

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

На правах рукописи



ГУЛОВ Диловар Юсуфович

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО
ЗАМЫКАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Ганджа Сергей Анатольевич

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

Грачев Павел Юрьевич,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
технический университет», профессор кафедры
теоретической и общей электротехники;

Вавилов Вячеслав Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный техни-
ческий университет», ведущий научный сотруд-
ник кафедры электромеханики

Защита состоится «27» мая 2021 г. в 10:15 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.01.02 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=2155>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Болотин Кирилл Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность предмета исследования

Мировое потребление энергии, по прогнозам на 2030 год, возрастет на 55% по сравнению с сегодняшним днем из-за экономического роста, урбанизации и роста населения. В настоящее время наибольшая часть требуемой энергии вырабатывается за счет ископаемого топлива, но данная технология не имеет перспективы развития. Это связано с одной стороны с истощением ресурсов углеводородов, а с другой стороны - с жесткими требованиями к экологии технологических процессов по производству электроэнергии. Необходимо осваивать новые источники энергии, и в этой тенденции ведущая роль принадлежит альтернативным источникам, преобразующим энергию света, воды, биоресурсов в электричество. Этот процесс в наибольшей степени затрагивает развивающиеся страны, для которых экономически сложно вкладывать финансы в создание крупных энергосистем. При этом следует учесть, что мощные источники энергии, включая гидроресурсы, уже освоены. Во многих странах существует развитая сеть крупных гидроэлектростанций, и возможность построить дополнительные ГЭС становится все меньше. При этом следует отметить, что энергоресурс малых и средних рек практически не использован, а по экспертным оценкам он в десятки раз превосходит энергоресурсы крупных рек. Например, для Таджикистана гидроэнергетические ресурсы, возможные к использованию, составляют: по мощности - 19,3 млн. кВт, а по выработке - 143,6 млрд. кВт·ч. Это указывает на существенные потенциальные возможности использования возобновляемых гидроэнергетических ресурсов малых и средних рек, но для его освоения необходимо строительство большого количества мини-ГЭС.

Анализ функциональной схемы мини-ГЭС показывает, что она является достаточно сложным техническим объектом, требующим периодического обслуживания и постоянного наблюдения. Действительно, статистика показывает, что каждую ГЭС мощностью от нескольких десятков кВт до единиц МВт непрерывно обслуживает в среднем 2...3 человека. 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. Разрешить данное противоречие можно, если обслуживаемые многочисленным персоналом мини-ГЭС заменить на полностью автоматизированные мини электростанции, которые работали бы автономно или параллельно с централизованной сетью.

Одним из требований, которые предъявляются к этим станциям-роботам, является высокая надежность. Интеллектуальная компьютерная система управления такими станциями должна помимо обеспечения штатного режима работы в зависимости от нагрузки обеспечивать диагностику и анализ работоспособности всех систем, и информировать центральные диспетчерские службы о возможных и вероятных неисправностях. Современный уровень компьютеризации энергетических систем способен решить эту задачу, но эти системы надо создавать и вести научные исследования в этом направлении.

Таким образом, **создание полностью автоматических мини-ГЭС и разработка для них систем диагностики рабочего состояния и**

предупреждения аварийных отказов является актуальной научной проблемой и востребованной инженерной задачей.

Степень научной разработанности исследуемой темы

Актуальность и востребованность тематики привлекает к ней большое количество научных исследований. Не вдаваясь в подробный анализ, отметим вклад Российских ученых в эту проблему: Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского (Безруких П.П.), Московский энергетический институт (А. В. Иванов-Смоленский, С. В. Иваницкий, Н. И. Пашков, В. Я. Беспалов, К. Я. Вильданов, В.А. Морозов, В.И. Нагайцев), Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (Вольдек А.И., Костенко М.П., Пиотровский Л.М., Барков К.В., Елистратов В.В.), Ивановский государственный энергетический университет (Ю.Б.Казаков, Е. Б. Герасимов, А. И. Тихонов, Н. Н. Новиков), Новосибирский государственный университет (Ю.В.Петренко, А. Г. Приступ, М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров), Омский институт путей сообщения (Авилов В.Д., Иванилов Ю.Л., Сергеев Р.В., Серкова Л.Е., Третьяков Е.А., Харламов В.В., Шкодун П.К.), Самарский государственный технический университет (Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Зубков Ю.В., Грачев П.Ю., Чеботков Э.Г., Ануфриев А.С.), Уральский федеральный университет (А.Т. Пластун, Ф. Н. Сарапулов, С. Е. Миронов, Е. Н. Андреев), Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова (Местников Н.П., Константинов А.Ф., Бурянина. Н.С.), Южно-Уральский государственный университет (Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Ганджа С.А.)

В наукометрической базе Scopus и Web of Science существует обширный материал, посвященный этой проблеме. Рассмотрены различные типы существующих мини-ГЭС, различные типы генераторов и систем управления к ним. В частности, изучены вентильно-индукторные генераторы, генераторы с электромагнитной редуцией, асинхронизированные синхронные генераторы. Хорошо представлены методы анализа сложных электромеханических систем на основе новейших инженерных технологий.

Большое количество научных работ говорит о том, что на сегодняшний день вопрос о выборе типа мини-ГЭС до конца не решен и идет активный поиск. Следует отметить, что исследования носят разрозненный характер по решению локальных узких технических задач. Не исследованы вопросы работы мини-ГЭС, работающей в автоматическом режиме без обслуживающего персонала, в частности вопросы надежности и безопасности, диагностики и прогнозирования неисправностей и отказов, включая внезапные отказы, вопросы качества питания при несимметричной нагрузке, вопросы оптимального управления автономной мини-ГЭС.

Современный уровень развития методов анализа с применением новейших компьютерных средств позволяет решить поставленные задачи. В данной научной работе исследования сконцентрированы на анализе аварийных режимов короткого замыкания и разработке методов их диагностики.

Цель диссертационного исследования

В основу рассматриваемой работы положена идея создания автономной необслуживаемой ГЭС. При этом функцию контроля всех систем, которые выполнял штатный персонал, на себя должна взять автоматизированная

компьютерная система. Для этого необходимо разработать устройства, реализующие функции диагностики состояния узлов и агрегатов ГЭС и функции связи с центральным диспетчерским пунктом системы электроснабжения.

Одним из важнейших элементов ГЭС является генератор, надёжность его работы и ресурс связаны с грамотной эксплуатацией, своевременным обслуживанием и выявлением не только возникших неисправностей, но и их предупреждением. Основными аварийными режимами генератора являются короткие замыкания разных видов: витковые короткие замыкания, замыкание фазы на корпус, межфазовые витковые короткие замыкания, поэтому основное внимание в работе посвящено анализу этих видов неисправностей и разработке методов их диагностики. Сложность анализа заключается в том, что его надо выполнить на работающем генераторе без вывода его из эксплуатации.

Задачи исследования

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

1. Разработать метод определения несимметрии генератора при возникновении аварийных ситуаций, связанных с межвитковыми, межфазовыми и короткими замыканиями якорной обмотки на корпус.

2. Разработать цифровую модель для исследования коротких замыканий различных видов.

3. Провести исследования всех возможных вариантов коротких замыканий на цифровой модели.

4. Разработать цифровую модель определения фазы с межвитковыми короткими замыканиями по переходному процессу от импульсного воздействия.

5. Разработать цифровую модель анализа теплового состояния генератора при коротких замыканиях с определением локальных перегревов.

6. Провести испытания опытного образца генератора для подтверждения эффективности применения информационной обмотки как индикатора коротких замыканий разных видов.

Объект исследования

Объектом исследования является вентильный генератор с постоянными магнитами, силовой электроникой и автоматизированной системой управления, который предназначен для работы в составе мини-ГЭС.

Предмет исследования

Предметом исследования являются способы и методики анализа аварийных режимов межвитковых замыканий, межфазовых межвитковых замыканий, замыканий фазы на корпус, метод определения фазы с межвитковыми замыканиями.

Методы исследования

Поставленные научные задачи решены с применением теории электротехники, общей теории электрических машин, метода симметричных составляющих несимметричной нагрузки, метода конечных элементов для решения задач электромагнитного и теплового анализа, методов физического моделирования, методов натуральных испытаний.

Научная новизна

В процессе выполнения исследования автором получены следующие научные результаты:

1. Разработана цифровая модель вентильного генератора с постоянными магнитами, имитирующая все электромагнитные процессы и режимы работы, включая аварийные режимы коротких замыканий различных видов.

2. Для диагностики аварийных режимов коротких замыканий предложена дополнительная информационная обмотка, способная фиксировать не симметрию магнитной цепи, возникающую при коротких замыканиях якорной обмотки.

3. Разработана методика диагностики коротких замыканий при соединении фаз информационной обмотки в треугольник на основе метода симметричных составляющих для несимметричной нагрузки, возникающей в аварийных режимах.

4. Разработана методика диагностики коротких замыканий при соединении фаз информационной обмотки в звезду на основе метода симметричных составляющих для несимметричной нагрузки, возникающей в аварийных режимах.

5. Разработана цифровая модель определения фазы с витковыми замыканиями на основе переходного процесса от импульсного воздействия

6. Разработана цифровая модель анализа теплового состояния генератора при коротких замыканиях различных видов на основе МКЭ с определением локальных перегревов.

7. Экспериментально подтверждена эффективность применения информационной обмотки для индикации коротких замыканий якорной обмотки

Автор на защиту выносит следующие основные научные результаты:

1. Цифровую модель вентильного генератора, **отличающуюся от известных моделей тем**, что она способна анализировать все электромагнитные процессы вентильного генератора с постоянными магнитами при различных режимах работы, включая аварийные режимы коротких замыканий различных видов.

2. Информационную обмотку, которая **впервые в практике диагностики** вводится дополнительно в магнитную систему для определения несимметрии магнитного состояния генератора при аварийных режимах различных видов.

3. **Ранее не применяемые** методы определения коротких замыканий с помощью информационной обмотки, как индикатора магнитной несимметрии, возникающей в аварийных ситуациях. Предложен метод при соединении фаз информационной обмотки в треугольник и метод при соединении фаз информационной обмотки в звезду.

4. Цифровую модель определения фазы с витковыми замыканиями, **которая отличается от известных моделей тем**, что определяет поврежденную фазу по переходному процессу от импульсного воздействия.

5. Цифровую модель теплового состояния генератора во всех режимах, включая аварийные режимы коротких замыканий, **которая отличается** возможностью определения локальных перегревов в месте повреждения за счет моделирования каждого витка.

Соответствие паспорту специальности

Проведенные исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы: п. 1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение си-

стемных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.»; п.4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях»; п.5. «Разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса».

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании нового метода диагностики определения коротких замыканий за счет введения дополнительной обмотки, фиксирующей несимметрию фазных ЭДС в аварийных режимах, в разработке цифрового двойника, имитирующего все электромагнитные процессы и режимы работы, включая короткие замыкания различных видов.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в следующем:

1. Обоснована структура автономной автоматизированной необслуживаемой мини-ГЭС.

2. Разработана цифровая модель, способная анализировать электромагнитные процессы всех режимов работы генератора, включая аварийные. Модель параметризована и способна перестраиваться под любые размеры и обмоточные данные.

3. Разработана практическая инженерная методика диагностики витковых замыканий с помощью информационной обмотки, как индикатора магнитной несимметрии, возникающей в аварийных режимах коротких замыканий.

4. Разработана цифровая модель анализа теплового состояния генератора при различных режимах работы, включая аварийные. Модель позволяет проводить виртуальные испытания и сокращает число циклов реального прототипирования изделий.

Внедрение результатов работы

Математические модели для исследования электромагнитных процессов в электрических машинах, методики анализа коротких замыканий используются в учебном процессе при подготовке специалистов электротехнических специальностей ЮУрГУ и ИЭТ.

Апробация работы

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

1. Международная научно-практическая конференция «Достижения науки-агропромышленному производству»;
2. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники Казань, 20-21 марта 2019 г.
3. X научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, «Секция технических наук» г. Челябинск, 06-09 февраля 2018 г;
4. Международная научно-техническая конференция «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), г. Магнитогорск, 4-5 октября 2019 г;

Публикации по теме диссертации

По результатам диссертационной работы опубликовано **8** научных работ, в том числе **6** статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных **Scopus**.

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором, включая физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование при разработке цифровой модели электромагнитного состояния, цифровой модели теплового состояния; структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов для концепции информационной обмотки; разработка безопасной и эффективной эксплуатации на основе диагностики различных видов витковых замыканий; исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях при испытании опытного образца. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из определений, используемых научных терминов, основных обозначений и сокращений, введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 153 наименований, 3 приложений. Работа изложена на 148 страницах, из них 118 страницы основного текста. Работа содержит 35 иллюстраций, 15 аналитических выражений, 7 таблиц, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность выбранной темы. Отмечено, что гидроресурсы малых и средних рек при правильном использовании могут в несколько раз превосходить этот показатель для крупных рек. Показаны 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, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования, личный вклад автора, структура и объем диссертации

Первая глава содержит анализ гидроэнергетических ресурсов Республики Таджикистан. Согласно исследованиям, в настоящее время общий энергетический потенциал водотоков Таджикистана оценивается, в среднем, мощностью в 51,8 млн. кВт. В том числе 511 исследованных рек имеют мощность 32,6 млн. кВт, а реки, длиной менее 10 км имеют мощность 19,5 млн. кВт.

Анализ показывает, что потенциальные гидроэнергетические ресурсы Таджикистана занимают второе место в странах ближнего зарубежья, после России. Гидротехнические ресурсы республики составляют 2100 тыс. кВт·ч/км².

При наличии богатых ресурсов в республике существует дефицит электроэнергии, и он продолжает нарастать (рис.1).

Гидроэнергетика в целом и, особенно, малая гидроэнергетика нуждаются в теоретическом и практическом развитии.

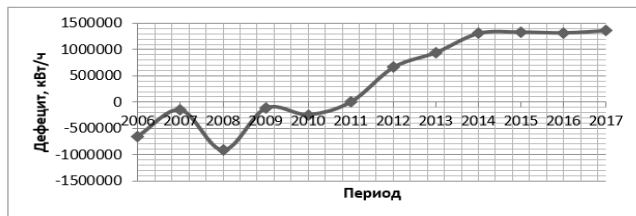


Рис. 1. Дефицит электроэнергии в период с 2006 по 2017 г.

Для того, чтобы создаваемая мини-ГЭС была рентабельной и экономически целесообразной необходимо тщательный предварительный анализ ресурсов реки, места установки мини-ГЭС и экономической эффективности проекта

Для оценки целесообразности внедрения мини-ГЭС в общий энергобаланс системы энергоснабжения необходимо определить ее структуру. В структуру современной автоматизированной мини-ГЭС положен принцип полной автоматизации (рис.2) без обслуживающего персонала.

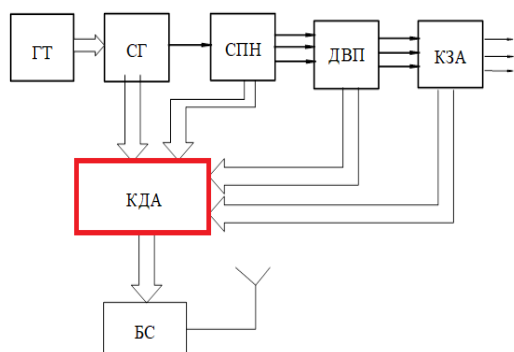


Рис.2. Функциональная схема автоматизированной мини-ГЭС.

Структура автоматизированной мини-ГЭС включает в себя следующие основные блоки: гидротурбину (ГТ), синхронный трёхфазный генератор (СГ), силовой преобразователь напряжения (СПН), блок датчиков выходных параметров ГЭС (ДВП), блок коммутационно-защитной аппаратуры (КЗА), блок контрольно-диагностической аппаратуры (КДА, блок связи (БС).

Как видно из схемы, основным элементом современной мини-ГЭС является вентильный бесконтактный генератор с возбуждением от постоянных магнитов. Для этого класса генераторов **основными аварийными режимами являются различные варианты коротких замыканий якорной обмотки**. Статистика показывает, что правильно выбранные подшипники работают достаточно надежно в течение всего периода эксплуатации. Диагностика и анализ коротких замыканий должны составить основу разрабатываемого электротехнического комплекса по созданию современной автоматизированной, необслуживаемой ГЭС.

Вторая глава посвящена разработке комплекса диагностики коротких замыканий якорной обмотки вентильного генератора с постоянными магнитами.

В качестве генератора для мини-ГЭС возможно применение различных вариантов электрических машин. Вентильные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов лишены ряда недостатков, которые имеют коллекторные машины, асинхронные машины, синхронные машины с электромагнитным возбуждением. Они имеют бесконтактный токоподвод, 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 этот вариант электрической машины в качестве базового для разработки мини-ГЭС.

Короткое замыкание обмотки якоря является одной из важных причин неисправностей синхронного генератора. Наиболее типичные короткие замыкания обмотки статора можно разделить на три типа:

- межвитковое короткое замыкание секции якорной обмотки;
- межфазовое межвитковое короткое замыкание;
- замыкание фазы на корпус.

Анализ всех вариантов неисправностей на реальном образце представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Современное компьютерное моделирование позволяет создать цифровой близнец реального образца и на нем провести все необходимые исследования.

Для построения модели воспользуемся программным комплексом Ansys Electronics Desktop. Выбор данного программного средства обусловлен, прежде всего, наличием в университете официальной лицензии на эту программу, приобретенной для суперкомпьютера. Моделирование проведем для конкретного генератора со следующими основными параметрами и размерами. Высота магнита была принята равной 10 мм. Постоянные магниты выполнены из сплава самарий-кобальт с параметрами: $B_r=1,07$ Тл, $H_{св}=780$ кА/м, максимальная рабочая температура 350°C . Материал сердечника ротора сталь 10. Для сердечника статора выбран материал сталь 2412, толщина листа 0,35 мм. Обмотка якоря двухслойная с диаметральным шагом, число пар полюсов 8.

Решение поставленной задачи проведем в следующей последовательности:

- построение геометрической модели синхронного генератора;
- разделение несколько витков для имитирования межвиткового короткого замыкания;
- разделение области решения на конечные элементы;
- задание параметров материалов и постоянного магнита;
- задание граничных условий;
- решение полевой задачи.

Расчетная модель синхронного генератора, построенная в двухмерной и трехмерной плоскостях, представлена на рис. 3.

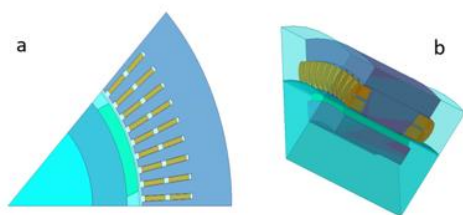


Рис.3. Расчётная модель синхронного генератора

Осевая симметрия электрической машины позволила упростить модель и рассматривать только одну восьмую ее часть, что существенно сократило время расчета. Тип решаемой задачи Transient (нестационарное магнитное поле с учетом движения частей модели).

Для анализа различных вариантов короткого замыкания обмотку разделим на отдельные витки и для каждого сечения проводника зададим терминал. Вся схему обмотки тоже представим в виде отдельных витков в приложении Citrix (см. рис.4).

В качестве аварийной ситуации было выбрано **короткое замыкание 5-ти витков фазы А** (см. рис. б). В цепь замыкания были установлены измерительные приборы амперметры для определения тока межвиткового короткого замыкания.

Кроме этого, для наблюдения изменения тока и напряжения на выходе генератора установлены амперметры и вольтметры, чтобы по их показаниям диагностировать аварийное повреждение.



Рис.4. Электрическая схема якорной обмотки для проведения испытаний.

К генератору была подключена номинальная нагрузка и были рассмотрены параметры безаварийного режима. Картина магнитного поля, кривые потокосцепления с фазами якоря, фазные ЭДС и фазные токи представлены ниже на рис.5. Эти кривые были приняты как эталонные для индикации отклонений при коротких замыканиях.

Сравнение кривых токов для нормального режима и аварийного режима короткого замыкания 5 витков не позволяет выявить различия между ними. Показатель превышения составляет

$$\delta = \frac{|I_{maxkz} - I_{maxn}|}{I_{maxn}} * 100\% = \frac{|75.7 - 74.5|}{74.5} * 100\% = 1.61\%$$

где δ - степень дисбаланса трехфазного тока, I_{maxkz} - амплитуда тока фазы при коротком замыкании, I_{maxn} - амплитуда тока фазы в нормальном режиме.

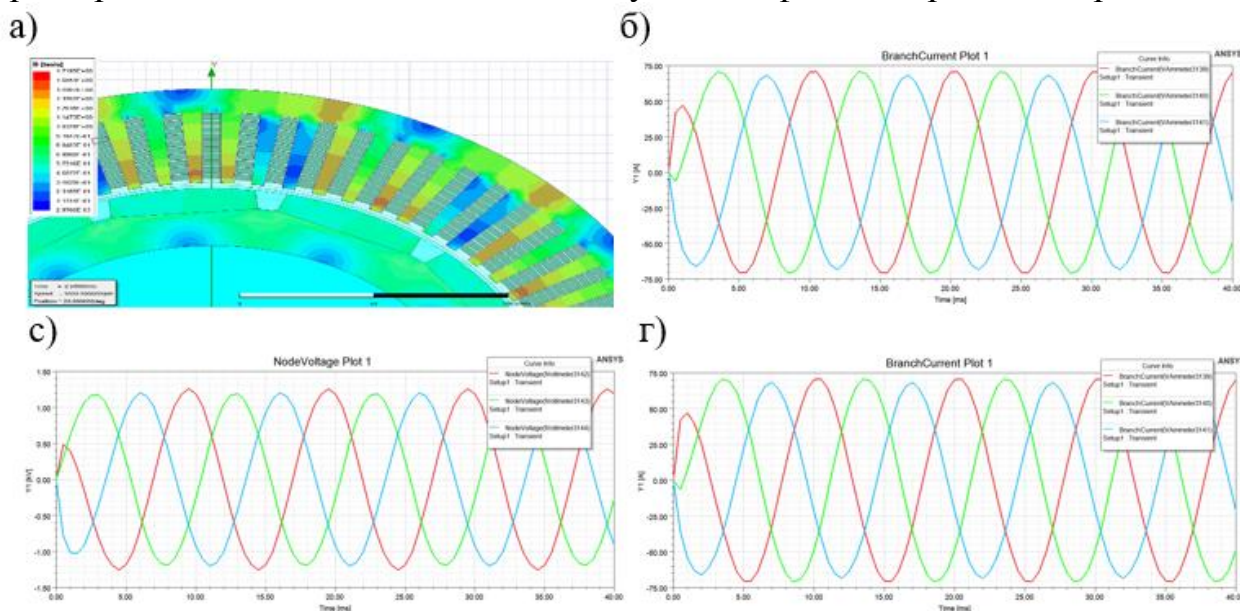


Рис. 5. Картина магнитного поля (а), кривые потокосцепления с фазами якоря (б), фазные ЭДС (в) и фазные токи (г).

Таким образом, численный эксперимент показывает, что по параметрам внешней цепи (току, ЭДС) невозможно определить аварийный режим короткого замыкания. Установить измеритель тока в предполагаемый контур короткого замыкания физически невозможно. Следовательно, необходимо разработать метод диагностики аварийных режимов короткого замыкания на других физических принципах

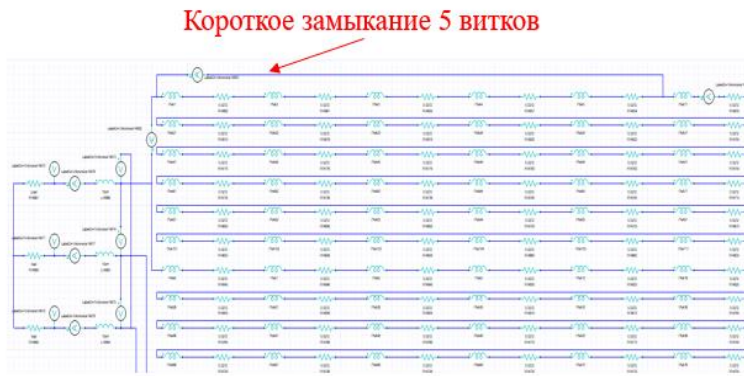


Рис.6. Имитация аварийного режима при замыкании 5 витков накоротко.

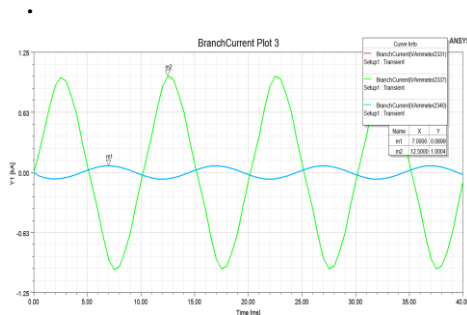


Рис. 7. Ток замыкания в фазе А.

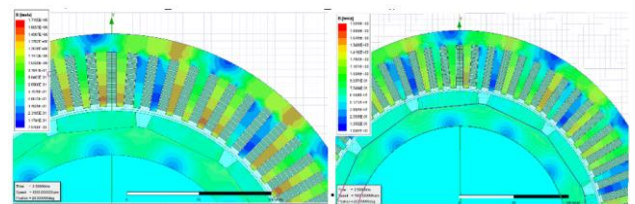


Рис.8. Картины электромагнитного поля для номинального режима и режима виткового короткого замыкания.

Следует отметить, что при витковых замыканиях в короткозамкнутых витках возникают очень большие токи, которые и представляют аварийную опасность. Можно предположить, что эти токи приводят к искажению результирующего вращающегося магнитного поля. Визуальный анализ картины электромагнитного поля для номинального режима и режима виткового короткого замыкания (рис.8) подтверждает этот факт.

Силовая обмотка якоря выполняет свою главную функцию – она участвует в преобразовании механической энергии в электрическую. Через нее проходит вся энергия, определенная номинальным режимом работы. Токи, протекающие через нее и генерируемые в ней ЭДС, в основном определяются нагрузкой потребителя. На фоне этих больших токов и ЭДС уловить незначительные изменения в токовой цепи достаточно сложно, что показал численный эксперимент. Возникает классическое техническое противоречие аварийного режима короткого замыкания: изменения в цепи якоря есть и изменений в цепи якоря нет, поскольку они весьма малы и незначительны. В Теории решения изобретательских задач есть способы разрешения технических противоречий. Воспользуемся одним из них, а именно: **разделим противоречивые свойства системы в пространстве**, то есть, введем в якорь дополнительную информационную обмотку, которая будет фиксировать искажение магнитного поля в режиме витковых коротких замыканий. Эта обмотка будет полностью повторять силовую якорную обмотку. Она будет находится в тех же пазах якоря, будет иметь те же параметры (трехфазную схему, шаг по пазам, укорочение) но будет намотана тонким проводом, чтобы существенно не уменьшать эффективное сечение паза для актив-

При этом на рисунке 7 приведены зависимости токов для фазы А во внешней цепи и в контуре короткого замыкания. Показатель превышения аварийного значения тока над нормальным значением составил $\delta = 14.3$, что является недопустимым режимом работы.

ных проводников, будет иметь гораздо большее число витков, чтобы по наводимой в ней ЭДС определить искажение поля и будет работать на холостом ходу, чтобы не быть привязанной к нагрузке якоря. Фазы информационной обмотки будут иметь полную симметрию и пространственный сдвиг на 120 электрических градусов. В зависимости от методов диагностики, фазы информационной обмотки можно соединить в треугольник или звезду.

Принципиальные схемы предлагаемого технического решения представлены на рис. 9.

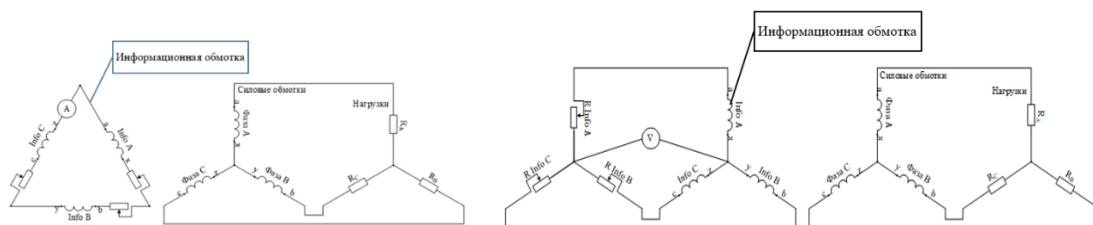


Рис. 9. Схема генератора с информационной обмоткой при соединении ее в треугольник и звезду.

Как было отмечено, витковые замыкания приводят к несимметричному режиму работы генератора, в частности по магнитной цепи. Для анализа этого режима воспользуемся известным и хорошо себя зарекомендовавшим на практике методом симметричных составляющих. Суть его заключается в том, что несимметричный режим работы раскладывают на три симметричных режима для прямой последовательности фаз, обратной последовательности фаз и нулевой последовательности фаз вращающегося поля. Далее применяется принцип суперпозиции: результирующие токи, и напряжения получаются сложением всех симметричных составляющих. Принцип суперпозиции применим только для ненасыщенных магнитных систем, поэтому пренебрежем насыщением магнитной цепи, и в первом приближении будем считать ее несущественной, а параметры магнитной цепи линейными.

Информационная обмотка работает на холостом ходу для соединения ее фаз в треугольник и в режиме, близком к холостому ходу при соединении ее фаз в звезду. При этом ЭДС фаз информационной обмотки будут практически совпадать с напряжениями, которые измеряют приборы.

Разложим ЭДС фаз информационной обмотки для несимметричного режима короткого замыкания на симметричные составляющие (рис.10).

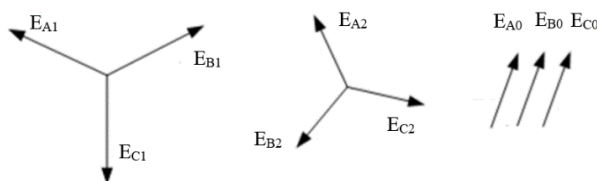


Рис.10. Симметричные системы фазных ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности фаз.

Векторы E_{A1} , E_{B1} , E_{C1} прямой последовательности фаз, имеют прямое чередование фаз, то есть то же, что и заданная система E_A , E_B , E_C .

Векторы E_{A2} , E_{B2} , E_{C2} обратной последовательности фаз, имеют обратное чередование фаз по сравнению с заданной системой E_A , E_B , E_C .

Векторы E_{A0} , E_{B0} , E_{C0} нулевой последовательности фаз, то есть не имеют между собой фазового сдвига. Согласно этому методу действительные фазные ЭДС определяться системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} E_A = E_{A1} + E_{A2} + E_{A0} \\ E_B = E_{B1} + E_{B2} + E_{B0} \\ E_C = E_{C1} + E_{C2} + E_{C0} \end{array} \right. \quad (1)$$

Между векторами прямой, обратной и нулевой последовательности фаз приняты соотношения

$$E_{B1} = a^2 E_{A1}; E_{B2} = a E_{A2}; E_{C1} = a E_{A1}; E_{C2} = a^2 E_{A2}; E_{A0} = E_{B0} = E_{C0}$$

где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$, при этом следует учесть, что $1 + a + a^2 = 0$

Рассмотрим вариант соединения фаз информационной обмотки в треугольник.

В случае нормального режима работы при отсутствии виткового короткого замыкания мы будем иметь симметричные ЭДС только прямой последовательности фаз. ЭДС обратной и нулевой последовательности будут отсутствовать. Тогда второе уравнение Кирхгофа для контура треугольника будет иметь следующий вид:

$$E_A + E_B + E_C = E_{A1} + E_{B1} + E_{C1} = 0$$

Суммарная ЭДС в контуре треугольник будет равна 0, уравнительный ток в фазах информационной обмотки будет равен 0, и это значение покажет вставленный в контур амперметр.

При наличии виткового короткого замыкания симметрия ЭДС фаз нарушится, появятся все составляющие фаз прямой обратной и нулевой последовательности. Второе уравнение Кирхгофа для контура треугольника запишется следующим образом:

$E_A + E_B + E_C = E_{A1} + E_{A2} + E_{A0} + E_{B1} + E_{B2} + E_{B0} + E_{C1} + E_{C2} + E_{C0} = E_{C1} + E_{C2} + E_{C0} = 3 E_{A0}$
То есть в контуре появится отличная от нуля результирующая ЭДС, под ее действие начнет течь уравнительный ток, который покажет амперметр (рис.11).

Этот ток будет индикатором наличия виткового замыкания в одной из фаз.

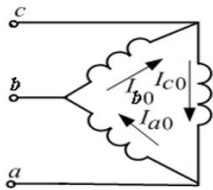


Рис.11. Схема образования уравнительного тока при витковом замыкании

Рассмотрим вариант соединения фаз информационной обмотки в звезду. Подключим к фазам обмотки симметричные активные сопротивления достаточно большой величины, тоже соединенные в звезду. Выведем нулевые точки звезды фаз и звезды сопротивлений и подключим между этими точками вольтметр. Определим потенциал нулевой точки фаз информационной обмотки

Для нормального режима при отсутствии короткого замыкания в ЭДС фаз информационной обмотки будет присутствовать составляющая только прямой последовательности фаз, составляющие обратной последовательности фаз и нулевой последовательности фаз будут равны 0.

Потенциал нулевого провода определится уравнением:

$$E_A + E_B + E_C = E_{A1} + E_{B1} + E_{C1} = 0$$

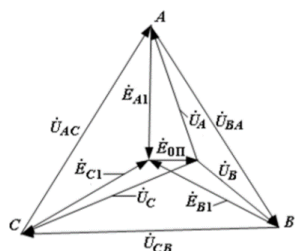
В силу полной симметрии, потенциал нулевого провода сопротивлений тоже будет равен 0, соответственно разность потенциала между нулевыми выводами фаз информационной обмотки и сопротивлений будет равна 0 и вольтметр, включенный между этими точками, не покажет никакого значения.

При наличии виткового короткого замыкания симметрия ЭДС фаз нарушится, появятся все составляющие фаз прямой обратной и нулевой последовательности. Потенциал нулевого провода информационной обмотки определится следующим образом:

$$E_A + E_B + E_C = E_{A1} + E_{A2} + E_{A0} + E_{B1} + E_{B2} + E_{B0} + E_{C1} + E_{C2} + E_{C0} = E_{C1} + E_{C2} + E_{C0} = 3 E_{A0} .$$

То есть он будет отличен от нуля, между нулевыми точками фаз появится разность потенциалов, которую зафиксирует вольтметр (рис.12).

Наличие разности потенциалов между нулевыми точками будет индикатором аварийного режима короткого замыкания.



12. Векторная диаграмма напряжений измерительной обмотки при несимметричном режиме виткового короткого замыкания.

Проверим теоретические выкладки на цифровой модели. Заложим в пазы каждой фаз информационной обмотку и введем ее в расчетную схему. Будем фиксировать показания приборов для нормального и аварийного режимов работы для соединения фаз информационной обмотки в треугольник и звезду. Первоначально проведем цифровые испытания на треугольном соединении фаз информационной обмотки (рис.13).

Определим, что **короткое замыкание 5-ти витков** является ненормальным аварийным режимом работы генератора. Выше было отмечено, что при замыкании небольшого числа витков изменения внешнего тока и напряжения незначительны. На рисунке 14 приводятся электрические потери в фазе и электрические потери в 5-ти короткозамкнутых витках.

Электрические потери в фазе А при номинальной нагрузке составляют 75 Вт, а электрические потери в 5-ти короткозамкнутых витках составляют 1136 Вт, что в более чем в 15 раз превышает потери во всей фазе. Следует понимать, что отвести эти потери из 5-ти витков нереально и замыкание 5-ти витков является аварийным режимом.

На рисунке 19 приводятся электрические потери в фазе и электрические потери в 5-ти короткозамкнутых витках.

Электрические потери в фазе А при номинальной нагрузке составляют 75 Вт, а электрические потери в 5-ти короткозамкнутых витках составляют 1136 Вт, что в более чем в 15 раз превышает потери во всей фазе. Следует понимать, что отвести эти потери из 5-ти витков нереально и замыкание 5-ти витков является аварийным режимом.

При нормальном режиме работы уравнивающие токи в треугольнике информационной обмотки составили значения менее 1 ампера. В режиме короткого замыкания 5-ти витков амперметр тока информационной обмотки показал амплитуду тока 25 А. Кроме этого осциллограмма тока информационной обмотки отличается от синусоиды при симметричном режиме работы (рис.15).

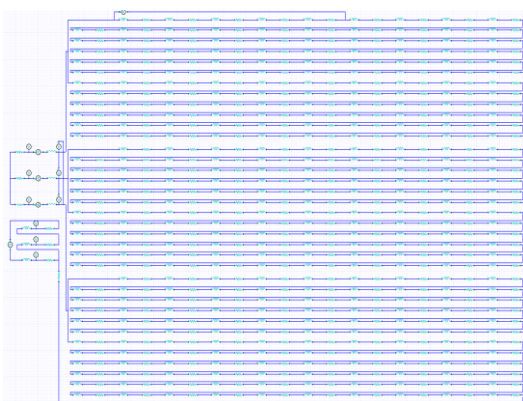


Рис.13. Схема тестирования генератора при к.з. 5 витков для информационной обмотки, соединенной в треугольник.

Испытания показали, что информационная обмотка, соединенная в треугольник, может быть индикатором аварийного режима витковых коротких замыканий по отклонению тока в ней от нуля.

Проведем аналогичные цифровые испытания с информационной обмоткой, соединенной в звезду (рис.16).

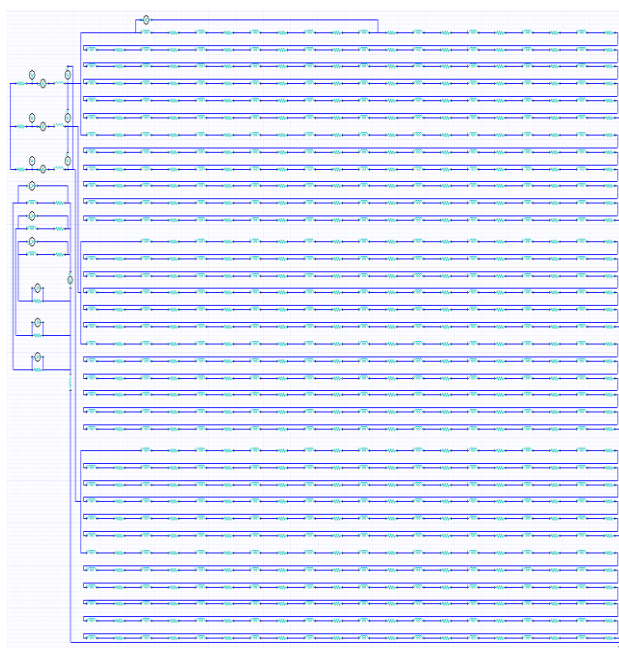


Рис. 16. Схема тестирования режима короткого замыкания 5-ти витков при информационной обмотке, соединенной в звезду.

Токи и напряжения в силовой обмотке аналогичны предыдущему опыту. При настройке нормального безаварийного режима напряжение между нулевыми выводами информационной обмотки и нулевым выводом сопротивлений информационной обмотки не превысило 5 V. Эта величина, вероятно, обусловлена несимметрией магнитной цепи, ее насыщением, наличием высших гармоник. При режиме короткого замыкания 5-ти витков разность потенциалов соста-

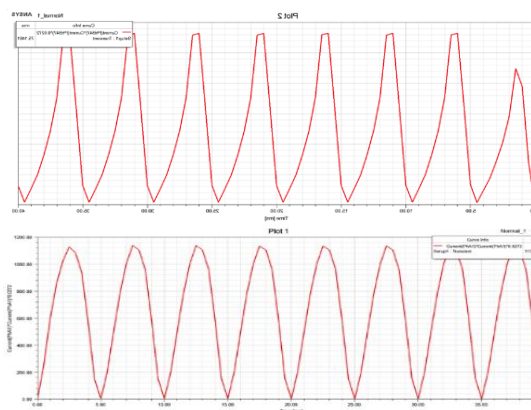


Рис.14. Электрические потери в фазе (а) и 5-ти короткозамкнутых витках (б)

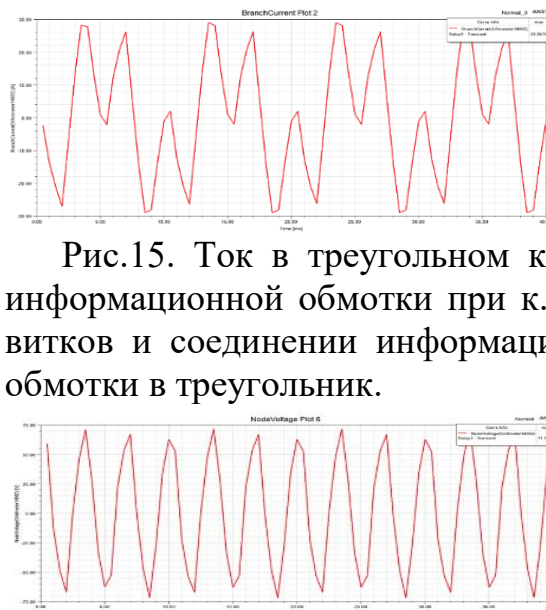


Рис.15. Ток в треугольном контуре информационной обмотки при к.з. 5-ти витков и соединении информационной обмотки в треугольник.

Рис. 17. Напряжение между нулевыми выводами информационной обмотки и нулевым выводом сопротивлений информационной обмотки при соединении

вила 87 В в амплитуде, что вполне достаточно для индикации аварийного режима. Кроме этого, форма этого напряжения отличается от синусоидального при нормальном режиме работы, что является дополнительным доказательством, что произошла авария (рис.17).

Таким образом, введение в систему информационной обмотки является надежным инструментом регистрации аварийных режимов короткого замыкания. Надежно фиксируют аварию обе схемы при соединении фаз измерительной обмотки в треугольник, и фиксация тока и при соединении фаз измерительной обмотки в звезду и фиксацией разности потенциалов между теоретическими нулями. Кроме этого, следует отметить, что данная система с информационной обмоткой является действительно диагностической. Короткие замыкания относятся к внезапным отказам, но на самом деле они возникают постепенно по мере износа и повреждения изоляции. Контактное место повреждения расширяется тоже во времени. Этот процесс можно фиксировать по увеличению тока при соединении фаз измерительной обмотки в треугольники или по нарастанию разности потенциала при соединении их в звезду.

Предложенный метод определяет витковое соединение в фазах, но при этом по этому методу невозможно определить, в какой фазе произошла аварийная ситуация, так как фазы соединены между собой в треугольник или звезду. После остановки генератора и вывода его в ремонт **возникает задача определения конкретной поврежденной фазы**. Надо сказать, что на практике существуют приборы такой диагностики. Это приборы серии ЕЛ, которые стоят достаточно дорого. Поскольку формируется диагностический цифровой комплекс для мини-ГЭС, то имеет прямой смысл создать **цифровую систему диагностики поврежденной фазы**.

При разработке диагностики определения поврежденной фазы воспользуемся принципом прибора ЕЛ. Будем подавать импульсное воздействие на нормальную и поврежденную фазы и будем сравнивать переходные процессы в них. Фазы силовой обмотки при этом находятся без нагрузки (режим холостого хода).

Воздействующий импульс имеет следующие параметры: - форма импульса напряжения – прямоугольник, амплитуда 100 В, скважность импульса 95%, частота импульса -100 Гц.

Осциллограмма импульсного воздействия и осциллограммы переходных процессов в фазах приведена на рис.18.

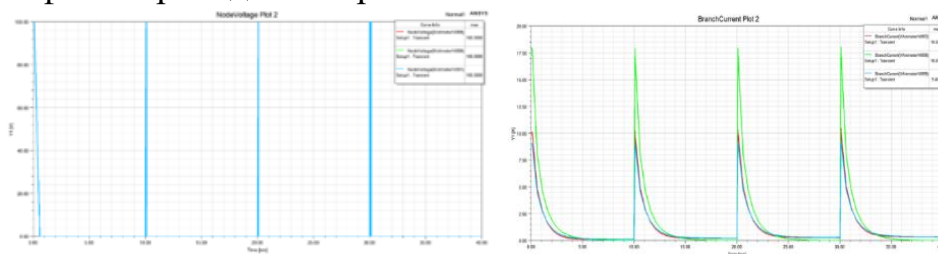


Рис. 18. Осциллограмма импульсного воздействия для определения поврежденной фазы с витковыми короткими замыканиями и осциллограммы тока переходного процесса в фазах после импульсного воздействия.

При эксперименте искусственно повреждена была фаза В, обозначенная зеленым цветом. Для определения чувствительности метода в ней был закорочен 1 виток. Фаза А и фаза С имели номинальные параметры без наличия витковых замыканий.

На осциллограммах видно, что переходные процессы нормальных фаз практически совпадают, а переходный процесс в поврежденной фазе существенно отличается от этого процесса в нормальных фазах (амплитуда импульса больше в 1.8 раз, длительность переходного процесса тоже несколько больше).

Таким образом, цифровая модель импульсного воздействия позволяет определить поврежденную фазу, даже при одном короткозамкнутом витке.

Данную методику следует рекомендовать в едином комплексе вместе с методом информационной обмотки.

Следующим аварийным режимом, который достаточно часто возникает при эксплуатации является короткое замыкание между обмотками двух фаз. Данное повреждение можно определить по параметрам внешней цепи (фазным и линейным токам и напряжениям). В этом отношении задача исследователя упрощается. Поскольку генератор не нагружен, то фазные токи не велики. Тем не менее осциллограммы токов по фазам значительно отличаются друг от друга (рис.19а,19б). Эти кривые тоже показывают несимметрию по фазам, что является индикатором наличия межфазного короткого замыкания.

Следует отметить, что информационная обмотка, соединенная в звезду, тоже отреагировала на эту аварийную ситуацию (рис.19в).

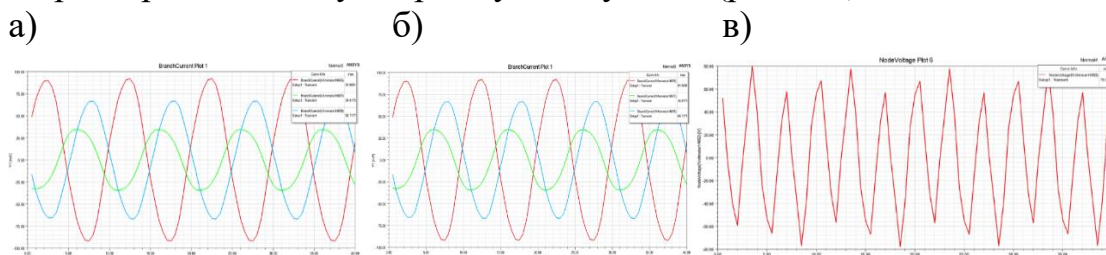


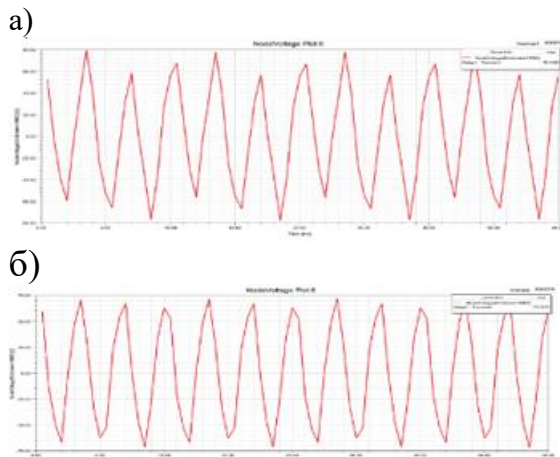
Рис.19. Осциллограммы фазных токов (а), фазных напряжений (б) при межфазном витковом замыкании фазы А и фазы С и осциллограмма напряжения между двумя нейтральными в информационной обмотке при межфазном коротком замыкании (в)

Таким образом, межфазное витковое короткое замыкание можно выявить по следующим характерным признакам: в информационной обмотке появляются показатели наличия повреждения (уравнительный ток в обмотке, соединенной звездой, и напряжение между нейтральными при соединении в треугольник); фазные токи силовой обмотки существенно отличаются друг от друга при симметричной нагрузке. Таким образом, при этом типе повреждения информационная обмотка оказалась полезной, так как позволяет конкретизировать вид повреждения.

Анализ замыкания фазы на землю, двухфазного короткого замыкания и трехфазного короткого замыкания являются классическими видами аварийных повреждений. Они связаны не с диагностикой самого генератора, а с неправильной его эксплуатацией. На эти ситуации настроена защитная аппаратура, которая, как показала практика их многолетней эксплуатации, работает достаточно надежно при возникновении аварии. Было проверено поведение информационной обмотки при этой несимметрии аварийного режима. На рис.20. изображено напряжение между нейтральными информационной обмотки при однофазном коротком замыкании и двухфазном коротком замыкании.

Осциллограммы показывают, что в этих аварийных режимах, не смотря на сильное ослабление поля, информационная обмотка улавливает несимметрию и

показывает наличие аварийного режима. Осциллограммы показывают, что в этих аварийных режимах не смотря на сильное ослабление поля, информационная обмотка улавливает несимметрию и показывает наличие аварийного режима.



ис.20. Напряжение между нейтральными информационная обмотки при однофазном коротком замыкании (а) и двухфазном коротком замыкании (б)

Как было отмечено, введенная в систему информационная обмотка реагирует на несимметрию работы генератора при разных режимах. Среди этих режимов могут быть аварийные режимы короткого замыкания и вполне штатные режимы несимметричной нагрузки. В этой ситуации возникает опасность ложного срабатывания системы диагностики на эту несимметрию.

При введении информационной обмотки делалось предположение, что она должна реагировать только на магнитную несимметрию.

Несимметричная нагрузка представляет собой электрическую несимметрию и на существенное ослабление магнитного поля влияния оказать не должна. Искажение магнитного поля информационная обмотка не улавливает.

Был проведен численный эксперимент со следующей нагрузкой: фаза А работала без нагрузки на холостом ходу, а фаза В и фаза С были подобраны сопротивления таким образом, чтобы по ним протекал номинальный ток. Эксперимент показал, что информационная обмотка практически не отреагировала на эту явную несимметрию ни для схемы треугольника, ни для схемы звезды. Изменения тока и напряжения остались в пределах расчетной погрешности метода конечных элементов.

В третьей главе представлена разработка цифровой модели теплового анализа межвиткового короткого замыкания

На данный момент существует два основных метода теплового анализа электромеханических систем: метод эквивалентных схем замещения и метод конечных элементов.

Метод эквивалентных схем замещения представляет электромеханическое устройство в виде совокупности однородных тел со своими потерями, свойствами материалов и путями распространения тепловых потоков. Он не позволяет рассчитать поле температур в каждой точке, что важно для анализа локальных коротких замыканий. В основу метода конечных элементов заложен принцип деления исследуемой области на конечное число элементов и узлов в этих элементах. Для каждого элемента записывается система тепловых дифференциальных уравнений в конечно-разностной форме. Полученные локальные матрицы, записанные для каждого элемента, объединяются в единую глобальную матрицу для всего устройства, при этом для элементов, находящихся на границе, учитываются граничные условия. Решение глобальной матрицы дает значение температур в узлах элементов. Не смотря на сложность, этот метод был выбран

для теплового анализа режимов короткого замыкания. В качестве программной среды была выбрана программа Ansys Iсерак. При этом решалась связанная магнитодинамическая и термодинамическая задачи. Первоначально выполнялся расчет электромагнитного состояния генератора в программе Ansys Electronics Desktop. По результатам этого расчета определялись потери в стали и в меди обмотки якоря. Далее данные передавались в программную оболочку Workbench. Она была связующим звеном с программой теплового расчета. На заключительном этапе данные передавались непосредственно в программу расчета теплового поля Iсерак (рис.21).



Рисунок 21. Алгоритм создания тепловой модели.

В программе Iсерак производится окончательная настройка тепловой задачи:

- уточняются материалы с учетом их термодинамических свойств;
- задаются размеры области, в которой осуществляется теплообмен;
- задается скорость охлаждающего агента и характер его движения (ламинарное, турбулентное);
- настраивается расчетная сетка.

Тепловой расчет осуществлялся итерационным способом, в процессе которого уточнялась сетка деления на конечные элементы и определялась сходимость вычислительного процесса (рис.22).

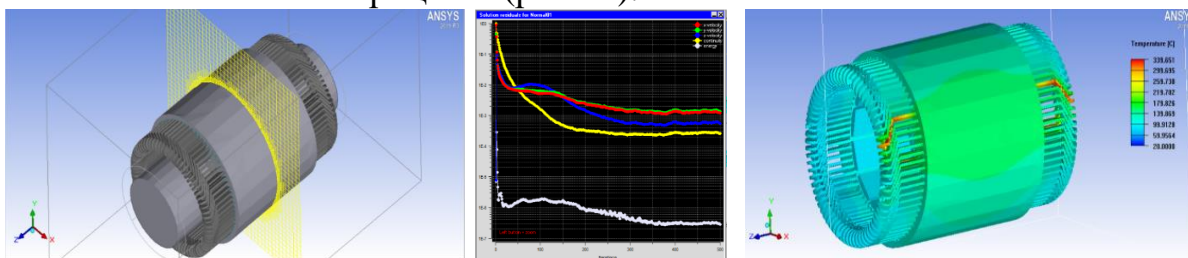


Рис. 22. Деление расчетной модели на сетку конечных элементов и кривые сходимости итерационного процесса.

В результате решения поставленной задачи определялись значения температур в узлах расчетной сетки и поле температур в объеме генератора.

По данной технологии строились цифровые модели короткого замыкания аварийных режимов всех типов.

Созданная тепловая модель является термодинамической, и она может показать динамику нагрева от холодного состояния до установившейся температуры за выбранный интервал времени.

На рис. 23 показана динамика нагрева различных мест генератора в режиме короткого замыкания 5-ти витков в фазе.

Анализ кривой показывает, что для корпуса и неповрежденной обмотки якоря в пазу нарастание и установившаяся температура не критичны.

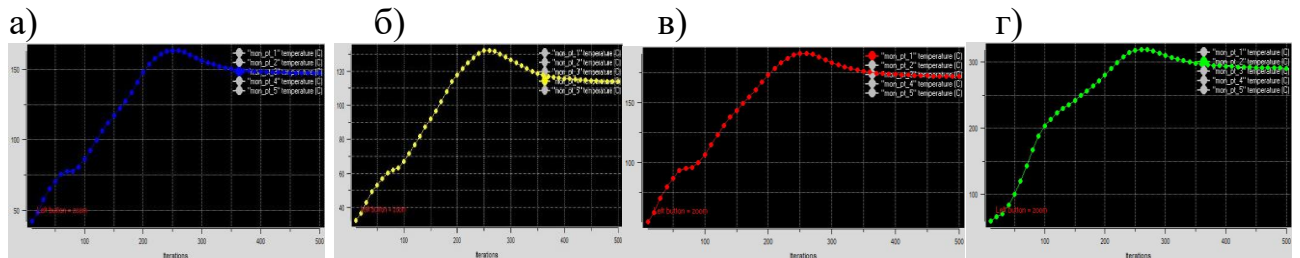


Рис. 23. Динамика нагрева корпуса статора в месте межвиткового замыкания (а) обмотки в неповрежденном пазу(б), обмотки в поврежденном пазу(в) обмотки в поврежденном месте лобовой части (г).

Для поврежденной части обмотки якоря в пазу и лобовой части поврежденной обмотки через 250 сек температура достигнет разрушительной для изоляции величины до 320 С°.

Четвертая глава посвящена проведению исследований на опытном образце генератора с целью проверки концепции применения информационной обмотки.

На первом этапе исследования была разработана и изготовлена автоматизированная компьютерная измерительная система, позволяющая в автоматическом режиме контролировать параметры несимметрии генератора при межвитковых замыканиях в якорной обмотке с регистрацией измеренных данных в виде файла базы данных для последующего анализа полученных зависимостей (рис.24).

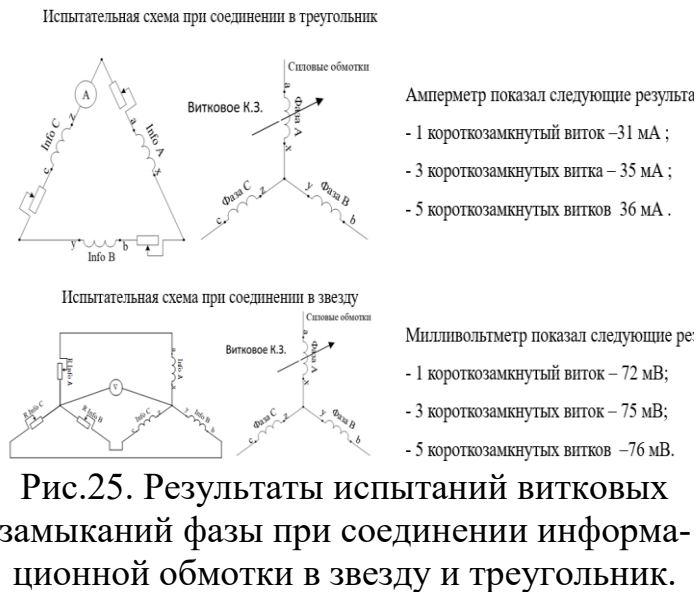


Рис.24. Структурная схема и компьютерная модель измерительной системы и испытательный стенд

Для исследований был выбран генератор для бортовой сети автотракторных транспортных систем (рис.24). Магнитная система генератора имеет когтеобразную конструкцию и электромагнитное возбуждение. Статорная обмотка представляет собой трехфазную якорную обмотку, соединенную в треугольник. В генератор была заложена информационная обмотка тонким проводом по 100 витков в фазе. Для имитации короткого замыкания были использованы отдельные витки из толстого провода. Испытания проводились для 1-го короткозамкнутого витка, 3-х короткозамкнутых витков и 5-ти короткозамкнутых витков. Информационная обмотка соединялась в треугольник и звезду. Обе схемы показали индикацию наличия короткозамкнутых витков, представленную на рис.25.

Для исследований витковых замыканий при соединении фаз информационной обмотки в треугольник была использована автоматизированная информационная система. На рис. 26 показаны осциллограммы тока и расчетные значения тока информационной обмотки, соединенной в треугольник. Как видно из ри-

сунка, формы токов эксперимента и расчета достаточно близки, что подтверждает работоспособность измерительной системы и достоверность цифровой модели.



Таким образом, теоретические выводы и результаты цифрового моделирования были подтверждены натурными испытаниями.

Заключение

В диссертационной работе содержатся научно доказанные теоретические положения по созданию электротехнического комплекса по диагностике аварийных режимов гидрогенератора мини-ГЭС малой и средней мощности. В результате расширена существующая теоретическая база по анализу и диагностике гидрогенераторов, как альтернативных источников энергии.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований автором получены следующие основные выводы и результаты:

1. Источники водной генерации электроэнергии Республики Таджикистан обладают большой мощностью. Освоение малой и средней гидроэнергетики будет сопровождаться созданием большого количества полностью автоматических мини-ГЭС. Такие мини-ГЭС должны иметь электротехнический комплекс по диагностике аварийных состояний энергоагрегата.

2. Самой ответственной структурной единицей мини-ГЭС является генератор. Основные неисправности генератора – это различные варианты коротких замыканий якорной обмотки. Для их определения необходимо в систему ввести дополнительную диагностическую обмотку, которая способна фиксировать магнитную несимметрию, возникающую при авариях.

3. Теоретической основой применения данного способа является метод симметричных составляющих, который применяется для анализа несимметричных нагрузок. Уравнительный ток и разность потенциалов при соединении фаз информационной обмотки в треугольник и звезду являются индикаторами наличия аварии. Применение информационной обмотки является реальной диагностикой, так как она способна выявить возникновение коротких замыканий на ранних стадиях.

4. При определении поврежденной фазы использован метод анализа переходных процессов при импульсном воздействии на якорную обмотку. Метод позволяет достаточно точно определить наличие виткового замыкания в фазе.

5. Для анализа теплового состояния нормальных режимов работы генератора и аварийных режимов создана цифровая модель, особенность которой заключается в том, что обмотка представлена отдельными витками, которые позволяют моделировать локальные короткие замыкания и локальные перегревы.

6. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность концепции применения информационной обмотки для диагностики коротких замыканий. И метод соединения фаз в треугольник и метод соединения фаз в звезду показали наличие виткового короткого замыкания по уравнительному току разности потенциалов между нейтралями.

Дальнейшее развитие данного научного исследования возможно в следующих основных направлениях: оптимизация параметров информационной обмотки по сечению и количеству витков; оцифровка предложенного электротехнического комплекса диагностики, написание алгоритмов диагностики, определение порога нормального и аварийного состояний, включение данного комплекса в общую систему диагностики; построение подобных электромагнитных и тепловых моделей для генераторов других типов; разработка инженерной методики определения коротких замыканий для генераторов других типов.

В перспективе в данный комплекс необходимо ввести диагностику неисправностей не только генератора, но и электронных компонентов электронной системы управления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и аттестационным советом УрФУ:

1. Воронин С.Г., Давлатов А.М., Султонов О.О., Косимов Б.И., **Гулов Д.Ю.** Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика» - 2019. Т. 19. № 3. С. 100-107 (0.5 п.л./0.15 п.л.).

2. Voronin S., Sulstonov O., **Gulov D.** Voltage Balancing at the Output of Three-Phase Semiconductor Converter. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) Magnitogorsk, Russia, 4–5 October 2019, pp. 94–98, 8915374 (0.312 п.л./0.15 п.л.) (Scopus).

3. **Гулов Д.Ю.** Исследования межвиткового замыкания синхронного генератора с постоянными магнитами. - Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 12. С. 391-399 (0.562 п.л.).

4. Kosimov B., Gandzha S., Aminov D., Davlatov A., **Gulov D.**, Abdulloev I. 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. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 950, Advanced Problems of Electrotechnology. October 1-2, 2020, Yekaterinburg, Russia, 012004 (0.6 п.л. /0.15 п.л.) (Scopus).

5. **Gulov D.**, Gandzha S. Research of Inter-turn Short-circuit of a Synchronous Generator with Permanent Magnet. 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2020, pp. 128-132, 9234366 (0.6 п.л. /0.26 п.л.) (Scopus).

6. **Гулов Д.Ю.**, Давлатов А.М., Горт М.В. Эффективность электроснабжения горных районов Таджикистана. - Международный научно-исследовательский журнал. - 2021.- № 1 (103), ч. 1. С. 61-66 (0.375 п.л./0/15 п.л.)

Другие публикации:

7. Смолин В.И., **Гулов Д.Ю.**, Косимов Б.И., Султонов О.О. Асинхронизированные синхронные генераторы для ветроэлектроэлектростанций и малых ГЭС Таджикистана. - Приоритетные направления развития энергетики в АПК. Материалы I Всероссийской научно-практической конференции. -2017. Издательство: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева (Лесниково). - С. 100-105, 30534737 (0.7/0.18).

8. Давлатов А.М., Косимов Б.И., **Гулов Д.Ю.**, Султонов О.О. Повышение экономической эффективности малых гидроэлектростанций республики Таджикистан. - Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. Издательство: Казанский государственный энергетический университет (Казань). - С. 456-461, 41492665 (0.696/0.2).

ГУЛОВ Диловар Юсуфович
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО
ЗАМЫКАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

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.