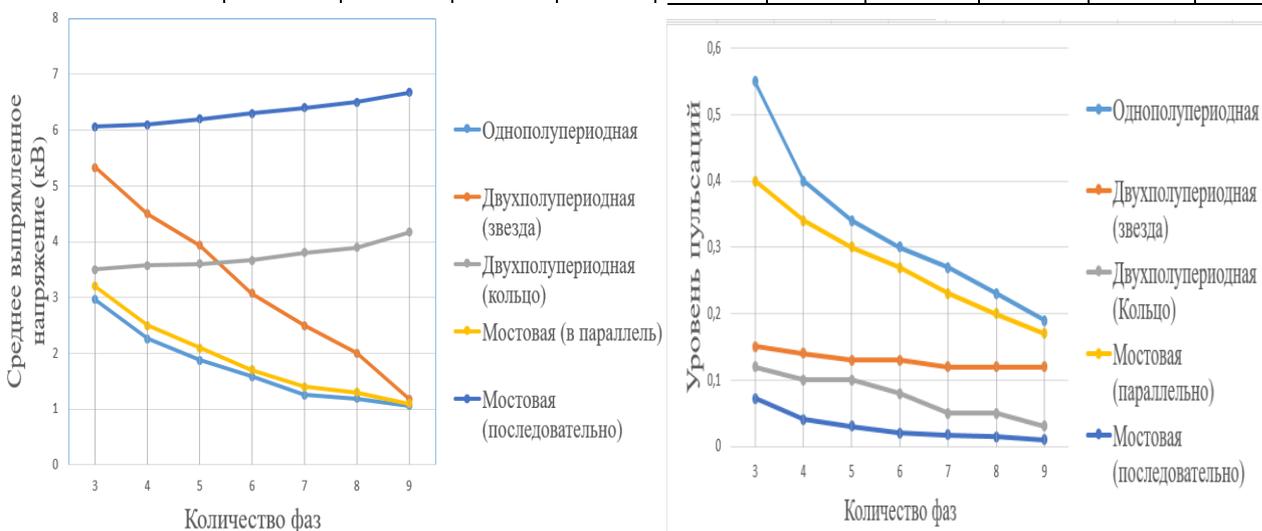


Рис.7. Среднее напряжение и уровень пульсаций выпрямленного напряжения для различных схем при нормальном режиме на холостом ходу

Таблица 3. Выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения при обрыве одной фазы и работе на холостом ходу для различного числа фаз

Обрыв одной фазы	Однополупериодная схема		Двухполупериодная схема				Мостовая схема			
			звезда		кольцо		в параллель		послед.	
Количество фаз	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$
3 фазы	2.19	1.0	3.8	0.61	3.32	0.71	3.02	0.58	4.34	0.3
4 фазы	1.99	0.66	3.2	0.58	3.31	0.5	2.26	0.45	4.7	0.28
5 фаз	1.88	0.57	3.0	0.5	3.5	0.4	1.9	0.34	5.02	0.25
6 фаз	1.58	0.5	2.5	0.44	3.62	0.3	1.59	0.25	5.39	0.23
7 фаз	1.3	0.4	2.1	0.4	3.7	0.25	1.37	0.23	5.5	0.2
8 фаз	1.19	0.3	1.5	0.3	3.87	0.23	1.2	0.22	5.75	0.17
9 фаз	1.06	0.22	1.15	0.22	4.09	0.2	1.066	0.2	6.37	0.14

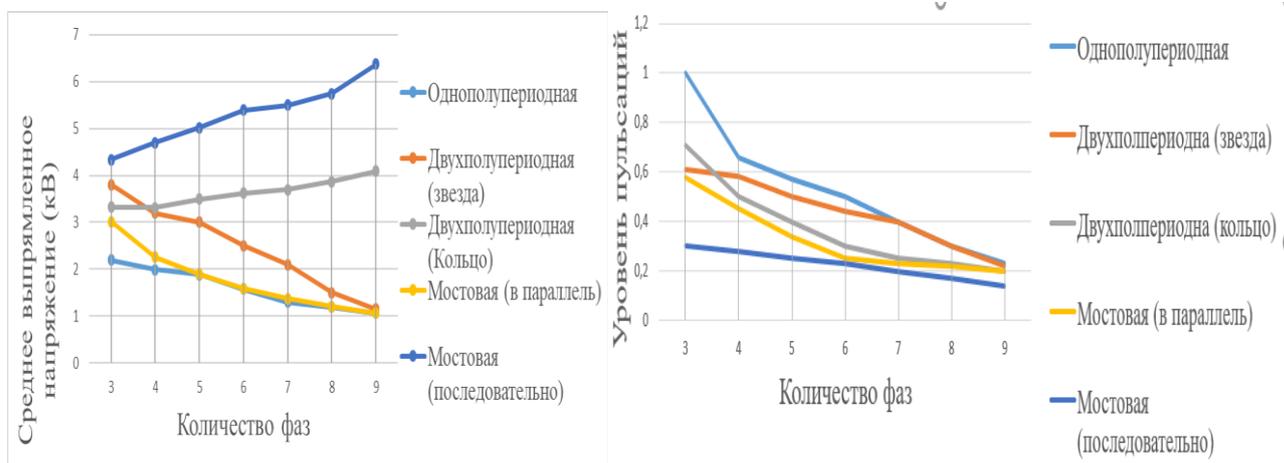


Рис.8. Среднее напряжение и уровень пульсаций выпрямленного напряжения для различных схем при обрыве одной фазы на холостом ходу

Таблица 4. Выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения при обрыве диода и работе на холостом ходу для различного числа фаз

Обрыв одного диода	Однополупериодная схема		Двухполупериодная схема				Мостовая схема			
			звезда		кольцо		в параллель		послед.	
Количество фаз	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	$\Delta U$
3 фазы	2.19	0.75	4.29	1.0	3.16	1.0	2.98	0.6	5.01	0.5
4 фазы	1.99	0.66	3.76	0.8	3.76	0.7	2.26	0.5	5.19	0.38
5 фаз	1.88	0.57	3.35	0.65	3.75	0.5	1.9	0.38	5.5	0.3
6 фаз	1.58	0.5	3.07	0.56	3.62	0.3	1.59	0.3	5.63	0.26
7 фаз	1.3	0.4	2.82	0.5	4.03	0.21	1.37	0.25	6.0	0.18
8 фаз	1.19	0.3	2.34	0.34	3.83	0.2	1.2	0.2	6.19	0.1
9 фаз	1.06	0.22	2.06	0.22	4.1	0.2	1.06	0.2	6.3	0.06

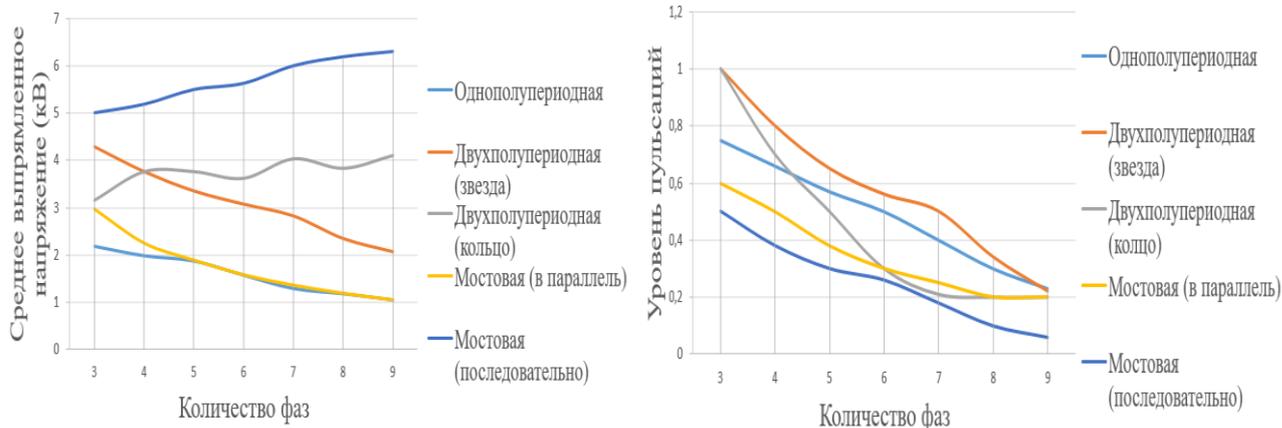


Рис.9. Среднее выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения для различных схем при обрыве диода на холостом ходу

Анализ приведенных кривых показывает, что однополупериодная схема по величине выпрямленного напряжения уступает всем рассмотренным схемам, причем с увеличением количества фаз ее эффективность по этому показателю снижается. Эта схема также уступает и по второму показателю уровню пульсаций напряжения, как в нормальном режиме, так и в нештатном режиме обрыва одной фазы или выхода из строя одного диода. Данный вывод объясняется особенностью работы якорной обмотки на выпрямитель, который в единицу времени подключает только одну фазу. При увеличении числа фаз при одном и том же общем количестве активных проводников число витков в фазе уменьшается, что и приводит к снижению величины выпрямленного напряжения и увеличению уровня пульсаций во всех режимах работы. По названным причинам исключим эту схему из дальнейшего анализа.

Аналогичные недостатки имеет и полномостовая схема при соединении мостов в параллель, хотя она несколько лучше по обоим критериям.

Двухполупериодные схемы показали лучшую эффективность по выбранным показателям. При этом варианты при соединении фаз в звезду имеют преимущество перед соединением фаз в кольцо от 3-до 5 фаз. При дальнейшем увеличении числа фаз преимущество получает обмотка, соединенная в кольцо при одном том же выпрямителе. Эту тенденцию можно объяснить влиянием обмоточного коэффициента и коэффициента использования обмотки. Обмотка, соединенное в кольцо так же имеет преимущество по уровню пульсаций напряжения, как в нормальном режиме работы, так и в нештатных режимах работы при обрывах. При увеличении числа фаз это преимущество увеличивается. Эта схема имеет в два раза больше диодов по сравнению с однополупериодной схемой, но при этом, в два раза меньше диодов по сравнению с полномостовыми схемами.

Полномостовая схема при последовательном соединении мостов имеет преимущество по обоим критериям как в нормальном режиме работы, так и в нештатных режимах работы. При увеличении числа фаз это преимущество увеличивается. Это объясняется эффективной работой активных проводников на выпрямленное напряжение.

Однако при этом возникает техническое противоречие, связанное с увеличением стоимости комплекса за счет электронных компонентов, усложнения технологии изготовления генератора и самой конструкции. При увеличении

числа фаз достаточно сложно обеспечить токоподвод к электрической машине, так как каждая фаза требует 4-х проводников. Единственно приемлемым вариантом является встраивание выпрямителя в корпус генератора, что требует дополнительно конструктивной проработки и не всегда возможно по условиям эксплуатации.

**В четвертой главе** сделан анализ показателей надежности вентильного генератора с неуправляемым выпрямителем при нештатных ситуациях для различного числа фаз.

В комплексе рассмотрены следующие отказы, оказывающие влияние на работоспособность генератора:

- 1) обрыв одного диода в одной из стоек выпрямителя;
- 2) обрыв двух диодов в одной из стоек выпрямителя;
- 3) обрыв двух диодов в двух соседних стойках выпрямителя;
- 4) обрыв двух диодов в двух несмежных через одну стойку выпрямителя;
- 5) обрыв двух диодов в двух несмежных через две стойки выпрямителя;
- 6) разрыв обмотки в одной из фаз генератора;
- 7) разрыв обмоток в двух соседних фазах генератора;
- 8) разрыв обмоток в двух несмежных через одну фазу генератора;
- 9) разрыв обмоток в двух несмежных через две фазы генератора.

Таблица 5 – Вероятность отказа не более  $k$  из  $2 \times N$  диодов выпрямителя

$N \backslash k$	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,9550	0,9400	0,9250	0,9100	0,8950	0,8800	0,8650	0,8500
1	0,9991	0,9984	0,9974	0,9962	0,9948	0,9932	0,9913	0,9893
2	0,999992	0,999976	0,999949	0,999907	0,999846	0,999764	0,999656	0,999519

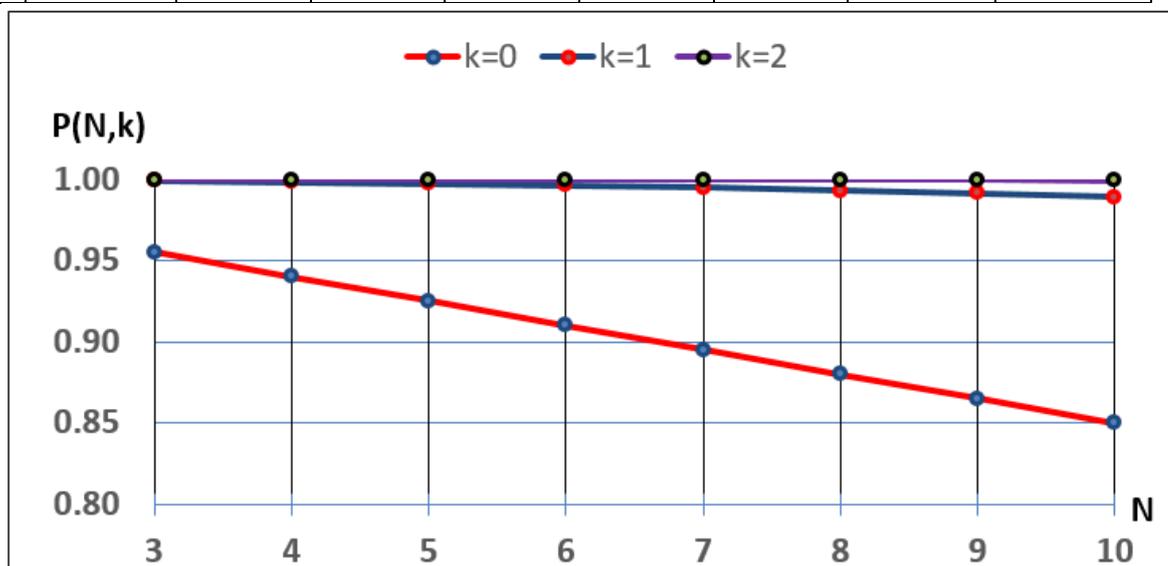
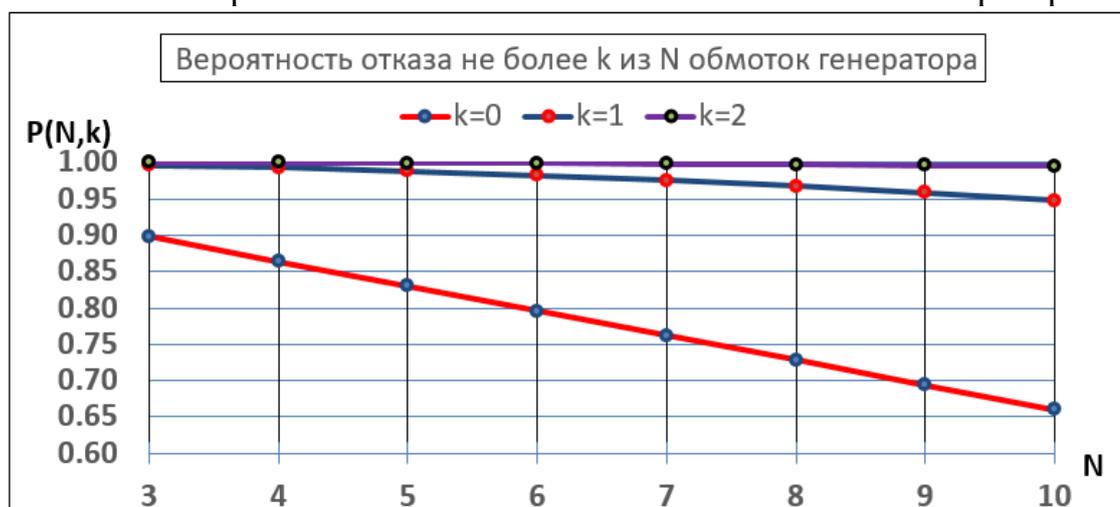


Рис.10. Вероятность отказа не более  $k$  из  $2 \times N$  диодов выпрямителя

Таблица 6 – Вероятность отказа не более  $k$  из  $N$  обмоток генератора

$N \backslash k$	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,898000	0,864000	0,830000	0,796000	0,762000	0,728000	0,694000	0,660000
1	0,996532	0,993064	0,988440	0,982660	0,975724	0,967632	0,958384	0,947980
2	0,999961	0,999843	0,999607	0,999214	0,998624	0,997799	0,996698	0,995284

Рис.12. Вероятность отказа не более  $k$  из  $N$  обмоток генератора

Анализ кривых надёжности подтвердил наличие разнонаправленных тенденций: увеличение числа фаз ведёт к снижению пульсаций, но при этом снижаются показатели надёжности генератора. Поэтому необходимо стремиться к минимально возможному числу фаз генератора при условии обеспечения требований к выходным характеристикам и надёжности генератора.

Исходя из проведенного цифрового тестирования различных схем и проведенного анализа вероятностей отказов при требуемом уровне качества напряжения по уровню пульсаций можно рекомендовать 5-ти или 6-ти фазную обмотку, соединённую кольцом при двухполупериодной схеме выпрямления. При этом, преимущество следует отдать 6-ти фазной обмотке, так как ее легче всего уложить в пазы традиционной трехфазной обмотки, что значительно упрощает технологию изготовления генератора.

**В пятой главе** показаны результаты испытаний генератора с шестифазной обмоткой для нормальной работы и нештатной работы обрыва фазы или обрыва диода. Был выбран серийный генератор с когтеобразными полюсами, который был переделан по шестифазную обмотку (рис.13). Исследовались соединения фаз в звезду и кольцо в нормальном режиме и нештатных режимах обрыва одного диода и одной фазы.

Полученные результаты испытаний показали, что разработанная цифровая модель и теоретические выкладки достаточно точны. По выпрямленному напряжению погрешность составила около 7.1%, а по уровню пульсаций погрешность находится в пределах 23- 28 %, что вполне приемлемо.

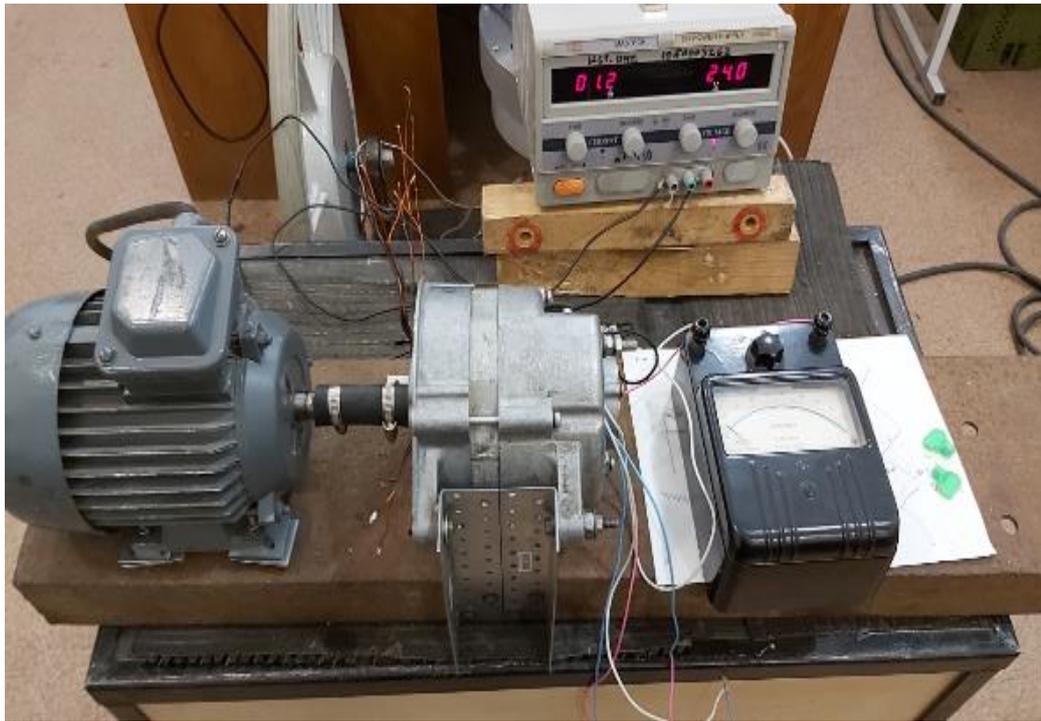


Рис.13. Стенд для испытания генератора в нормальном и нештатном режимах

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По проведенным исследованиям можно сделать следующие основные выводы и рекомендации:

1. Основным параметром автоматических необслуживаемых мини-ГЭС является высокая надежность при заданном качестве вырабатываемой электроэнергии. Наиболее реальным направлением решения этой задачи является ориентация на создания комплекса многофазный вентильный генератор с возбуждением от постоянных магнитов и многофазный двухполупериодный пассивный выпрямитель. Повышение надежности комплекса обусловлено его работоспособностью при отказе одной или нескольких фаз из-за обрыва или входа из строя диода.

2. Проведен анализ работы однополупериодного выпрямителя, двухполупериодного выпрямителя, мостового выпрямителя с многофазным генератором при изменении числа фаз. Сделан вывод о преимуществах этих схем друг перед другом. Полученные таблицы основных показателей для разных вариантов выпрямления и изменении фаз от 3-х до 9-ти можно использовать в инженерной практике для оценки и выбора вариантов выпрямления.

3. Для анализа эффективности выпрямительных схем при увеличении числа фаз была построена цифровая модель генератора и выпрямителя. Эта необходимость была обусловлена влиянием на показатели качества обмоточного коэффициента и коэффициента использования обмотки, работающей на выпрямитель. При этом для всех вариантов исследовался генератор, имеющий одинаковые габариты и основные размеры (диаметр рашотки и активную длину), число полюсов и общее число проводников в пазах. Это позволило оценить эффективность получения выпрямленного напряжения и снижения уровня

пульсаций выпрямленного напряжения при различных соединениях якорной обмотки в фазы и различных схемах выпрямления.

4. Проведены цифровые исследования однополупериодной схемы, двухполупериодной схемы при соединении фаз в звезду и кольцо, а также полные мостовые схемы при соединении мостов параллельно и последовательно. Тестирование проводилось для нормального режима и нештатного режима обрыва фазы якорной обмотки или обрыва диода. В качестве показателей эффективности схем были приняты максимум среднего выпрямленного напряжения и минимум уровня пульсаций напряжения. Сделан вывод о необходимости оптимизации числа фаз как с точки зрения себестоимости, так и по показателям надежности.

5. Проведен анализ вероятности отказов при обрыве диодов и обмоток для генераторов с различным числом фаз коэффициентным методом расчета. В качестве показателя качества был выбран уровень пульсаций выпрямленного напряжения. Доказано, что с точки зрения требуемой надежности и уровня пульсаций существует оптимальное количество фаз, удовлетворяющее этим критериям.

6. Для мини-ГЭС рекомендован вариант 6-ти фазной обмотки, соединенной в кольцо, работающей на двухполупериодный выпрямитель.

7. Результаты испытаний генератора подтвердили корректность математических выкладок главы 2 и достаточную точность цифровой модели нормального и нештатного режима для шестифазного генератора.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:**

1. **Давлатов, А.М.** Анализ эффективности мини-ГЭС систем электроснабжения горных районов Республики Таджикистан / **А.М. Давлатов, Х.Д. Бобоев, Д.Ю. Гулов, Р.Т. Абдуллозода** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 120-126. 0,44 п.л./ 0,22 п.л.

2. Voronin, S. Features of Balancing a Three-Phase Step Voltage at the Output of Semiconductor Converters / S. Voronin, O. Sulstonov, **A. Davlatov** // Proceedings - 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2020, Magnitogorsk, 2020. – P. 119–123. 0,31 п.л. /0,155 п.л. (Scopus)

3. Воронин, С.Г. Сравнительная оценка схем соединения обмоток синхронных генераторов в составе источников постоянного тока / С.Г. Воронин, Н.В. Клиначев, **А.М. Давлатов, Д.В. Пауков** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 110-118. 0,812 п.л./0,2 п.л.

4. Voronin, S. Comparative evaluation of connection schemes of synchronous generator windings as part of Dc sources / S. Voronin, **A. Davlatov, B. Kosimov** // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112072. 0,31 п.л./ 0,155 п.л. (Scopus)

5. Kosimov, B. Development brushless direct current electric motor of the Pilger mill drive for the technology of seamless pipes manufacturing based on the magnetic

system with claw-poles / B. Kosimov, S. Gandzha, D. Aminov, **A. Davlatov**, D. Gulov, I. Abdulloev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Yeketebug, 2020. P. 012004. 0,31 п.л. /0,155 п.л. (Scopus)

6. Воронин, С.Г. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана. / С.Г. Воронин, **А.М. Давлатов**, О.О. Султонов, Б.И. Косимов, Д.Ю. Гулов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2019. – Т. –19. – №3. – С. 100–107. 0.812 п.л./0.2 п.л.

7. **Davlatov, A.** Development Directions of Power Supply for Rural Areas of Tajikistan / **A. Davlatov**, S. Voronin, B. Kosimov // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2019. – P. 157-161. 0,31 п.л/ 0,155 п.л (Scopus)

8. **Davlatov, A.** Development of a concept of an energy-efficient house for an environmentally friendly settlement in the South Ural / **A. Davlatov**, S. Aminov, D., B. Kosimov, A. Mahmudov // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE 2019, Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2019 P. 11009. 0,31 п.л. /0,155 п.л. (Scopus)

#### **Патент на изобретения:**

9. Патент № 2771777 С1 Российская Федерация, МПК H02J 3/26. Устройство симметрирования трехфазного напряжения на выходе электронного полупроводникового преобразователя при несимметричной нагрузке: № 2021133548: заявл. 18.11.2021: опубл. 12.05.2022 / С. Г. Воронин, О. О. Султонов, **Давлатов А.М** [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет.

#### **Публикации в других изданиях**

10. **Давлатов, А.М.** Состояние малой энергетики в Республике Таджикистан и анализ традиционных структур мини-ГЭС / **А.М. Давлатов**, Х.Д. Бобоев, Б.И. Косимов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2021. – № 10. – С. 55– 60. 0,37 п.л. /0,185 п.л.

11. Гулов, Д.Ю. Эффективность электроснабжения горных районов Таджикистана. / Д.Ю. Гулов, **А.М. Давлатов**, М.В. Горт // Международный научно-исследовательский журнал 2021. – № 1 – Т. 103. – Част 1. – С. 61–66. 0.58 п.л./0.2 п.л.

12. **Давлатов, А.М.** Тенденция развития малых ГЭС в горных регионах Республики Таджикистан / **А.М. Давлатов** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов, Москва, 12–13 марта 2020 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2020. – С. 1099. 0,06 п.л.

13. **Давлатов, А.М.** Анализ состояния малой энергетики в республике Таджикистан / **А.М. Давлатов**, Д.Ю. Гулов, М.М. Давлатов // Молодая мысль – развитию энергетики, Материалы V (XX) Всероссийской научно-технической конференции студентов и магистрантов, 20-24 апреля 2020 года Братского государственного университета 2020. – С.12–17. 0,37 п.л. /0,185 п.л.

14. **Давлатов, А.М.** Повышение экономической эффективности малых гидроэлектростанций Республики Таджикистан / **А.М. Давлатов**, Б.И. Косимов, Д.Ю. Гулов, О.О. Султонов // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 20–21 марта 2019 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 456–461. 0,37 п.л. /0,185 п.л.

Давлатов Азамджон Махмадеевич

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МИНИ-ГЭС НА БАЗЕ МНОГОФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.