

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель,
доктор технических наук,
доцент
Ганджа Сергей Анатольевич

Челябинск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИЗ ГИДРОРЕСУРСОВ ТАДЖИКИСТАНА И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.....	18
Вводные замечания.....	18
1.1 Гидроэнергетические ресурсы республики Таджикистан.....	19
1.2. Алгоритм формирования и реализации проектов по разработке мини-ГЭС.....	27
1.3. Анализ традиционных структур мини-ГЭС.....	29
1.4. Принцип построения необслуживаемой ГЭС.....	32
Выводы по главе 1.....	39
2. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	40
Вводные замечания.....	40
2.1. Построение цифровой модели вентильного генератора для диагностики и анализа коротких замыканий.....	42
2.2. Построение цифровой модели вентильного генератора для диагностики и анализа витковых коротких замыканий.....	51
2.3. Применение метода симметричных составляющих для диагностики витковых коротких замыканий.....	53
2.4. Моделирование аварийного режима витковых коротких замыканий на цифровой модели.....	60
2.5. Определение поврежденной витковыми замыканиями фазы по импульсному воздействию прямоугольным напряжением.....	65
2.6. Определение межфазного короткого замыкания.....	72
2.7. Анализ замыкания фазы на землю, двухфазного короткого замыкания и трехфазного короткого замыкания.....	76
2.8. Анализ безаварийных режимов работы генератора при несимметричной нагрузке.....	78

Выводы по главе 2.....	79
3. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО АНАЛИЗА МЕЖВИТКОВОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	81
Вводные замечания.....	81
3.1. Алгоритм построения тепловой модели генератора для аварийного режима межвиткового короткого замыкания.....	81
3.2. Результаты моделирования генератора для режима межвиткового замыкания.....	84
3.3. Анализ результатов моделирования аварийного режима межвиткового короткого замыкания на цифровой модели.....	88
Выводы по главе 3.....	93
4. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОПЫТНОМ ОБРАЗЦЕ ГЕНЕРАТОРА С ЦЕЛЮ ПРОВЕРКИ КОНЦЕПЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОБМОТКИ.....	95
Вводные замечания.....	95
4.1. Разработка и изготовление измерительной системы для автоматизации испытаний.....	95
4.2. Проведение испытаний опытного образца.....	107
4.3. Результаты испытаний витковых замыканий генератора при соединении фаз информационной обмотки в треугольник.....	110
4.4. Результаты испытаний витковых замыканий генератора при соединении информационной обмотки в звезду.....	114
Выводы по главе 4.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	119
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
Приложение П1. Виды коротких замыканий, регламентированных ГОСТ 26522.....	141

Приложение П2. Основные виды коротких замыканий в электроустановках, регламентированных ГОСТ Р 52735	144
Приложение П3. Информация о приборе для проверки обмоток электрических машин ЕЛ-15.....	145
Приложение П4. Акт внедрения результатов научно-исследовательских работ	146
Приложение П5. Акт использования результатов диссертационной Работы	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Мировое потребление энергии по прогнозам на 2030 год возрастёт на 55% по сравнению с сегодняшним днём из-за экономического роста, урбанизации и роста населения. В настоящее время наибольшая часть требуемой энергии вырабатывается за счёт ископаемого топлива, но эта 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. Так, например, Рогунский гидроэнергетический комплекс, построенный на реке Вахш в Таджикистане, является седьмым и последним, который можно внедрить в этом регионе. 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 республики, 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 разработанности исследуемой темы

Актуальность и востребованность тематики привлекает к ней большое количество научно исследовательских сил. Активно работы в этом направлении велись с середины шестидесятых годов прошлого столетия.

Большая статистическая информация по возможностям и перспективам развития мини-ГЭС накоплена Энергетическим институтом имени Г.М. Кржижановского. Следует отметить аналитические работы Безруких П.П.

Научные исследования ученых Московского энергетического института внесли существенный вклад в проектирование асинхронных и синхронных генераторов для мини-ГЭС, в частности, электрических машин с мощными высококоэрцитивными постоянными магнитами. Следует отметить исследования по применению генераторов двойного питания в качестве альтернативного источника электроэнергии и систем управления к нему. Научные заделы в этом направлении сделали ученые 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 длительное время вел исследования по разработке мини-ГЭС для энергоснабжения отдаленных потребителей. Заслуживают внимания работы Вольдека А.И., Костенко М.П., Пиотровского Л.М., Баркова К.В., Елистратова В.В., которые посвящены анализу и методам оценки параметров мини-ГЭС.

Ивановский государственный энергетический университет специализируется на методах анализа работы вентильных электроприводов. Ученые Ю.Б.Казаков, Е. Б. Герасимов, А. И. Тихонов, Н. Н. Новиков внесли существенный вклад в расчеты магнитных и тепловых полей, разработки САПР электрических машин, методы оптимального проектирования.

Следует отметить вклад ученых Новосибирского государственного университета Ю. В. Петренко, А. Г. Приступа, М.В. Глазырина, Р.Х. Диёрова в область малой гидроэнергетики, в частности, генераторных комплексов на основе машины двойного питания для малых ГЭС

Ученые Омского института путей сообщения Авилов В.Д., Иванилов Ю.Л., Сергеев Р.В., Серкова Л.Е., Третьяков Е.А., Харламов В.В., Шкодун П.К. внесли вклад в исследование малой гидроэнергетики для энергетической стратегии развития сибирского региона. Они специализировались на применении асинхронных машин в качестве альтернативных источников.

Самарский государственный технический университет внес существенный вклад в развитие альтернативной энергетики, в частности,

разработки генераторов и систем управления для ветроэнергетических установок. Ученые Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Зубков Ю.В., Чеботков Э.Г. Ануфриев А.С. внесли вклад в разработку методики анализа и синтеза вентильных электрических машин для этого применения.

Заслуживают внимание научные исследования Уральского федерального университета по разработке специальных электрических машин, в частности, машин, работающих в агрессивных средах и сложных климатических условиях. Ученые А.Т. Пластун, Ф. Н. Сарапулов, С. Е. Миронов, Е. Н. Андреев разрабатывают конструкции многодисковых торцевых машин, занимаются развитием теории и методов расчета синхронных двигателей с кольцевыми обмотками.

Ученые Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова Местников Н.П. Константинов, А.Ф. Бурянина Н.С. вели научные исследования в области эксплуатации мини-ГЭС в условиях крайнего севера.

Южно-Уральский государственный университет в течение ряда лет занимается вопросами освоения альтернативной энергии и имеет научные заделы в этой области. Ученые Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Ганджа С.А. внесли вклад в развитие вентильных электроприводов специального назначения, в том числе и для альтернативных источников питания.

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 редукцией, 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 и типа электрической машины для гидрогенератора 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 предупреждение. 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.

Методология и 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 несимметрию 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. Разработана измерительная система, экспериментально подтвердившая эффективность применения информационной обмотки для индикации коротких замыканий якорной цепи.

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

5. Цифровая 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

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы: п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных 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 проведенного исследования 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.

Степень достоверности и апробация результатов 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 **6** работ, из них: 3 работы индексированы в базе данных **Scopus**, **1** статья в журнале, входящем в перечень ведущих рецензируемых изданий, **рекомендованных ВАК** Минобрнауки РФ, **2** статьи в журналах **РИНЦ**.

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором, включая разработку цифровой модели электромагнитного состояния, цифровой модели магнитного состояния, концепции информационной обмотки, методик определения коротких замыканий, проведенных исследований 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, 5 приложений. Работа изложена на 145 страницах, из них 118 страниц основного текста. Работа содержит 37 иллюстраций, 15 аналитических выражений, 7 таблиц, 5 приложений.

Диссертация имеет следующую структуру и логику построения.

Во введении показана актуальность освоения гидроэнергопотенциала малых и средних рек, который в несколько раз превосходит этот показатель для больших рек, показана 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.

Первая глава содержит анализ энергетических возможностей малых и средних рек Таджикистана. Показано, что ресурс больших рек исчерпан, а гидропотенциал малых рек практически не используется. Освоение его потребует организации большой сети мини-ГЭС, но эксплуатация большого количества этих мини-ГЭС с использованием персонала будет нерентабельным. Единственный путь решения проблемы – это создание полностью автономных мини-ГЭС без постоянного обслуживания. Такие мини-ГЭС в системе мероприятий требуют разработки электротехнических комплексов по диагностики аварийных состояний. В главе определена структура современной мини-ГЭС, выбран базовый вариант генератора, дана классификация аварийных режимов возможных коротких замыканий якорной обмотки.

Во второй главе делается анализ различных методик, пригодных для диагностики. В качестве основной методики выбрано цифровое моделирование электромагнитных процессов на основе МКЭ. В качестве программной среды выбран CAE комплекс Ansys Electronics Desktop. Для подробного анализа обмотка была представлена в виде отдельных витков, для каждого витка был создан свой терминал, и каждый виток был включен в общую схему. Тестирование модели показало, что диагностировать витковые замыкания по внешним токам и напряжениям практически невозможно. Был предложен метод использования отдельной информационной обмотки для определения несимметрии магнитной цепи, возникающей от аварийных режимов. Исследовались два варианта диагностики: присоединении фаз информационной обмотки в треугольник и в звезду. Приведена цифровая модель определения поврежденной фазы по переходному процессу импульсного воздействия на якорную обмотку.

В третьей главе представлена цифровая модель теплового состояния генератора, которая анализирует все состояния, включая аварийные состояния короткого замыкания. Особенность построения модели заключается в том, что решается связанная задача электродинамики и термодинамики. Результаты анализа в среде Ansys Electronics Desktop через оболочку передаются в среду Ansys Icerak, где происходит окончательный тепловой анализ. Поскольку обмотка в модели разложена на отдельные витки, появляется возможность определения локальных перегревов в месте повреждения.

В четвертой главе разрабатывается измерительная система, с помощью которой проводится экспериментальная проверка концепции применения информационной обмотки, как индикатора несимметрии магнитной цепи, возникающей в результате аварийных режимов коротких замыканий. Исследуется вариант соединения фаз информационной обмотки в треугольник и вариант соединения этих фаз в звезду.

Заключение содержит выводы, сделанные по результатам всей работы. Определены направления дальнейших исследований в области диагностики аварийных режимов коротких замыканий якорной обмотки.

В диссертации приведен список использованных источников из 153 наименований отечественных и зарубежных авторов.

1. АНАЛИЗ ГИДРОРЕСУРСОВ ТАДЖИКИСТАНА И ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Вводные замечания

Постиндустриальное общество требует неуклонного увеличения производства электроэнергии даже при расширении программ по энергосбережению и энергоэффективности. Особенно это касается стран, в которых после затяжного кризиса наметилась тенденция к устойчивому развитию. Существующие в настоящее время технологии использования возобновляемых источников энергии позволяют в значительной мере удовлетворить этот спрос. Особенно это касается стран с труднодоступными и горными районами.

В настоящее время возобновляемые источники в мире пока могут обеспечить малую долю производства электроэнергии. Однако необходимость перехода от ядерной энергетики и ископаемого топлива к использованию возобновляемых источников энергии с каждым годом нарастает.

Успешное функционирование экономики будущего невозможно без развития всех технологий, связанных с альтернативной энергетикой вообще и с гидроэнергетикой в частности. По общим оценкам около 1,6 миллиарда человек, живущих в развивающихся странах, не имеют доступа к электроэнергии. Развитие этой отрасли приведет к существенному увеличению выработки электроэнергии и, одновременно, росту количества рабочих мест и привлечённых инвестиций.

Строительство длинных линий электропередач от крупного производителя электроэнергии к малому и среднему потребителю связано с большими капитальными затратами и, довольно часто, экономически не оправдано. Малые и средние гидроэлектростанции могут стать наиболее приемлемыми источниками энергии для населения и экономического развития удалённых районов.

Особое значение имеет развитие гидроэнергетики для Республики Таджикистан. В горной зоне территории страны находится ледник площадью 70 тысяч квадратных километров. Таяние ледника покрыло территорию страны сетью малых и средних рек, ресурс которых к настоящему времени практически не использован.

1.1 Гидроэнергетические ресурсы Республики Таджикистан

Энергетика Таджикистана в настоящее время и её развитие в будущем тесно связано со значительными запасами гидроресурсов и ростом их использования для производства электроэнергии. В стране были проведены исследования водных ресурсов, которые отражены в кадастре водной энергетики страны.

В долине реки Вахш было организовано несколько экспедиций Водно-энергетического объединения, которые определили план использования самой реки и её притоков. В приведенном анализе исследуется возможность строительства гидроэлектростанций малой и большой мощности для использования водных энергетических ресурсов.

Детальное исследование энергетического потенциала водотоков республики было также проведено Академией наук Республики Таджикистан. Результаты исследования нашли отражение в фундаментальной коллективной работе «Гидроэнергетические ресурсы» по руководством А.Н. Вознесенского [2]. В этом труде собраны и проанализированы все материалы по исследованию энергетического потенциала водотоков республики.

По статистическим данным за последнее время производство и потребление электроэнергии страны увеличилось в 11 раз и в 2011 г и достигло 17 млрд. кВт·ч [13]. На долю гидроэлектростанций приходится 99% вырабатываемой электроэнергии.

Согласно исследованиям [29] 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.

В таблице 1.1. приведено распределение по бассейнам рек энергетического потенциала водотоков республики общей мощностью 32,6 млн. кВт или 285,6 млрд. кВт·ч выработки [29].

Таблица 1.1 – Энергетический потенциал основных рек Таджикистана

Название реки	Площадь бассейна		Потенциальные гидроэнергетические ресурсы		Удельная насыщенность кВт/км ²
	км ²	%	кВт	%	
Сыр-Дарьинский	13182	9,3	250	0,8	18,9
Зарафшанский	12381	8,7	2622	8,2	211,7
Сурхан-Кафирниганский	14519	10,1	3662	10,5	231,5
Вахшский	30873	21,6	14067	43,5	455,7
Пянджский	71907	50,6	12027	37,0	167,2
Всего	142862	100	32628	100	236,3

Как следует из таблицы 1.1, особо выделяются Пянджский и Вахшский бассейны, на долю которых приходится основная часть гидроресурсов- 80,5%.

Распределение потенциальных гидроресурсов республики по мощности водотоков [32] показано в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Распределение потенциальных гидроэнергетических ресурсов Республики Таджикистан по мощности водотоков

Мощность рек, тыс. кВт	Количество рек	Суммарная кВт мощность	
		Тыс. кВт	%
Более 500	7	20087	62,13
100-500	28	6045	18,7
50-100	44	3002	9,26
25-50	135	2139	6,62
5-10	137	626	1,97
Менее 5	190	439	1,94
Всего	512	32638	100,0

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.

Удельная мощность крупных и средних рек Таджикистана представлена в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Удельная мощность крупных и средних рек Таджикистана

Наименование реки	Мощность, приходящаяся на 1 км длины водотока, тыс. кВт/км
Пяндж	11,40
Вахш	11,30
Оби – Хингоу	10,12
Искандердарья	5,19
Варзоб	4,62
Зарафшан	4,48
Оби –Хумоу	4,15
Бартанг	3,14
Ванч	3,72
Язгулом	3,66
Обихумбоу	3,40
Гунт	3,61
Шохдара	2,33
Ак – Су	1,29

По мощности, приходящейся на 1 км длины реки, наиболее существенны реки Оби - Хингоу, Вахш и Пяндж.

В таблице 1.4 приведена информация о распределении потенциальных энергетических и технических ресурсов основных рек республики и их притоков. Там же представлены данные о возможных и фактически используемых ресурсах.

Как показал анализ изыскательских и научно-исследовательских работ в различные временные периоды развития Таджикистана гидроэнергетические ресурсы республики, 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 Республики Таджикистан.

Однако, кроме водотоков крупной и средней мощности, Республика Таджикистан обладает большим количеством рек малой мощности [43-45]. В основном к ним относят реки не более 2 тыс. кВт. Это гидроэнергетические ресурсы малых водотоков. В этом случае производство электроэнергии обеспечивается за счёт малых ГЭС. К этой группе относят гидроэлектростанции со следующими техническими характеристиками: общая мощность до 30МВт, мощность единичного агрегата до 10 МВт, диаметр рабочего колеса турбины до 3 м.

Гидроэнергетические ресурсы, оцененные в результате исследовательских работ [43-45] показали, что гидроэлектростанции, относимые к категории малых, имеют параметры: на равнинных реках-до 2.0 МВт; на горных реках - до 1.7 МВт. Данные классификационные признаки оптимальны для условий республики.

Горные реки Таджикистана, к которым относятся практически все реки республики, имеют высокую скорость течения и длительный период незамерзания.

Это обстоятельство указывает на возможность построения микро ГЭС бесплотинной конструкции в труднодоступных и удалённых местах.

На освоение гидроэнергетических ресурсов направлены значительные усилия правительства Республики Таджикистан. Это направление рассматривается как основное в развитии экономики республики не только для удовлетворении внутренних потребностей, но и увеличения экспорта электроэнергии.

Мини-ГЭС, как правило, предполагается устанавливать на водотоках малых рек [54,55]

Таблица 1.4 –Потенциальные гидроэнергетические ресурсы рек Таджикистана и их притоков, тыс. кВт

Наименование рек	Мощность основного створа	Мощность притоков	Мощность рек длиной 10км и склонового стока	Суммарная потенциальная мощность	Мощность основной реки и ее притоков	Потенциальное отношение мощности	Технически возможные (промышленные)	Фактически используемые гидроэнергоресурсы	Доля использования технически возможных гидроэнергоресурсов, %
Вахш	779 7	343 0	9967	2119 4	1122 7	34,73	660 0	3558	53,9
Пяндж	571 5	108 6	1372	8173	6801	21,04	523 8	-	-
Кафирниган	131 0	157 3	1264	4147	2883	8,92	146 8	25,5	1,74
Оби-Хингоу	192 0	920	2129	4969	2840	878	162 0	-	-
Зарафшон	135 3	126 9	1278	3900	2622	8,11	139 1	3,29	0,2
Бартанг	996	876	1209	3081	1872	5,79	872	0,8	0
Гунт	940	752	569	2261	1692	5,23	808	9	1,11
Кызил	244	550	365	1159	794	2,46	364	-	-

По официальным данным [54,55], использование гидроэнергетических ресурсов малых рек Средней Азии возможно в объёмах 3,1 млн. кВт или 27,2 млрд. кВт·ч. Распределение указанной мощности по государствам Средней Азии:

- Таджикистан 1,6 млн. кВт и 14 млрд. кВт·ч;
- Узбекистан 0,5 млн. кВт и 4,4 млрд. кВт·ч;
- Киргизстан-0,8 млн.кВт и 7,0 млрд. кВт·ч;
- Туркменистан 0,2 млн. кВт и 1,8 млрд. кВт·ч.

В табл. 1.5 представлены показатели потребности в электроэнергии страны и общие показатели малых гидроэлектростанций

Таблица 1.5- Малые ГЭС (МГЭС) Республики Таджикистан

Название	ВСЕГО Количество / (мощность [кВт])	Средняя мощность агрегата [кВт]	Действующие МГЭС		НЕ действующие МГЭС Количество /(мощность [кВт])
			Кол-во / мощность [кВт]	Производство эл/энергии [кВт*ч]	
ВСЕГО по республике Таджикистан	155 / (12 184)		105 / (4 686)	2 328 340	50 / (7 486)
ГБАО	35 / (3432)		15 / (725)	497 785	20 / (2 707)
Хатлонская область	8 / (2185)		-	-	8/(2 185)
Согдийская область	38 / (1882)		37 / (1 002)	460 336	1/(880)
РРП	74 / (4 685)		53 / (2 959)	1 370 219	21/(726)
В том числе	X		X	X	X
Нуробад	9 / (239)		7 / (179)	23 269	2/(60)
Вахтад	24 / (1 650)		17 / (1080)	468 720	7/(570)
Тавилдара	4 / (136)		4 / (136)	59 024	-
Варзоб	8 / (1 061)		8 / (1 061)	599 924	-
Джиргиталь	7 / (285)		1 / (230)	99 820	6/(55)
Гиссар	3 / (189)		3 / (189)	82 026	-
Шахринав	1 / (500)		-	-	1/(500)
Турсунзода	1 / (500)		-	-	1/(500)
Таджикобад	6 / (80)		5 / (50)	21 700	1/(30)
Рашт	11 / (45)		8 / (34)	15 86	3/(11)

Таким образом, в Таджикистане сосредоточены 51,4% гидроэнергетических ресурсов малых рек Средней Азии.

График дефицита электроэнергии в республике показан на рис.1.1.1.

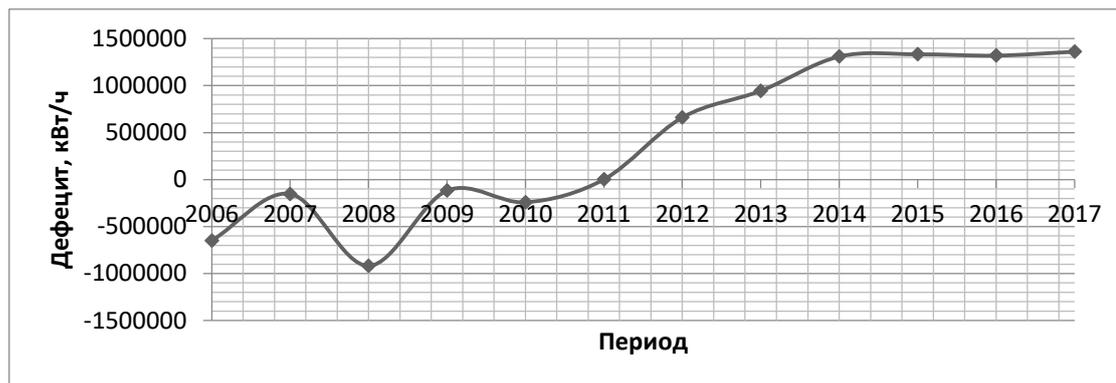


Рис.1.1.1. Дефицит электроэнергии в период с 2006 по 2017 г.

В принятой Долгосрочной Программе строительства малых электростанций на период 2009–2020 гг., разработанной для освоения энергетических ресурсов малых рек, предусмотрено строительство 189 малых ГЭС общей полезной мощностью 26,8 МВт.

В настоящее время более 265 малых ГЭС введены в эксплуатацию. Они предназначены для электроснабжения труднодоступных горных районов. Мощность малых ГЭС варьируется от 5 до 2500 кВт.

К бесплотинным микро- и мини-ГЭС мощностью до 100 кВт (микро-ГЭС) и до 1000 (мини-ГЭС) кВт относятся гирляндные, шнековые, погружные с вертикальным и горизонтальным расположением роторов, наплавные, рукавные, гидроударные и свободнопоточные ГЭС.

При разработке мини-ГЭС для республики следует учитывать особенности ее горного рельефа. Республика Таджикистан представляет собой красивую горную местность с хорошо известными Фанскими горами. Статья дохода от туризма является второй по величине после поступлений от энергетики. Вводимые вновь гидроэлектростанции не должны нарушить эстетику и экологию горного ландшафта наличием гидросооружений и неоправданных плотин с запрудами. Поэтому предпочтение надо отдать водопогружным мини-ГЭС.

Ожидаемая мощность мини-ГЭС и оценка возможных мест их расположения в труднодоступных населённых пунктах на территории Таджикистана представлены в табл. 1.6.

Таблица 1.6 – Труднодоступные населенные пункты в горных районах Республики Таджикистан и потенциальная электрическая мощность мини-ГЭС

Поз .	Населенные пункты	Удалённость от централизованных сетей, км	Кол-во жителей	Основной вид деятельности	Потенциальная электрическая мощность мГЭС, кВт
1	Булункуль	90	32	Рыбалка и животноводство	25
2	Пасор	125	27	Земледелие и животноводство	20
3	Хиндукуш нижний	105	23	Рыбалка и земледелие	20
4	Хиндукуш верхний	116	33	Рыбалка и земледелие	32
5	Хавдш	130	18	Рыбалка и животноводство	20

Проведённый анализ показывает необходимость изучения вопросов использования мини-ГЭС для обеспечения электроэнергией удалённых и труднодоступных районов республики. При этом выявлено, что источники водной генерации электроэнергии Республики Таджикистан обладают большой мощностью. Гидроэлектростанции малой мощности существенно востребованы для энергоснабжения удалённых населённых пунктов в горной местности, как для удовлетворения текущих потребностей, так и для развития хозяйства. Гидроэнергетика в целом и, особенно, малая гидроэнергетика нуждаются в теоретическом и практическом развитии.

1.2. Алгоритм формирования и реализации проектов по разработке мини-ГЭС

Для создания рентабельной и экономически целесообразной мини-ГЭС необходим тщательный предварительный анализ ресурсов реки, места установки мини-ГЭС и экономическая эффективность проекта. С целью реализации поставленной задачи предлагается следующий алгоритм выбора и расчёта инвестиционного проекта для мини-ГЭС.

Алгоритм разработки и реализации проекта энергоснабжения на базе мини-ГЭС состоит из следующих основных блоков, представленных в структурной схеме, изображённой на рис.1.2.1.

Блок «1. Исследование гидроресурсов местности и потребности в электроэнергии».

Здесь проводятся исследования гидроресурсов местности и определяется потребность населения в электроэнергии. Исследуется как мощность гидропотоков, так и их труднодоступность для монтажа оборудования и удалённость от потенциальных потребителей.

Блок «2. Принятие решения о формировании технического проекта на разработку мини-ГЭС».

После исследования местности и потенциальных потребителей принимается решение о формировании технического проекта на разработку мини-ГЭС, включающего перечень необходимого оборудования и ресурсов (материальных, человеческих и финансовых).

Блок «3. Предварительная оценка стоимости проекта мини-ГЭС и выбор источников финансирования».

На этом этапе составляется предварительная калькуляция необходимого оборудования мини-ГЭС и производится оценка его стоимости. Здесь же предварительно рассчитываются необходимые человеческие и материальные ресурсы и производится их оценка в стоимостном выражении за весь период реализации проекта. Этот этап предназначен для предварительной оценки необходимых инвестиций в проект мини-ГЭС. Принимаются решения об

источниках инвестиций: собственные средства, заёмные средства или их комбинация.

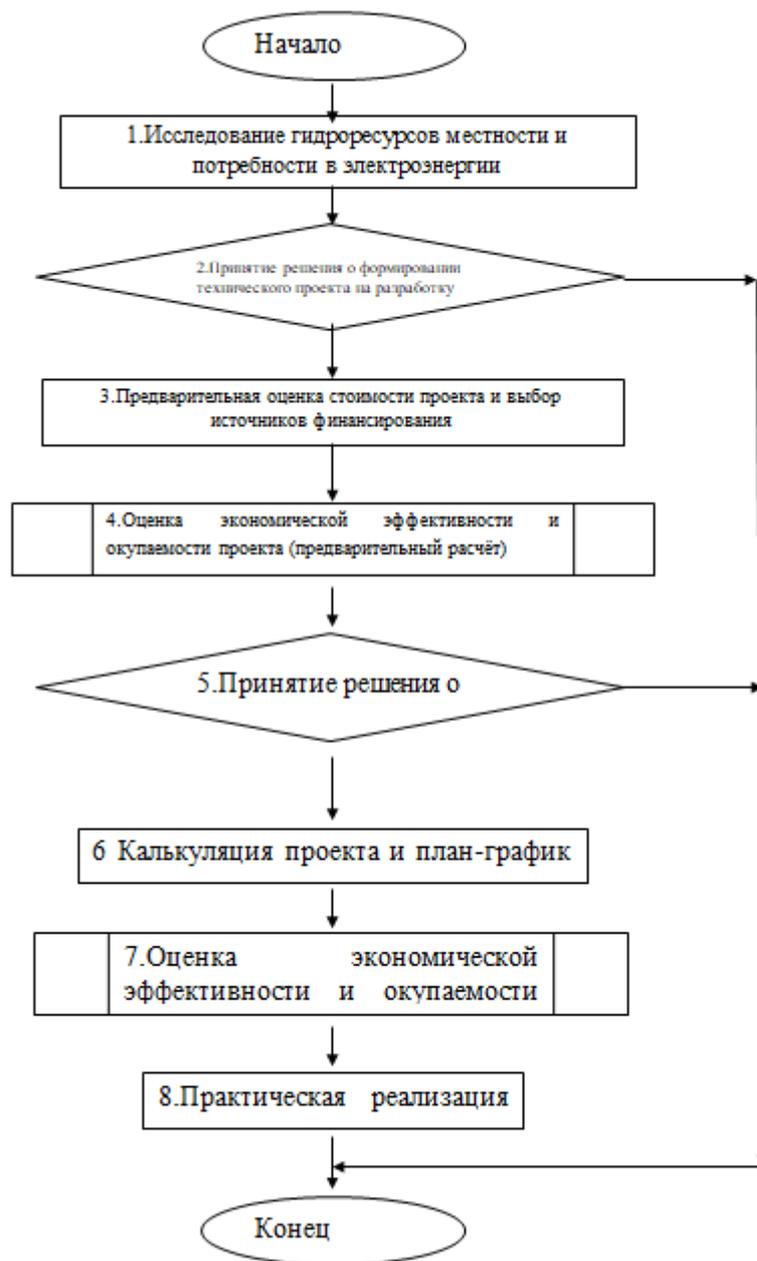


Рис.1.2.1. Алгоритм разработки и реализации проекта энергоснабжения на базе мини-ГЭС

Блок «4. Оценка экономической эффективности и окупаемости проекта (предварительный расчёт)»

На этом этапе проекта по введённым данным необходимых инвестиций и источников финансирования проекта, внутренних и внешних, с учётом

условий кредитования производится расчёт окупаемости проекта по специальной методике. В расчётах учитывается инвестиционная часть проекта, а также текущие доходы и текущие расходы от производства и реализации электроэнергии. Учитываются также показатели инфляции и риска реализации проекта. По введённым в расчётную программу исходным данным производится расчёт срока окупаемости проекта мини-ГЭС.

Блок «5. Принятие решения о реализации проекта».

После получения данных о сроке окупаемости проекта мини-ГЭС принимается решение о возможности его реализации. Если решение положительное, то переходят к следующему этапу проекта.

Блок «6. Калькуляция проекта и план-график реализации».

На этом этапе составляется план-график и детальная калькуляция проекта с учётом сроков поставки оборудования и объёмов привлекаемых материальных и человеческих ресурсов на каждом этапе работ.

Блок «7. Оценка экономической эффективности и окупаемости проекта (уточнённый расчёт)».

По изложенной в описании блока 4 методики производится уточнённый расчёт срока окупаемости проекта с учётом его детальной калькуляции. После чего переходят к практической реализации проекта.

Блок «8. Практическая реализация проекта»

Данный блок предполагает производство работ по вводу мини-ГЭС в эксплуатацию.

1.3. Анализ традиционных структур мини-ГЭС

Для оценки целесообразности внедрения мини-ГЭС в общий энергобаланс системы энергоснабжения необходимо определить ее структуру. Рассмотрим традиционную структуру мини-ГЭС (рис.1.3.1). Кроме плотины и подводящего трубопровода она содержит известные составные элементы:

- гидротурбина (ГТ);
- генератор (Г);

- коммутационно - защитная и распределительная аппаратура (КРА);
- тиристорное устройство возбуждения (ТУВ);
- привод затвора турбины (ПЗТ);
- привод разгонный турбины (ПРТ);
- регулятор турбины (РТ);
- регулятор возбуждения (РВ);

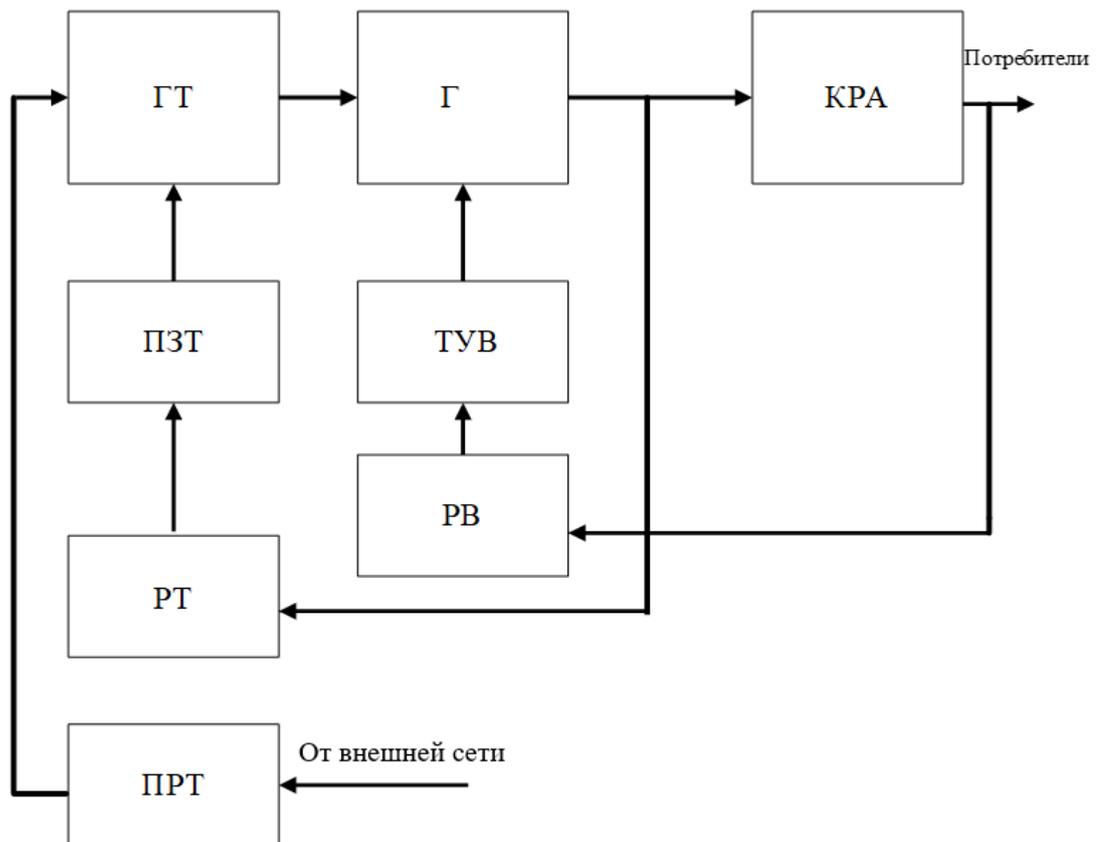


Рис.1.3.1. Традиционная схема мини ГЭС

Не останавливаясь на рассмотрении принципиальных схем и конструкций ГТ, отметим, что, как правило, они содержат устройство регулирования скорости вращения при изменении напора жидкости. Это может быть либо устройство регулирования перекрытия трубопровода, либо устройство для регулирования угла поворота лопаток турбины [68-76]. В том и другом случае это достаточно сложные устройства, входящие в СУ, требующие наблюдения и обслуживания.

В качестве генераторов в таких ГЭС чаще всего используется синхронная машина с электромагнитным возбуждением [68-76]. Для такого генератора требуется дополнительный источник постоянного тока для возбуждения, и ток возбуждения поступает через контактные кольца. Наличие контактных колец понижает надёжность генератора и требует периодического обслуживания. Генератор может содержать собственный возбудитель. Тогда машина будет бесконтактной, но это уже не машина, а агрегат из двух машин, что также усложняет конструкцию и обслуживание генератора.

Система управления должна содержать источник электропитания для собственных нужд и электронные органы для регулирования частоты и амплитуды выходного напряжения ГЭС.

Краткий анализ функциональной схемы мини-ГЭС показывает, что она является достаточно сложным техническим объектом, требующим периодического обслуживания и постоянного наблюдения. Несмотря на большое количество обслуживающего персонала на мини-ГЭС их надёжность и срок службы оказываются небольшими. Например, из 22 электростанций, пущенных в эксплуатацию за 2001...2010 годы, многие вышли из строя. Следовательно, необходим пересмотр, если не структуры, то элементного состава мини-ГЭС.

Для этого проанализируем статистику неисправностей и причины выхода из строя существующих мини-ГЭС. Например, Ховалингская гидроэлектростанция в деревне Сарисёб, построенная в 2010 году мощностью 15 кВт·ч, из-за отказа генератора не работает. Малая гидроэлектростанция «Яхшо» мощностью 5 кВт была построена в Шурободском районе в 2009 году, прекратила работу в связи с выходом из строя генератора. Другая малая гидроэлектростанция «Хафса» была построена в 2010 году мощностью 15 кВт в Шуробском районе – не функционирует из-за повреждения генератора. В 2009 году была построена малая гидроэлектростанция «Шуробский район» мощностью 20 кВт·ч. По причине выхода из строя «системы возбуждения генератора» прекратила работу. Также

можно привести примеры выхода из строя электростанций из-за выхода из строя регуляторов гидротурбин. Следовательно, можно заключить, что основными причинами выхода из строя малых электростанций являются отказ системы возбуждения генератора и регуляторов турбин. Другими словами, отказывают те элементы, которые обеспечивают качество электроэнергии: стабильность амплитуды выходного напряжения (система возбуждения генератора), стабильность частоты выходного напряжения (регулятор скорости вращения турбины).

Отсюда возникает проблема совершенствования элементного состава мини-ГЭС с целью повышения их надёжности и сокращения эксплуатационных расходов. Одним из вариантов решения этой проблемы является разработка полностью автоматической, необслуживаемой мини-ГЭС.

1.4. Принцип построения необслуживаемой ГЭС

Принцип построения необслуживаемой ГЭС заключается в отказе от традиционных методов регулирования амплитуды напряжения за счет изменения тока возбуждения, регулирования скорости вращения турбины и применения балластной нагрузки [68-76]. Вместо этого 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.

Кроме того, расширение использования электронной аппаратуры позволит сделать ГЭС действительно автономным необслуживаемым объектом. Для этого в её состав необходимо ввести устройства, реализующие функции диагностики состояния узлов и агрегатов ГЭС и функции связи с центральным

диспетчерским пунктом системы электроснабжения республики. С учётом изложенного, функциональная схема современной мини- ГЭС, как автономного электротехнического комплекса может быть представлена в виде следующей функциональной схемы (рис.1.4.1). Комплекс содержит следующие элементы:

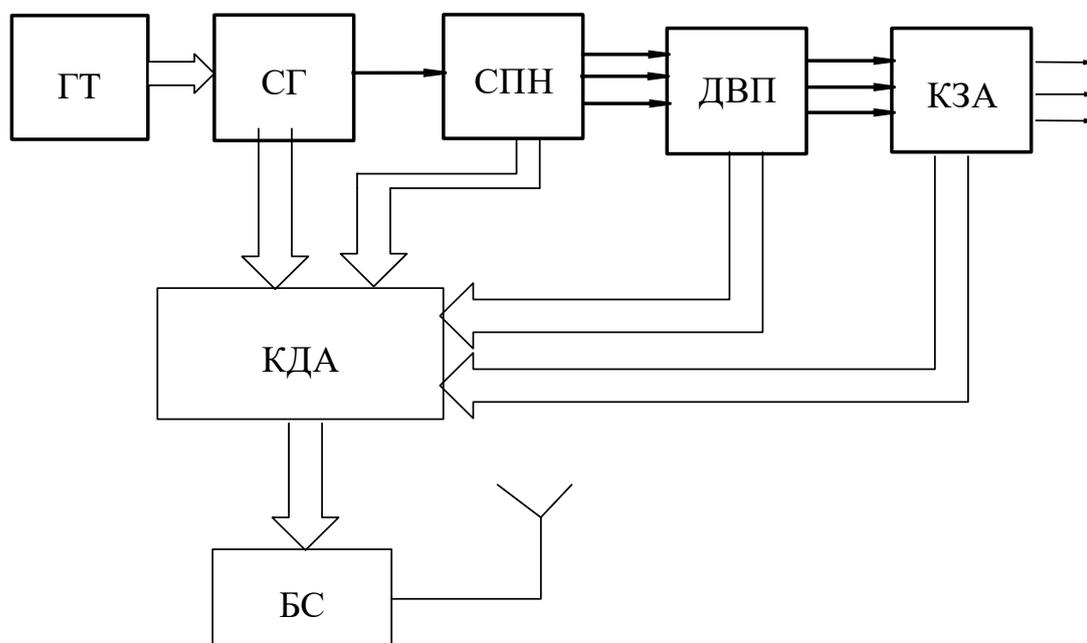


Рис.1.4.1.Функциональная схема автономной автоматизированной мини-ГЭС

Гидротурбина (ГТ), в качестве которой предлагается использовать серийный центробежный насос.

Синхронный трёхфазный генератор (СГ), в качестве которого предлагается использовать вентильную синхронную трёхфазную машину с возбуждением от постоянных магнитов.

Силовой преобразователь напряжения (СПН), включающий в себя три элемента- преобразователь переменного ток в постоянный, преобразователь постоянного тока в переменный заданной амплитуды, частоты и устройство симметрирования выходного трёхфазного напряжения.

Блок датчиков выходных параметров ГЭС (ДВП), который выдаёт информацию о текущих значениях частоты, тока, напряжения, мощности и выработанной энергии.

Блок коммутационно- защитной аппаратуры (КЗА), который включает в себя стандартные для любой электростанции коммутационно- защитные устройства.

Блок контрольно-диагностической аппаратуры (КДА), предназначенный для реализации функций диагностики состояния элементов комплекса и оценки его текущей и последующей работоспособности.

Блок связи (БС), предназначенный для связи и передачи данных о выходных параметрах и состоянии отдельных элементов на центральный диспетчерский пункт.

Каждый из элементов функциональной схемы требует дополнительной научно- технической проработки, поэтому рассмотрим их подробнее.

Обратимся к ГТ. Использование центробежного насоса в качестве гидротурбины известно [74]. Однако остаются недостаточно выясненными вопросы изменения скорости вращения насоса в режиме турбины при одновременном изменении напора и момента на валу, связанного с изменением потребления электроэнергии [75]. Следовательно, для обоснованного выбора типа и мощности насоса, а также оценки возможного диапазона изменения его скорости вращения в процессе эксплуатации, потребуется более детальное исследование гидродинамических процессов его работы в режиме турбины.

Генератор на основе синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ) является хорошо технологически отработанной и изученной машиной. Существенным недостатком СМПМ при использовании его в качестве генератора автономной энергетической установки является возможность возникновения аварийных ситуаций в случае виткового замыкания в обмотке. Действительно, если СМПМ будет продолжать вращаться при наличии такого замыкания, в короткозамкнутом контуре будут протекать большие токи, в результате которых обмотка нагреется до недопустимых температур и возможно возникновение пожара.

Следовательно, возникает задача либо исключения таких замыканий, либо быстрого их обнаружения и остановки генератора.

В СПН преобразователь переменного тока в постоянный может быть выполнен по одному из двух вариантов. Либо это стандартный двухполупериодный, либо синусный выпрямитель [47]. Недостатком первой схемы является влияние выпрямителя на синхронный генератор за счёт несинусоидальности потребляемого тока, что ухудшает его энергетические показатели. Синусоидальный выпрямитель позволяет обеспечить синусоидальность фазных токов, но схема его существенно сложнее и стоимость выше. Поэтому потребуется дополнительная оценка эффективности и границ применения того и другого выпрямителей.

На первый взгляд не вызывает вопросов преобразователь постоянного напряжения в переменное трёхфазное, так как схемы таких устройств хорошо отработаны и серийно выпускаются. Однако в рассматриваемом случае преобразователь работает на несимметричную нагрузку, и вопросы симметрирования напряжений требуют особого внимания, так как несимметрия может быть весьма существенной. Например, одна фаза может иметь нулевую нагрузку, а две другие нагружены до номинальных токов или наоборот, две фазы нагружены, а одна без нагрузки. Вопросы симметрирования нагрузки на выходе преобразователей хотя и рассмотрены в настоящее время [68], однако имеющиеся технические решения достаточно сложны и требуют усовершенствования.

Блок датчиков выходных координат энергетической установки и блок коммутационно-защитной аппаратуры могут быть выполнены на основе стандартных элементов. В первом случае это стандартные датчики частоты и действующего значения напряжения, а также датчики тока и вырабатываемой мощности. Во втором случае это стандартная коммутационно-защитная аппаратура. Дополнительным требованием к ним является вывод информации об измеряемых координатах и о состоянии коммутационно-защитных

элементов в цифровой и импульсной форме, для последующего анализа в устройстве диагностики и передачи по выбранным каналам связи.

Блок диагностики является в данном случае важнейшим, алгоритмически сложным элементом, так как должен в режиме онлайн на действующей аппаратуре оценивать её работоспособность и выявлять не только возникшие неисправности, но и прогнозировать возможность их возникновения. При этом на него поступает информация с различных датчиков. Например, это датчики вибраций корпусов турбины и генератора. По информации с этих датчиков можно судить о состоянии опор этих устройств. Датчик расхода жидкости, поступающей в турбину, информация с которого используется при определении соответствия её мощности расчётным значениям. Датчик температуры обмотки генератора и силовых ключей преобразователя напряжения, информация с которых позволяет судить об исправности генератора и преобразователя. Датчики, фиксирующие возникновение несимметрии и искажение картины магнитного поля, позволяющие экстренно фиксировать витковое замыкание. Датчики для определения сопротивления изоляции обмотки. Информация с перечисленных датчиков, а также информация о значениях выходных координат энергоустановки совместно с информацией, получаемой от математической модели процессов преобразования энергии, заложенной в блок диагностики, используется для оценки её работоспособности и выявления неисправностей.

Для связи с центральным диспетчерским пунктом может быть использован интернет, радиоканал, спутниковая связь и т.д.

Проведенный анализ показывает, что для малой и средней гидроэнергетики рентабельными и экономически приемлемыми могут быть только необслуживаемые полностью автоматизированные мини-ГЭС. Они потребуют значительных первоначальных капитальных затрат, но в процессе надежной и безотказной эксплуатации эти затраты должны окупиться и после этого приносить чистую прибыль, связанную с генерацией электроэнергии.

Разработка такой комплексной автоматизированной мини-ГЭС является сложной научно-технической задачей, которая должна решаться поэтапно.

Основным свойством полностью автоматизированных необслуживаемых систем является их высокая надежность и безаварийная работа. Наиболее типичным видом аварийных ситуаций для энергосистем являются короткие замыкания, которые возникают по причине установки некачественного оборудования, неправильной эксплуатации, отличающейся от нормативных режимов, несвоевременного проведения регламентных и ремонтных работ, внешних воздействий окружающей среды. По данным ОАО «МРСК Урала»- филиал «Челябэнерго» за период с 2009 г. по 2020 г. на основании актов дефектации с учетом информации о проведенных текущих и капитальных ремонтах, испытаниях и плановом обслуживании источников питания приводится следующая статистика отказов [65]:

- заводские дефекты 35%;
- низкая организация эксплуатации 20.5 %;
- некачественный ремонт или монтаж 18%;
- грозовые перенапряжения и удары молнии 5.5%;
- старение изоляции 10 %;
- прочие дефекты 11%.

Основными отказами являются обрыв и короткие замыкания. Если обрыв приводит к остановке электропитания и достаточно быстро ликвидируется, то короткие замыкания могут вызвать пожарную ситуацию и полный выход оборудования из строя.

ГОСТ 26522 (Межгосударственный стандарт. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения) регламентирует 23 вида коротких замыканий в системе электрических сетей (см. приложение П1). В основном они связаны с неправильной эксплуатацией и человеческим фактором. Аварийная статистика по электрическим системам России из всех практически возможных коротких замыканий показывает 4 основных вида нештатных ситуаций (см. приложение П2):

- 1) трехфазное короткое замыкание – 5 %;
- 2) двухфазное короткое замыкание – 10%;
- 3) однофазное короткое замыкание – 65%;
- 4) двухфазное короткое замыкание на землю – 20%.

Следует понимать, что на долю собственно генераторов приходится только часть статистики приведенных отказов, но эти отказы являются наиболее опасными, сложно ликвидируются и могут привести к тяжелым последствиям. Так авария на Саяно-Шушенской ГЭС привела к остановке на значительный срок металлургического алюминиевого производства Красноярского края. Не смотря на то, что на мини-ГЭС лежит гораздо меньшая ответственность, требования к надежности для них остаются достаточно высокими.

Привести официальную статистику причин отказов генераторов достаточно сложно, так как эти электрические машины имеют разный диапазон мощностей, разное назначение, разные условия эксплуатации. Большинство энергокомпаний относятся к частному сектору и считают эту информацию конфиденциальной. Тем не менее данные ОАО «МРСК Урала»- филиал «Челябэнерго» можно считать среднестатистическими и вполне достоверными [65] следующие причины отказов источников питания:

- межфазные замыкания 5.3%;
- витковые замыкания 44%;
- повреждение коммутационной аппаратуры 13.8%;
- повреждение токоподводов 20.4%;
- обрыв обмотки 4.6 %;
- другие виды 11.9%.

Как видно из статистики, витковые короткие замыкания и межфазные замыкания составляют около половины всех отказов. При этом, витковые замыкания являются наиболее опасными. Их достаточно сложно обнаружить на начальной стадии, особенно при работающем генераторе, с них начинается локальное разрушение изоляции, которое может привести к замыканию фазы на корпус и к межфазовым коротким замыканиям.

Основу современной мини-ГЭС составляет вентильный бесконтактный генератор с возбуждением от постоянных магнитов. Статистика показывает, что правильно выбранные подшипники работают достаточно надежно в течение всего периода эксплуатации. Слабым звеном в системе с точки зрения надежности и безаварийной работы является якорная обмотка. По этой причине диагностика и анализ коротких замыканий должны составить основу разрабатываемого электротехнического комплекса по созданию современной автоматизированной, необслуживаемой мини-ГЭС.

Выводы по главе 1

Проведённый анализ показывает необходимость изучения вопросов разработки мини-ГЭС для обеспечения электроэнергией удалённых и труднодоступных районов. При этом выявлено, что:

1. Источники водной генерации электроэнергии Республики Таджикистан обладают большой мощностью. Энергогидропотенциал малых и средних рек республики в несколько раз превышает этот показатель для крупных рек, при этом потенциал крупных рек к настоящему времени уже освоен, а энергия малых и средних рек практически не используется.
2. Освоение малой и средней гидроэнергетики будет сопровождаться созданием большого количества мини-ГЭС. Они могут быть рентабельными только в том случае, если будут эксплуатироваться без обслуживающего персонала в полностью автоматическом режиме. Такие мини-ГЭС должны иметь структуру, которая отличается от традиционных мини-ГЭС. Все элементы этой мини-ГЭС должны обладать высокой надежностью
3. Основным агрегатом мини-ГЭС является генератор. Для современной автоматизированной мини-ГЭС необходимо ориентироваться на вентильные генераторы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Одним из элементов, который может привести к аварийной ситуации и выходу мини-ГЭС из строя, является якорная обмотка. Разработка системы диагностики различных вариантов коротких замыканий обмотки должна составить основу автоматизированной системы управления комплексом.

2. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Вводные замечания

В качестве генератора для мини-ГЭС возможно применение различных вариантов электрических машин. Класс коллекторных машин следует исключить из рассмотрения на первоначальном этапе по причине наличия щеточно-коллекторного узла, который снижает надежность и не позволяет эксплуатировать его в тяжелых условиях повышенной влажности и широком диапазоне изменения температуры окружающей среды. Для водопогружного варианта эти машины в принципе работать не будут [40].

Асинхронные машины, работающие в генераторном режиме могут быть применены для этих целей. Анализ литературы показывает, что такая практика имеется [17,18], но следует отметить, что асинхронные машины не имеют встроенного в них источника для создания магнитного потока по типу машин постоянного тока и синхронных машин. Этим источником является обмотка якоря, которая берет реактивную энергию из внешней цепи. Таким внешним источником может быть только стационарная сеть или конденсаторная батарея в случае работы генератора в автономном режиме. При этом масса и габариты асинхронного генератора будут на 10-15 % больше по сравнению с генераторами постоянного тока и синхронными генераторами из-за выполнения якорем функции возбуждения. Наличие конденсаторной батареи, которая увеличивает цену и снижает надежность, более низкие массоэнергетические показатели асинхронного генератора позволяют отодвинуть его на второй план при выборе базового варианта для мини-ГЭС.

По перечисленным выше причинам исключим из рассмотрения класс вентильно-индукторных машин.

Синхронные машины с электромагнитным возбуждением имеют тот же недостаток, что и коллекторные машины. Это наличие скользящего контакта для токоподвода. Для водопогружного варианта — это решение неприемлемо.

Для работы в воздушной среде этот узел будет более надежным, но он тоже требует обслуживания и ремонта, что противоречит поставленному условию необслуживаемой автоматизированной мини-ГЭС.

Вентильные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов лишены перечисленных выше недостатков. 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.

Конструктивно синхронный генератор с постоянными магнитами состоит из двух основных частей: статора и ротора. Важно отметить, что существует много видов конструкции ротора с постоянными магнитами. Среди них можно выделить радиальную, аксиальную конструкцию, конструкцию с когтеобразными полюсами. В данной работе рассматривается синхронный генератор с радиальной магнитной системой. При этом для рассмотрения примем нормальную конструкцию, когда статор расположен снаружи, а ротор с постоянными магнитами находится внутри (см. рис.2.1).

Данный класс электрических машин работает достаточно надежно. Практика их эксплуатации показывает, что повреждение ротора, выход из строя подшипников, размагничивание постоянных магнитов от действия реакции якоря являются маловероятными. Основным источником неисправности является якорная обмотка, которая из-за старения изоляции или превышения допустимого предела по перегреву может выйти из строя.

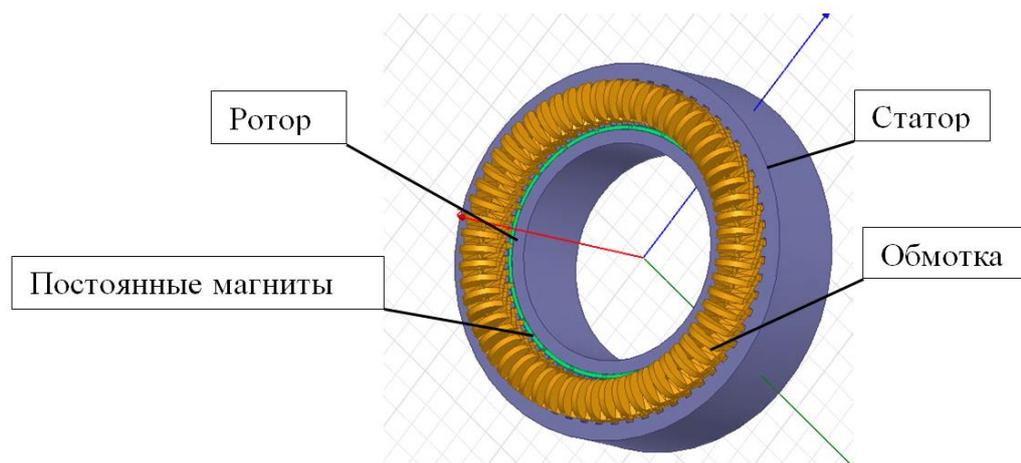


Рис.2.1. Статор и ротор синхронного генератора с радиальной магнитной системой нормального исполнения

Короткое замыкание обмотки якоря является одной из возможных причин неисправностей синхронного генератора. Наиболее типичные короткие замыканиями обмотки статора можно разделить на три группы:

- 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. Воспользуемся этой возможностью и разработаем такой цифровой прототип.

2.1. Построение цифровой модели вентильного генератора для диагностики и анализа коротких замыканий

Проведем анализ возможных методов для построения математической модели генератора применительно к поставленной задаче по анализу витковых замыканий. В общей теории электрических машин предлагается два основных метода: метод эквивалентных схем замещения и метод конечных элементов.

Метод эквивалентных схем замещения предполагает представление электрической машины в виде совокупности однородных тел. В пределах однородного тела параметры и характеристики принимаются постоянными и меняются только при переходе от одного однородного тела к другому. Так, например, считается, что индукция в пределах спинки якоря остается постоянной на протяжении всей ее длины. Этот метод показал свою эффективность, в основном для расчета магнитных цепей электрической машины. Основное достоинство метода – это простота реализации, но этот метод достаточно сложно применить для решения связанной магнитной и электрической задачи, которую необходимо решить при витковых замыканиях. Для повышения точности моделирования этим методом необходимо увеличивать количество этих неоднородных тел, при этом сразу теряется его основное преимущество по простоте реализации. К недостаткам метода следует отнести отсутствие хорошо отработанных САЕ процедур по созданию математических моделей этим методом. Этот метод необходимо реализовывать самостоятельно, что является очень трудоемкой задачей.

Практика показала, что наиболее приемлемым методом для построения цифровой модели является метод конечных элементов (МКЭ). Покажем кратко его основу для расчета электромагнитного состояния электрической машины.

Математический аппарат МКЭ применительно к анализу электромагнитного поля основывается на понятии векторного магнитного потенциала \bar{A} , представляющего собой абстрактную математическую величину, которая связана с физической характеристикой магнитной индукцией \bar{B} следующим соотношением

$$\bar{B} = \text{rot}\bar{A} = \nabla \times \bar{A}. \quad (2.1.1)$$

где ∇ - математическая процедура, называемая лапласианом.

Раскрывая компоненты вектора магнитной индукции по осям декартовой системы координат, получим

$$\begin{aligned}
B_x &= (\nabla \times A)_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}; \\
B_y &= (\nabla \times A)_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}; \\
B_z &= (\nabla \times A)_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}.
\end{aligned}
\tag{2.1.2}$$

Магнитная индукция связана со второй основной физической характеристикой магнитного поля напряженностью \bar{H} известным уравнением Максвелла:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} - \bar{J}, \tag{2.1.3}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

\bar{J} – вектор намагниченности среды в исследуемой точке.

Для изотропной среды формула преобразуется к виду:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0 \mu}, \tag{2.1.4}$$

где μ - скалярная величина, названная относительной проницаемостью среды.

Таким образом, расчет магнитного поля сводится к определению величины векторного магнитного потенциала в каждой точке исследуемой области. Далее, все остальные параметры поля рассчитываются по известным соотношениям.

Сам метод конечных элементов основывается на кусочно-линейной аппроксимации векторного магнитного потенциала дискретной моделью. Сама модель строится на множестве кусочно-непрерывных функций, которые определены на конечном числе областей, называемых конечными элементами.

Покажем теоретическую основу реализации МКЭ на плоскопараллельной задаче, к которой мы сведем нашу модель, поскольку она имеет плоскую симметрию. Используем декартову систему координат. Для каждого элемента векторный магнитный потенциал представим в виде полинома первой степени (рис.2.1.1).

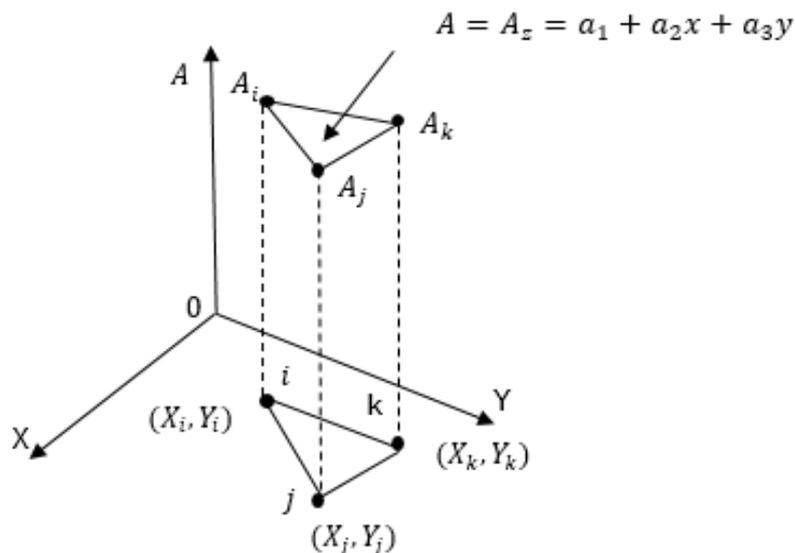


Рисунок. 2.1.1. Представление векторного магнитного потенциала для одного элемента

Для нумерации узлов в элементе с индексами i, j, k примем направление против часовой стрелки. Соответственно, узловые значения потенциала обозначим как A_i, A_j, A_k , а координаты узлов этих потенциалов как $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j), (X_k, Y_k)$. Если мы подставим эти значения в интерполяционный полином, то получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} A_i &= \alpha_1 + \alpha_2 X_i + \alpha_3 Y_i \\ A_j &= \alpha_1 + \alpha_2 X_j + \alpha_3 Y_j, \\ A_k &= \alpha_1 + \alpha_2 X_k + \alpha_3 Y_k \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

Решая эту систему относительно коэффициентов, получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2S_a} \left[(X_j Y_k - X_k Y_j) A_i + (X_k Y_i - X_i Y_k) A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) A_k \right] \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2S_a} \left[(Y_j - Y_k) A_i + (Y_k - Y_i) A_j + (Y_i - Y_j) A_k \right], \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2S_a} \left[(X_k - X_j) A_i + (X_i - X_k) A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) A_k \right] \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

Для определения площади выбранного элемента S_a можно воспользоваться следующим матричным выражением:

$$S_a = 0.5 \cdot \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix}, \quad (2.1.7.)$$

Введем понятие функции формы для каждого узла и запишем через него значение векторного магнитного потенциала.

$$A = N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k, \quad (2.1.8)$$

Функции формы будут выглядеть следующим образом:

$$N_i = \frac{1}{2S_a} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (2.1.9)$$

$$a_i = X_j Y_k - X_k Y_j, \quad b_i = Y_j - Y_k, \quad c_i = X_k - X_j,$$

$$N_j = \frac{1}{2S_a} (a_j + b_j x + c_j y) \quad (2.1.10)$$

$$a_j = X_k Y_i - X_i Y_k, \quad b_j = Y_k - Y_i, \quad c_j = X_i - X_k,$$

$$N_k = \frac{1}{2S_a} (a_k + b_k x + c_k y) \quad (2.1.11)$$

$$a_k = X_i Y_j - X_j Y_i, \quad b_k = Y_i - Y_j, \quad c_k = X_j - X_i,$$

Для МКЭ прямое решение краевой полевой задачи заменяется эквивалентной вариационной задачей по минимизации энергетического функционала

$$F = \int_s \left(\int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) ds - \int_s A J ds, \quad (2.1.12)$$

где $B_x = \frac{\partial A}{\partial y}$, $B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}$ - составляющие вектора магнитной индукции поля, распределенного в области S по осям X и Y .

Для нахождения минимума функционала возьмем частные производные по значению векторного магнитного потенциала в узлах A_i, A_j, A_k и приравняем их к нулю. При этом получим следующую систему алгебраических уравнений для выбранного элемента α :

$$\begin{aligned}\frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_i} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i^2 + b_i^2) A_i + (c_i c_j + b_i b_j) A_j + (c_i c_k + b_i b_k) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0 \\ \frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_j} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_j + b_i b_j) A_i + (c_j^2 + b_j^2) A_j + (c_j c_k + b_j b_k) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0, \quad (2.1.13) \\ \frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_k} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_k + b_i b_k) A_i + (c_j c_k + b_j b_k) A_j + (c_k^2 + b_k^2) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0\end{aligned}$$

Эта система уравнений образует локальную матрицу для каждого элемента. Из локальных матриц путем их сложения можно сформировать глобальную матрицу для исследуемой области. Решая эту систему алгебраических уравнений мы получим значение магнитного потенциала в вершинах всех треугольников и таким образом решим полевую задачу.

Далее можно определить все необходимые параметры и характеристики, включая динамические (индуктивности, активные сопротивления, ЭДС, токи, потоки, потери, моменты).

Задача построения цифровой модели с применением МКЭ во многом облегчается тем, что достаточно сложный математический аппарат, а также трудоемкая процедура разбиения на конечные элементы формализованы хорошо проверенными на практике САЕ системами, такими как Ansys, Comsol, Elcut и другими.

Для построения модели воспользуемся программным комплексом Ansys Electronics Desktop. Выбор данного программного средства обусловлен, прежде всего, наличием в университете официальной лицензии на эту программу, приобретенную 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: $V_r=1,07$ 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 нескольких витков для имитирования межвиткового короткого замыкания;
- разбиение области решения на конечные элементы;
- задание параметров материалов и постоянного магнита;
- задание граничных условий;
- решение полевой задачи.

Расчетная модель синхронного генератора, построенная в двумерной плоскости представлена на рис. 2.1.1.

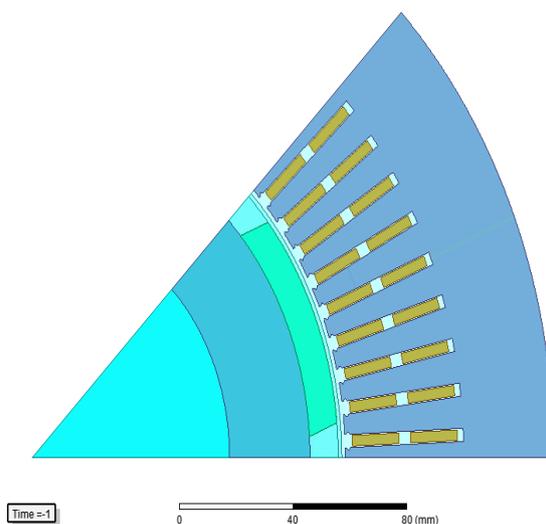


Рис.2.1.1. Расчётная модель синхронного генератора

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. Всю схему обмотки тоже представим в виде отдельных витков в приложении Citrix (см. рис.2.3).



Рис.2.1.2. Электрическая схема якорной обмотки для проведения испытаний

Подключим к генератору номинальную нагрузку и рассмотрим параметры безаварийного режима.

Для анализа возьмем картину магнитного поля (рис.2.1.3.), потокосцепление с фазами якоря (рис.2.1.4.), фазные ЭДС (рис.2.1.5), и фазные токи (рис.2.1.6).

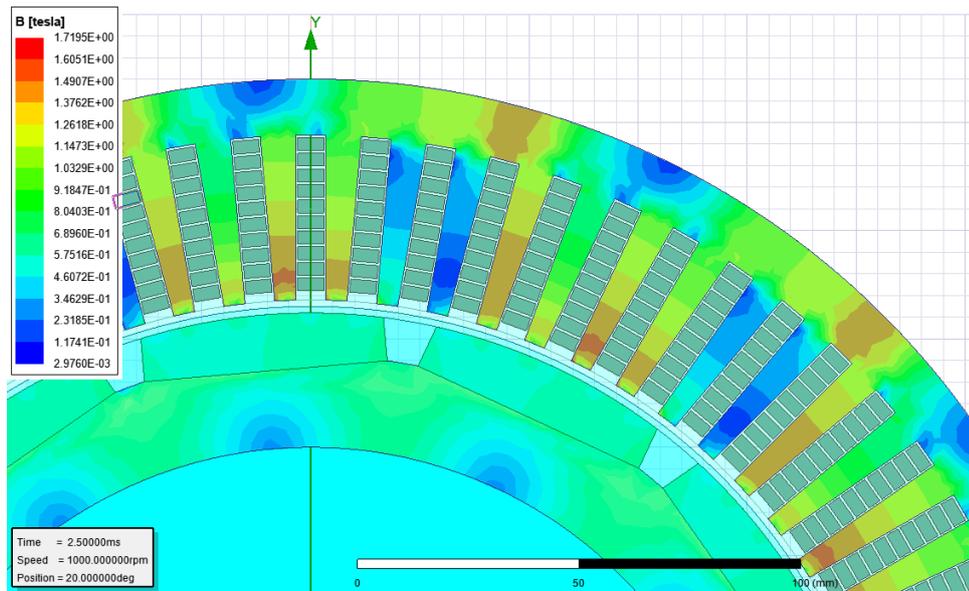


Рис.2.1.3. Картина магнитного поля безаварийного режима работы генератора при номинальной нагрузке.

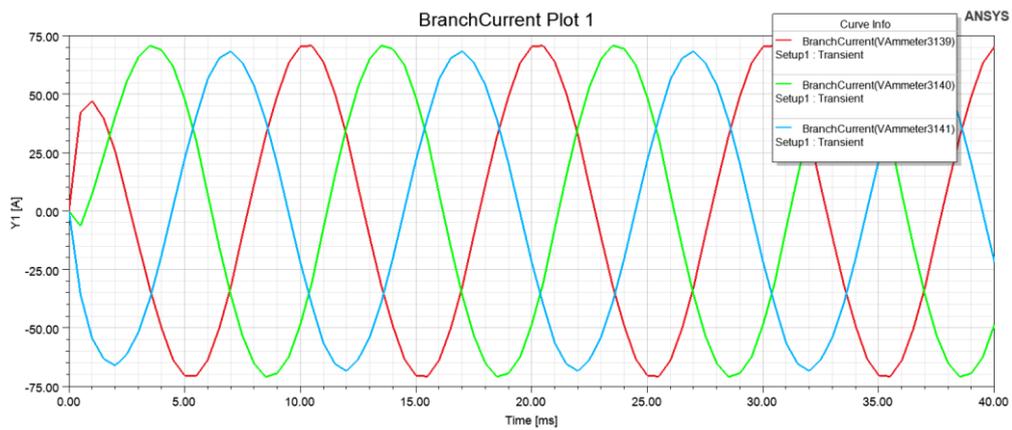


Рис. 2.1.4. Потокосцепление фаз обмотки якоря для безаварийного режима работы

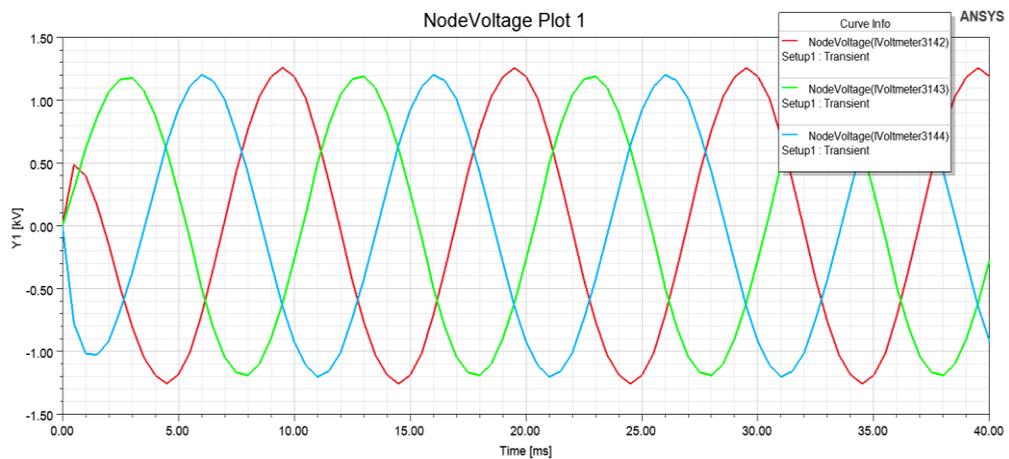


Рис. 2.1.5. ЭДС фаз обмотки якоря для безаварийного режима работы

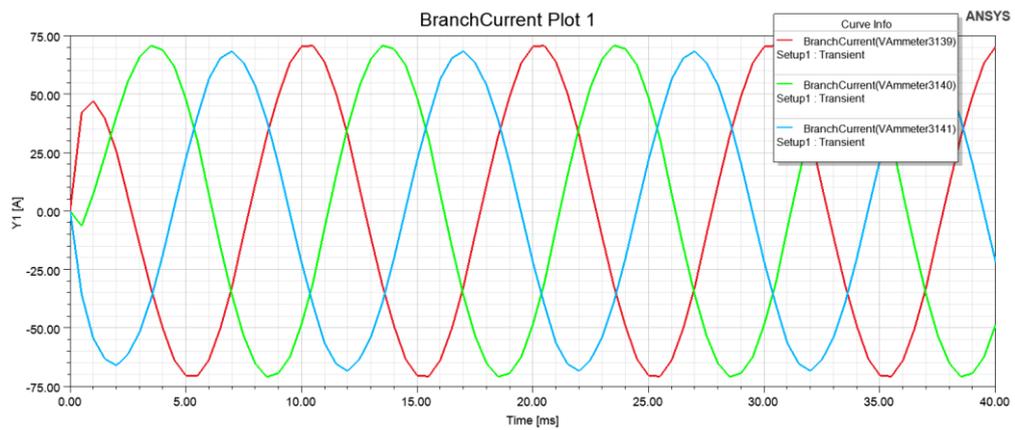


Рис. 2.1.6. Ток фаз обмотки якоря для безаварийного режима работы

Эти кривые возьмем как эталонные для индикации отклонений при коротких замыканиях.

2.2. Построение цифровой модели вентильного генератора для диагностики и анализа витковых коротких замыканий

В качестве аварийной ситуации выбираем короткое замыкание 5 витков фазы А (см. рис. 2.2.1).

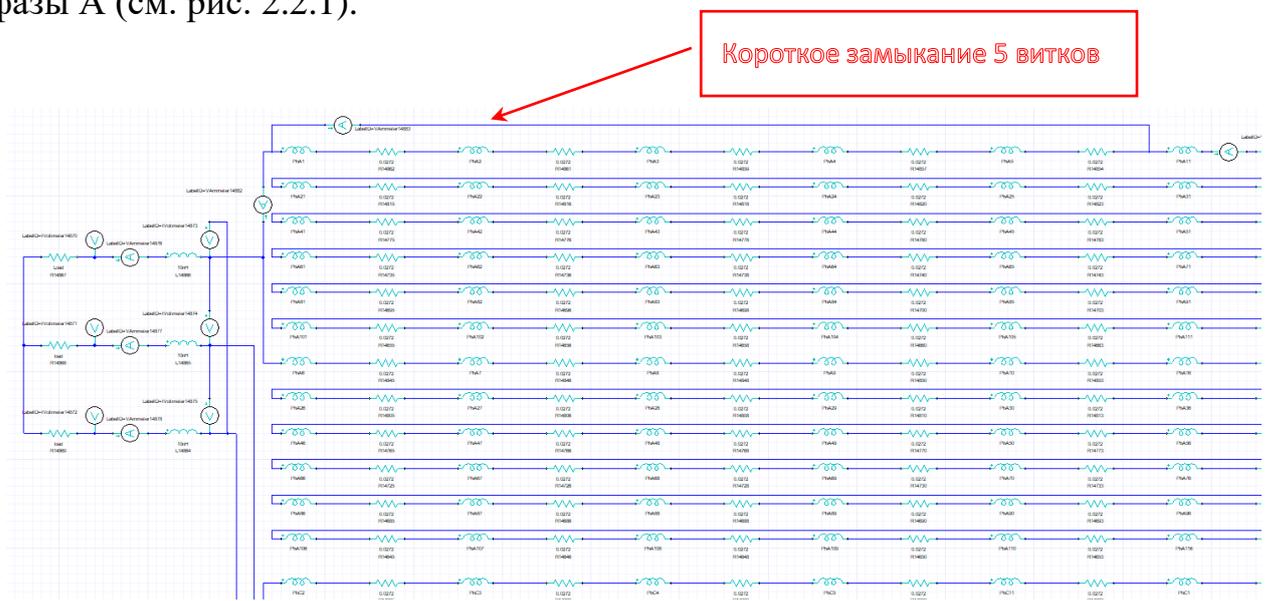


Рис.2.2.1. Имитация аварийного режима при замыкании 5 витков накоротко

В цепь замыкания 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.

Чтобы сравнить влияние различной степени межвиткового короткого замыкания на отклонение трехфазного тока каждой обмотки статора, используется показатель превышения фазного тока при коротком замыкании по сравнению с нормальным режимом:

$$\delta = \frac{|I_{maxkz} - I_{maxn}|}{I_{maxn}} * 100\% \quad (2.1.14)$$

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

Приведем основные характеристики генератора во время короткого замыкания. На рисунке 2.2.2 показаны значения тока в фазах в аварийном состоянии короткого замыкания 1 витка.

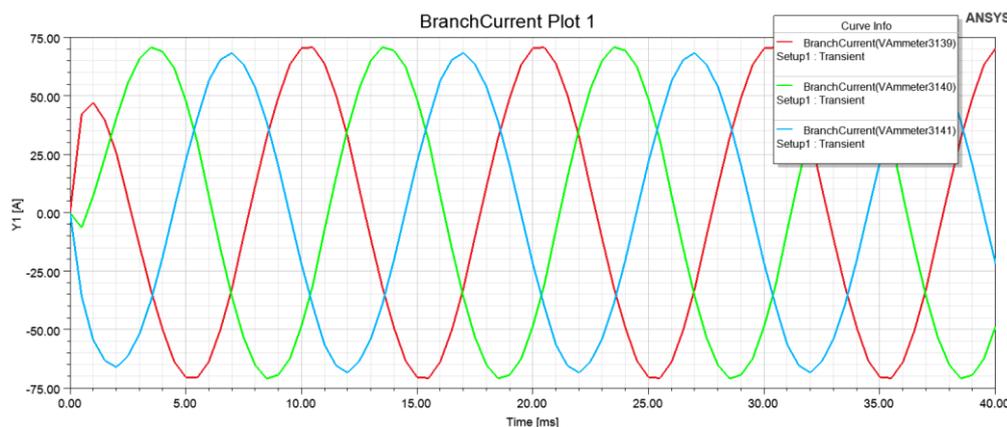


Рис. 2.2.2. Ток фаз якоря во время замыкания

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

$$\delta = \frac{|I_{maxkz} - I_{maxn}|}{I_{maxn}} * 100\% = \frac{|75.7 - 74.5|}{74.5} * 100\% = 1.6\% \quad (2.1.15)$$

Такое превышение показателя лежит в пределах погрешности расчета и не может быть использовано для диагностики аварийного состояния.

На рисунке 2.2.3 приведены зависимости токов для фазы А во внешней цепи и в контуре короткого замыкания.

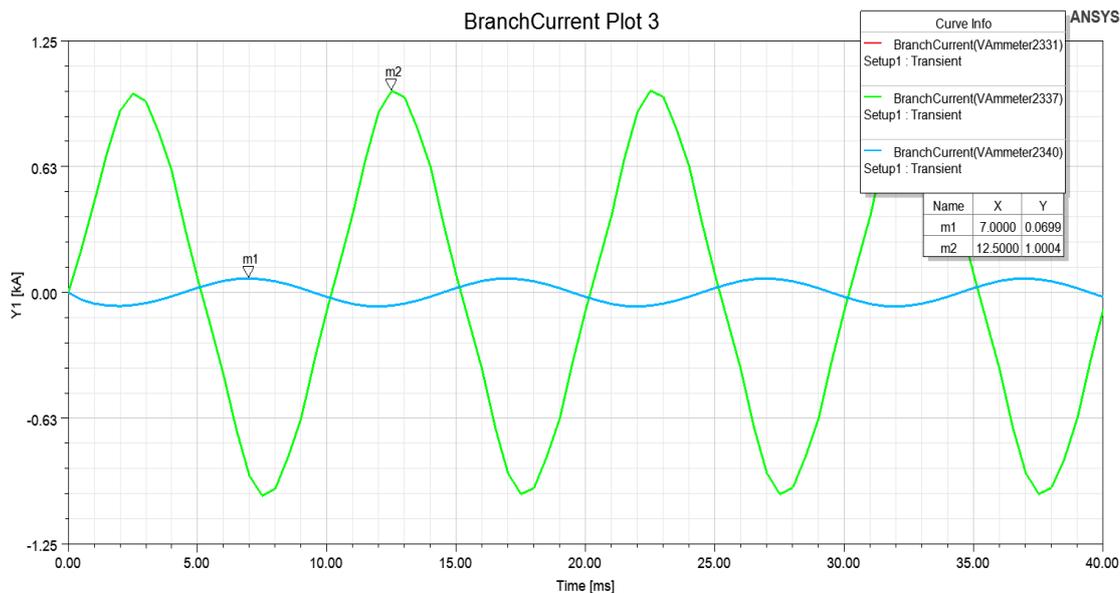


Рис. 2.2.3. Ток замыкания в фазе А

Амперметры 2331 и 2340, которые установлены до и после короткого замыкания, показывают значения тока 70 А. При этом амперметр 2337, который установлен в контуре короткого замыкания витка, показывает 1000 А. Показатель превышения аварийного значения тока над нормальным значением составил $\delta = 14.3$, что является недопустимым режимом работы.

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.

2.3. Применение метода симметричных составляющих для диагностики витковых коротких замыканий

На величину тока, протекающего в фазе обмотки якоря помимо нагрузки влияют два основных фактора. Этими факторами являются генерируемая в фазе ЭДС и собственное индуктивное и активное сопротивления обмотки. Собственное индуктивное и активное сопротивления фазы обмотки зависят помимо других параметров от числа витков. Если при аварийном режиме

виткового короткого замыкания из общего количества витков выпадают несколько короткозамкнутых витков, то изменение выше названных сопротивлений будет достаточно трудно определить, поскольку оно будет соизмеримо с погрешностью приборов. Например, при 100 витках фазы короткое замыкание одного витка изменит активное сопротивление на 1%.

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 вращающего магнитного поля. Визуальный анализ картины электромагнитного поля для номинального режима (рис.2.1.3.) и режима виткового короткого замыкания (рис.2.3.1.) подтверждает этот факт.

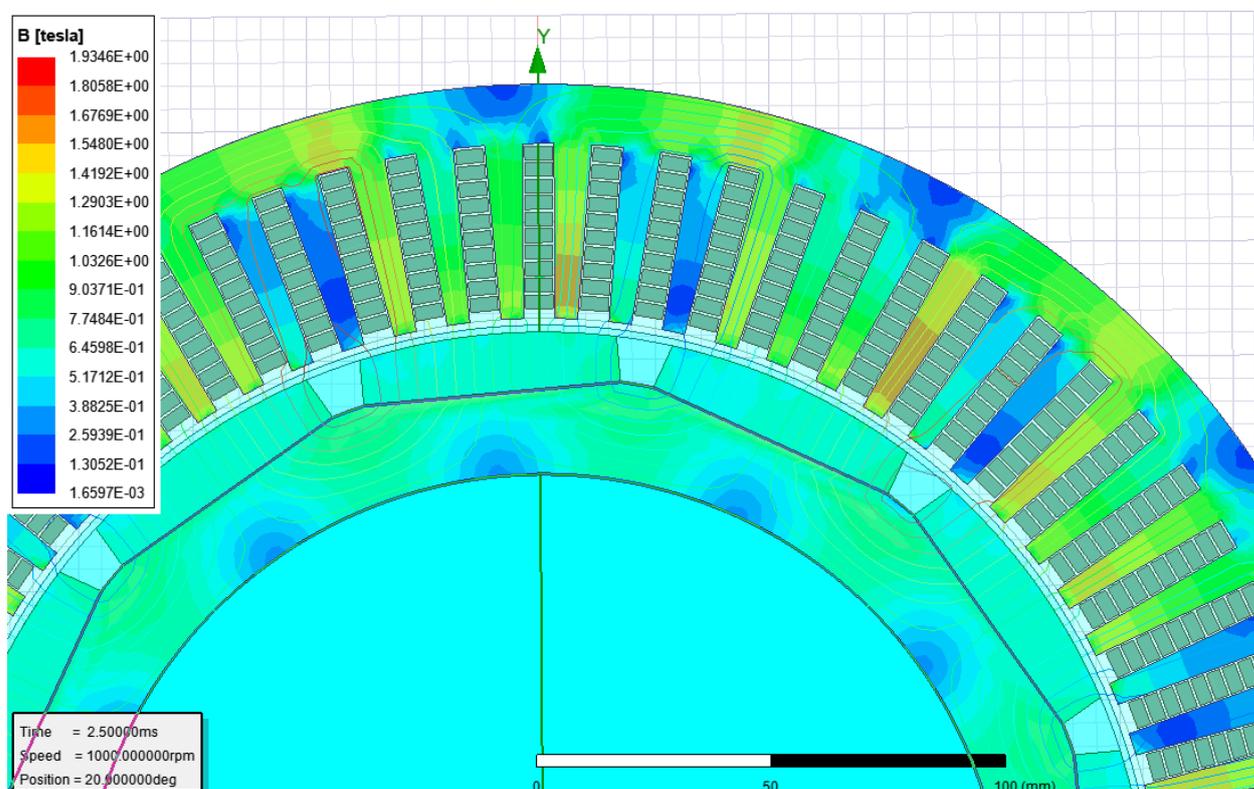


Рис.2.3.1. Картина магнитного поля режима короткого замыкания 5 витков фазы А обмотки генератора при номинальной нагрузке.

Искажение этого поля можно зафиксировать приборами измерения поля, например, датчиками Холла, или измерительными приборами, которые опосредованно определяют это изменение.

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 [4] 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 находиться 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 активных 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. 2.3.2 и рис. 2.3.3.

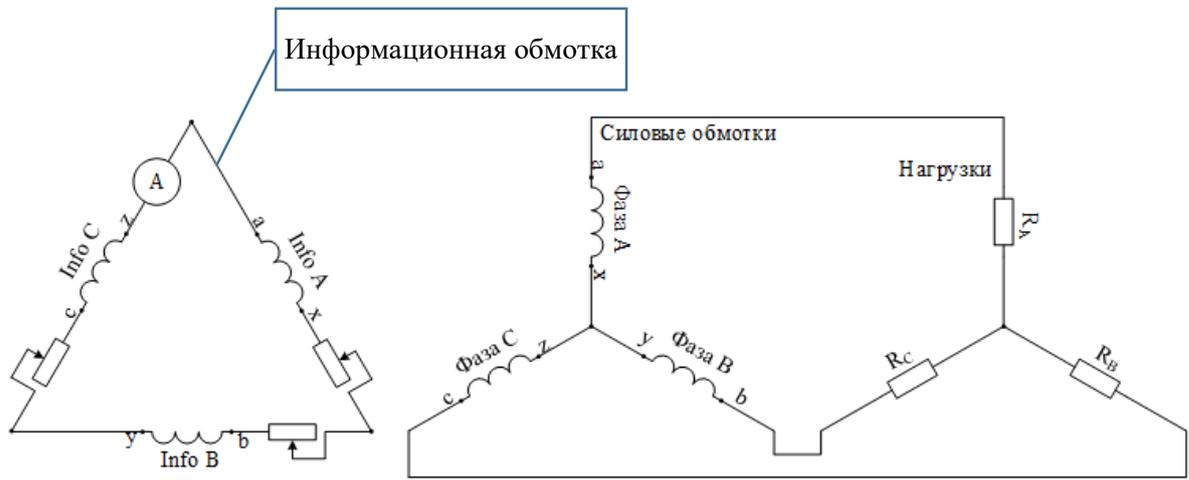


Рис. 2.3.2. Схема генератора с информационной обмоткой при соединении ее в треугольник.

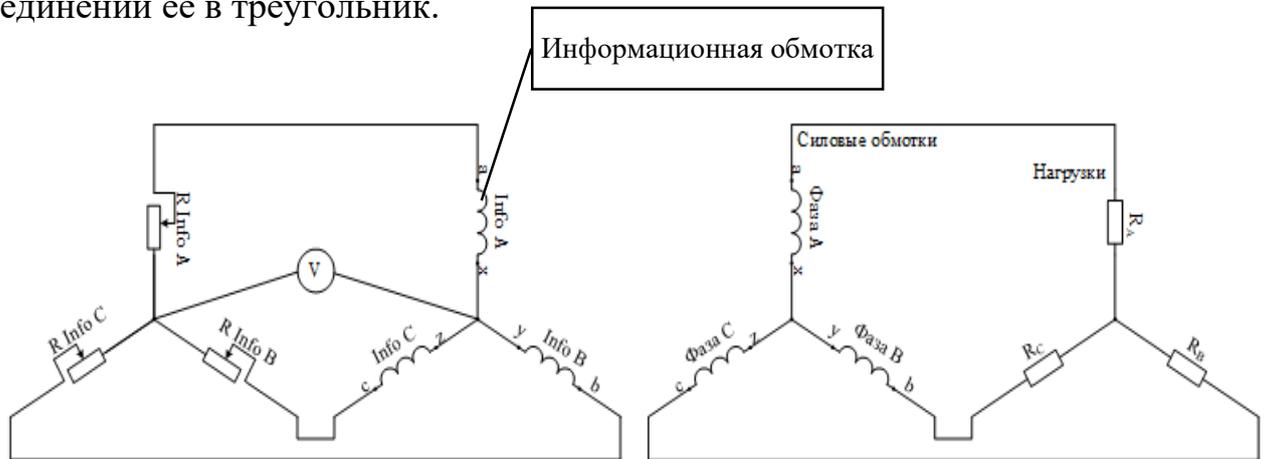


Рис. 2.3.3. Схема генератора с информационной обмоткой при соединении ее в звезду.

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 [46]. 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 пренебрежём 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 на режиме, близком к холостому ходу при соединении ее фаз в звезду. При этом ЭДС фаз информационной обмотки будут практически совпадать с напряжениями, измеряемыми приборами.

Разложим ЭДС фаз информационной обмотки для несимметричного режима короткого замыкания на симметричные составляющие (рис.2.3.4).

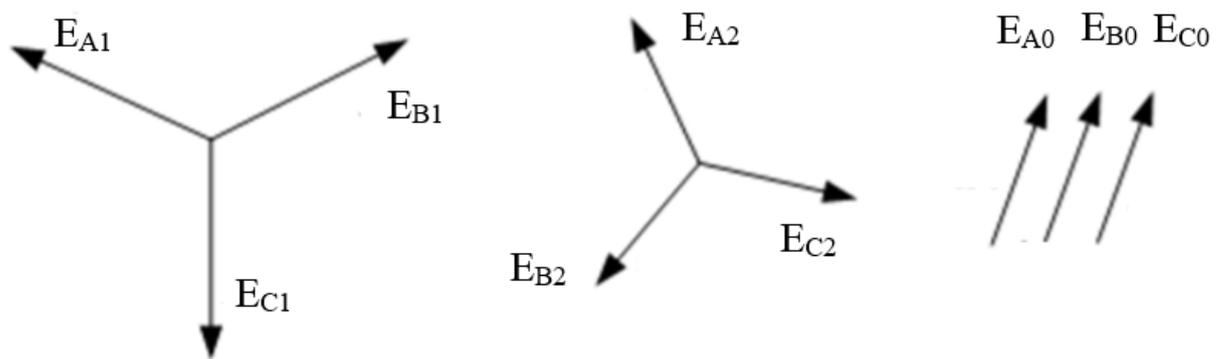


Рис.2.3.4. Симметричные системы фазных ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности фаз.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} E_A = E_{A1} + E_{A2} + E_{A0} \\ E_B = E_{B1} + E_{B2} + E_{B0} \\ E_C = E_{C1} + E_{C2} + E_{C0} \end{array} \right. \quad (2.3.1)$$

Между векторами прямой, обратной и нулевой последовательности фаз приняты соотношения

$$\begin{aligned} E_{B1} &= a^2 E_{A1}; \\ E_{B2} &= a E_{A2}; \\ E_{C1} &= a E_{A1}; \\ E_{C2} &= a^2 E_{A2}; \\ E_{A0} &= E_{B0} = E_{C0}, \end{aligned} \tag{2.3.2}$$

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:

$$E_A + E_B + E_C = E_{A1} + E_{B1} + E_{C1} = 0 \tag{2.3.3}$$

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.2.3.5).

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

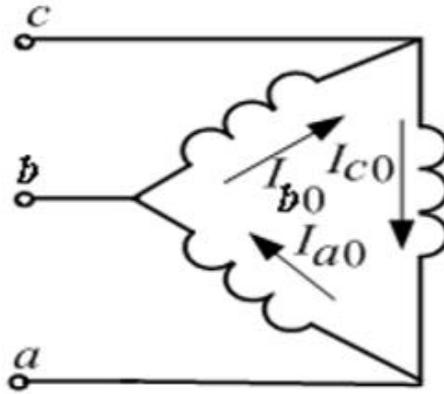


Рис.2.3.5. Схема образования уравнительного тока при витковом замыкании за счет токов нулевой последовательности в информационной обмотке, соединенной в треугольник.

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

$$E_A + E_B + E_C = E_{A1} + E_{B1} + E_{C1} = 0. \quad (2.3.4)$$

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.2.3.6).

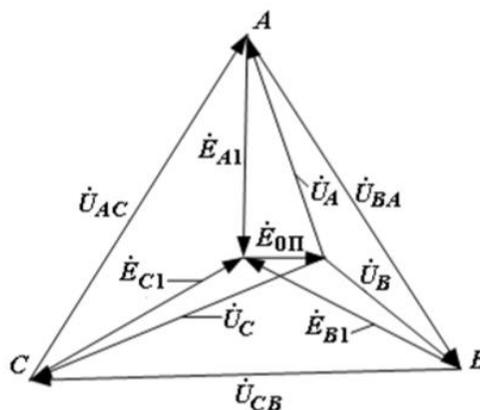


Рис.2.3.6. Векторная диаграмма напряжений измерительной обмотки при несимметричном режиме виткового короткого замыкания.

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

Следует отметить, что данные выводы справедливы только для идеального генератора с полной электрической и магнитной симметрией фаз. В реальных электрических машинах этой симметрии очень трудно достичь. По треугольнику информационной обмотки всегда будет течь уравнительный ток, обусловленный несимметрией магнитной, электрической, технологической, измерительной. Для настройки системы введем прецизионные настроечные сопротивления, которые в нормальном режиме выставят нулевые показатели амперметра и вольтметра.

Проверим теоретические выкладки на цифровой модели, представленной выше.

2.4. Моделирование аварийного режима витковых коротких замыканий на цифровой модели

Заложим в пазы каждой фазы информационную 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.2.4.1). Поскольку цифровая модель полностью симметрична, то вводить в нее сопротивления для настройки 0 не будем. В последующих результатах испытаний не будем показывать модель самого генератора, а будем представлять только схему и результаты тестирования.

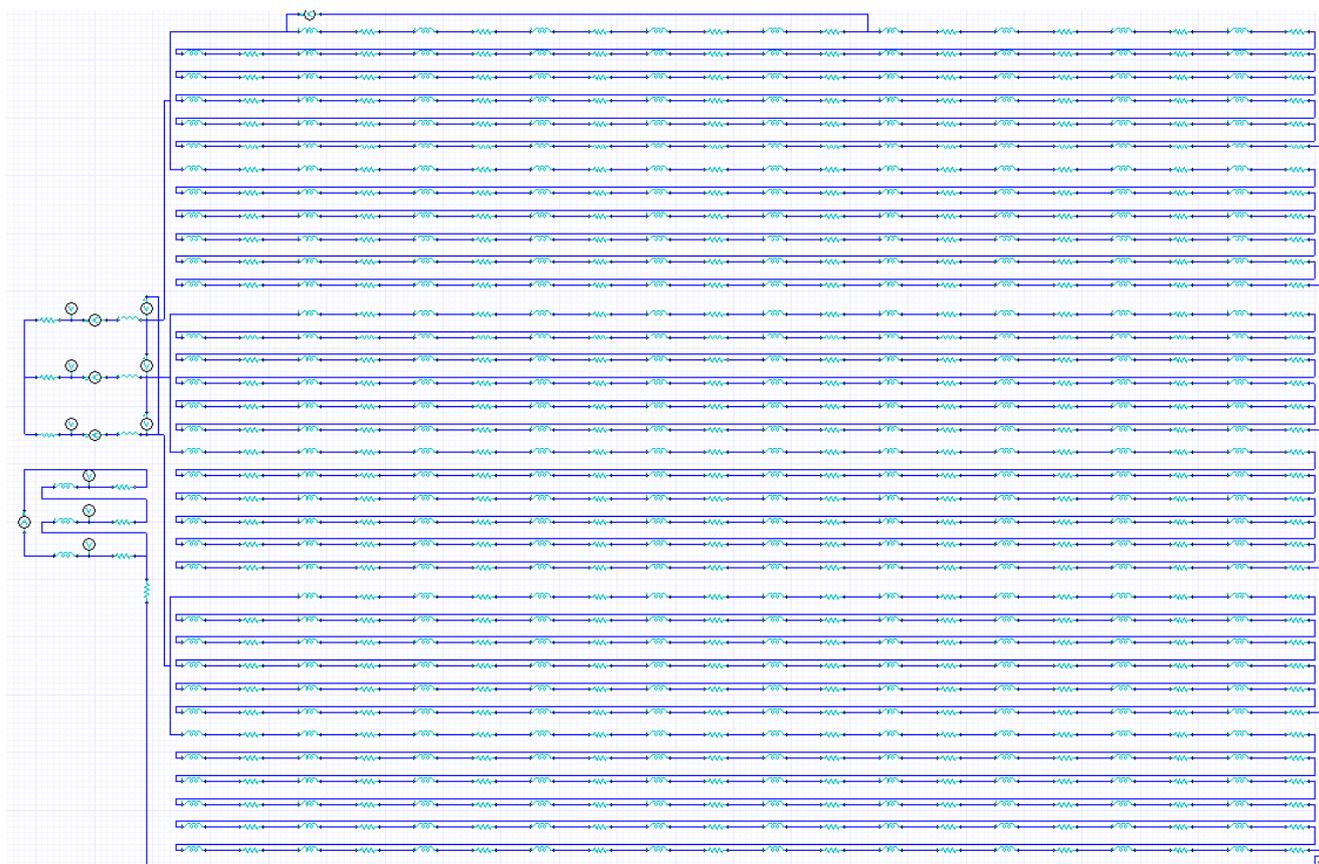


Рис.2.4.1. Схема тестирования генератора при к.з. 5 витков для информационной обмотки, соединенной в треугольник.

Первоначально определим, что короткое замыкание 5 витков является ненормальным аварийным режимом работы генератора. Выше было отмечено, что при замыкании небольшого числа витков изменения внешнего тока и напряжения незначительны. Ниже рис. 2.4.2 приводятся значения тока в фазе и тока в короткозамкнутой ветви.

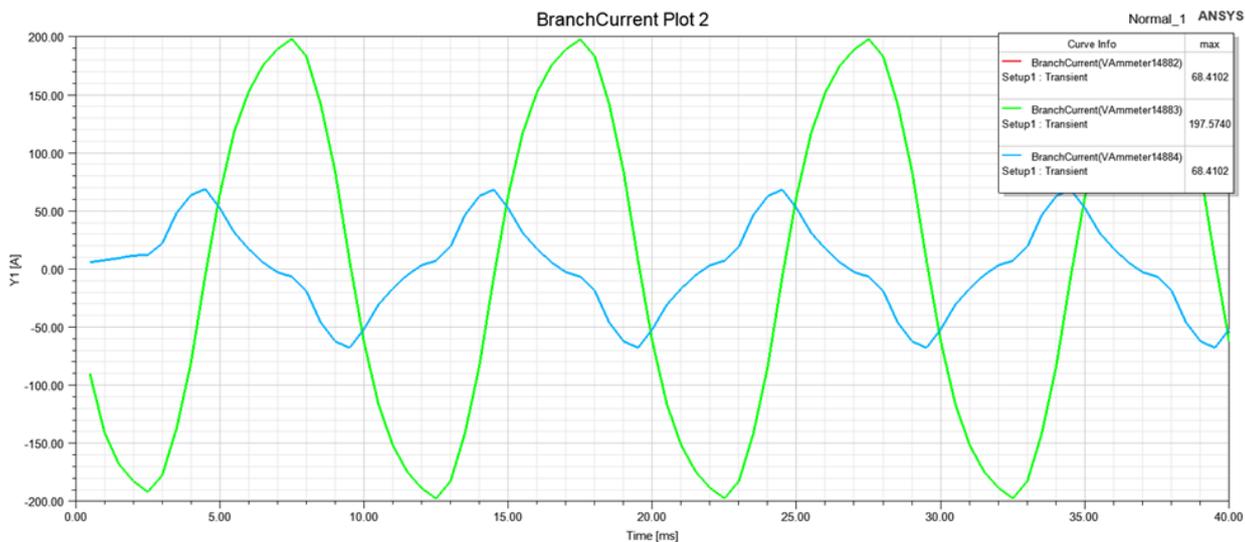


Рис.2.4.2. Значения тока в фазе и тока в короткозамкнутой ветви.

Из графика видно, что амплитуда тока в короткозамкнутой ветви примерно в 5 раз превышает ток в фазе и номинальный ток.

На рисунке 2.4.3. приводятся электрические потери в фазе, а на рис. 2.4.4 электрические потери в 5-ти короткозамкнутых витках.

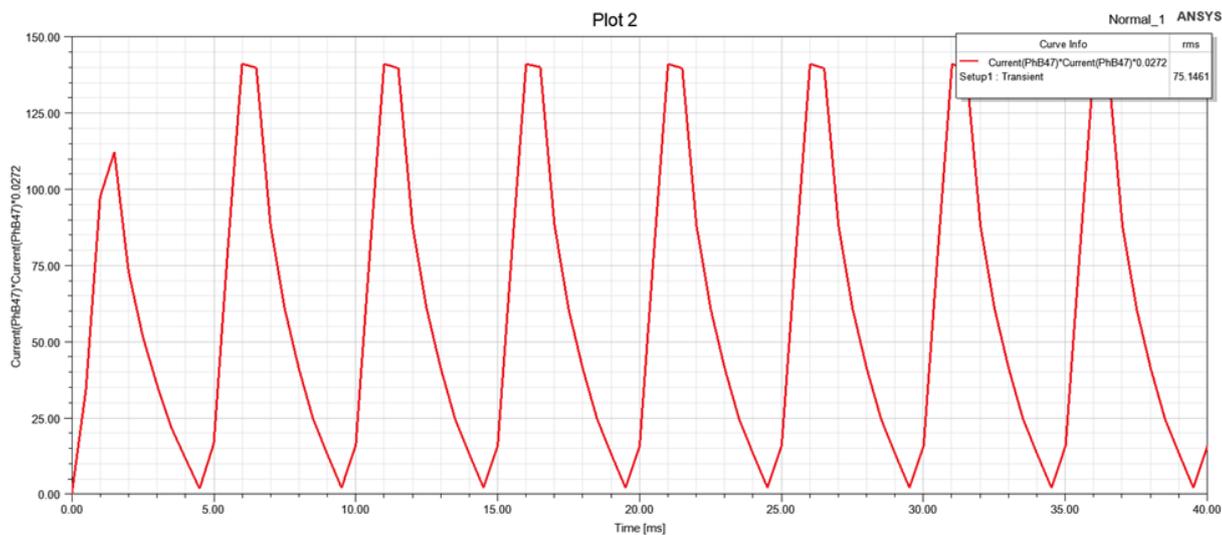


Рис.2.4.3. Электрические потери в фазе

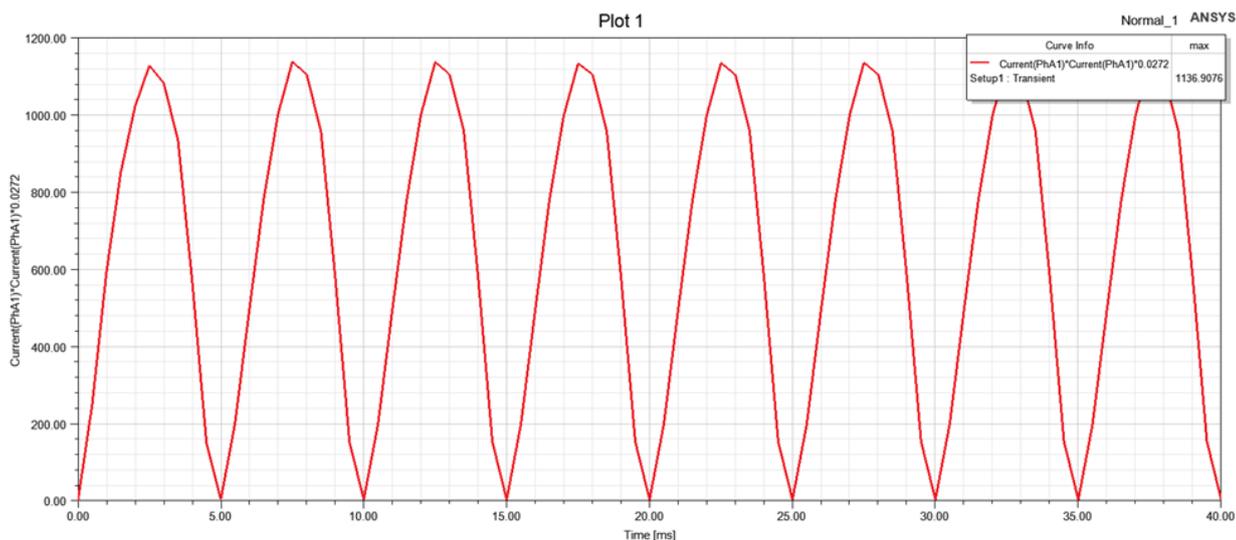


Рис.2.4.4. Электрические потери в 5 короткозамкнутых витках.

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 уравнительные токи в треугольнике информационной обмотки составили значения менее 1 А. 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.2.4.5).

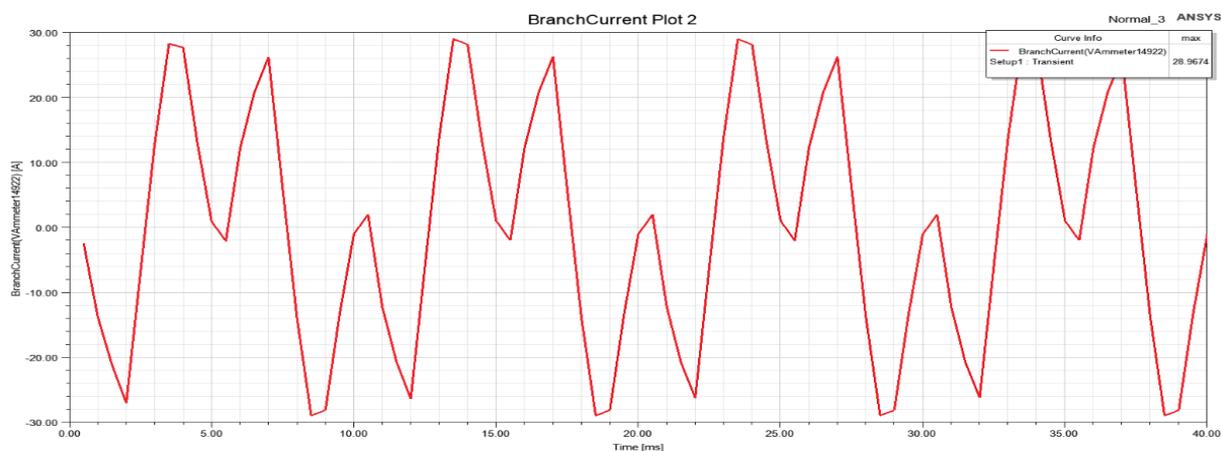


Рис.2.4.5. Ток в треугольном контуре информационной обмотки при к.з. 5-ти витков и соединении информационной обмотки в треугольник.

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.

На рис. 2.4.6. приведена схема тестирования режима короткого замыкания 5-ти витков при информационной обмотке, соединенной в звезду.



Рис. 2.4.6. 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 В. Эта величина, вероятно, обусловлена несимметрией магнитной цепи, ее насыщением, наличием высших гармоник. При режиме короткого замыкания 5-ти витков разность потенциалов составила 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.2.4.7).

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 при соединении фаз измерительной обмотки в звезду, и фиксацией разности потенциалов между теоретическими нулями.

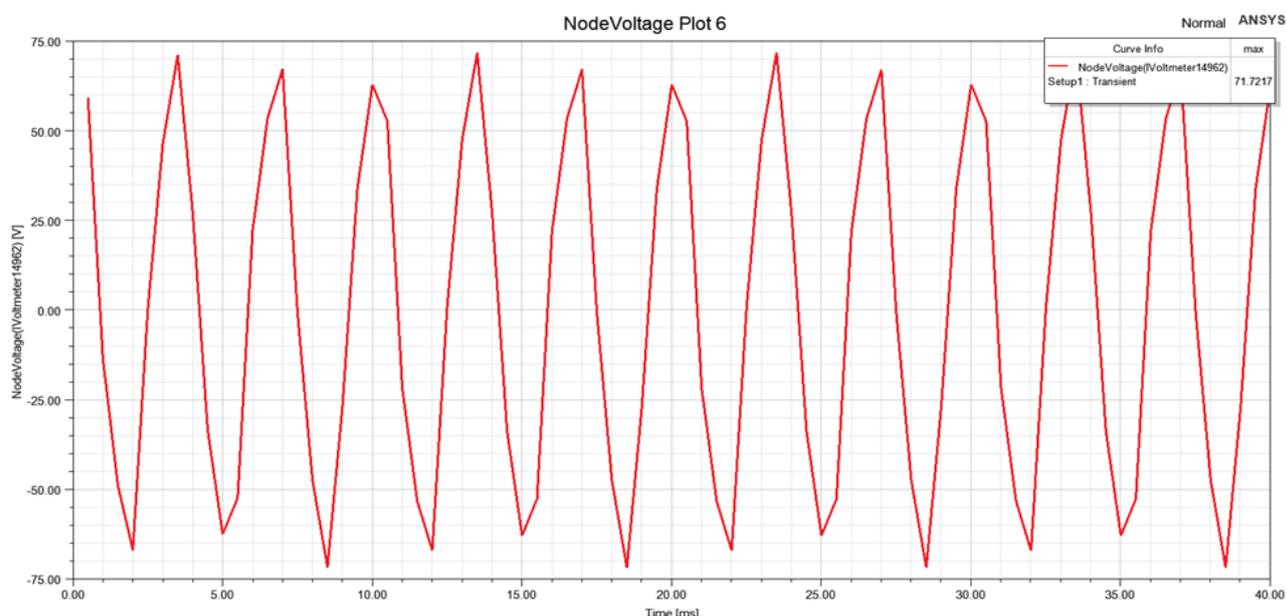


Рис. 2.4.7. Напряжение между нулевыми выводами информационной обмотки и нулевым выводом сопротивлений информационной обмотки при соединении ее в звезду.

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 треугольник и по нарастанию разности потенциала при соединении их в звезду.

2.5. Определение поврежденной витковыми замыканиями фазы по импульсному воздействию прямоугольным напряжением

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.

Выберем методику этой диагностики. Вполне логично предположить, что исправная фаза и поврежденная витковыми замыканиями фаза будут находиться в разных магнитных состояниях. Ток в короткозамкнутых витках поврежденной фазы будет иметь большое значение и по правилу Ленца создавать сильное встречное поле для основного потока. Это повлияет на индуктивность и взаимоиндуктивность фазы. Эти изменения можно будет наблюдать при переходных процессах, возникающих в фазах, например, от импульсного воздействия прямоугольным напряжением.

Рассмотрим теорию этого процесса. Поскольку данная диагностика будет проводиться на остановленном генераторе, то фазы можно рассматривать как катушки, имеющие активное и индуктивное сопротивления.

Рассмотрим первоначально наброс ступеньки напряжения для исправной фазы (рис.2.5.1). Для этого тестирования можно написать следующее уравнение:

$$E_{\text{ист}} = i_{\phi}(R_{\phi} + R_{\text{ист}}) + w_{\phi} \frac{d\Phi}{dt} = i_{\phi}(R_{\phi} + R_{\text{ист}}) + L_{\phi} \frac{di_{\phi}}{dt}, \quad (2.5.1)$$

где $E_{\text{ист}}$ – ЭДС источника напряжения;

$R_{\text{ист}}$ – внутреннее сопротивление источника;

i_{ϕ} – ток в фазе;

R_{ϕ} – активное сопротивление исправной фазы;

w_{ϕ} – число витков в фазе;

Φ – магнитный поток фазы;

L_{ϕ} – индуктивность исправной фазы.

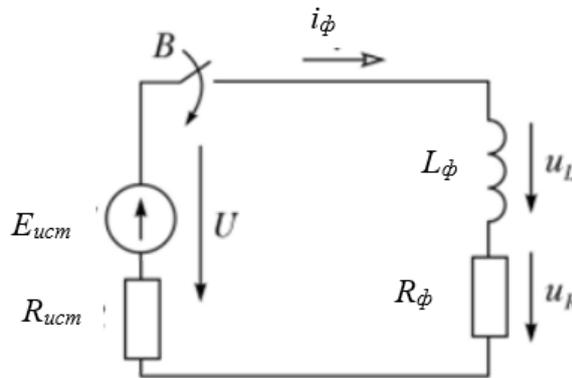


Рис.2.5.1. Схема для исправной фазы при подаче ступеньки прямоугольного импульса напряжения

Рассмотрим аналогичное воздействие для поврежденной витковыми замыканиями фазы (рис.2.5.2).

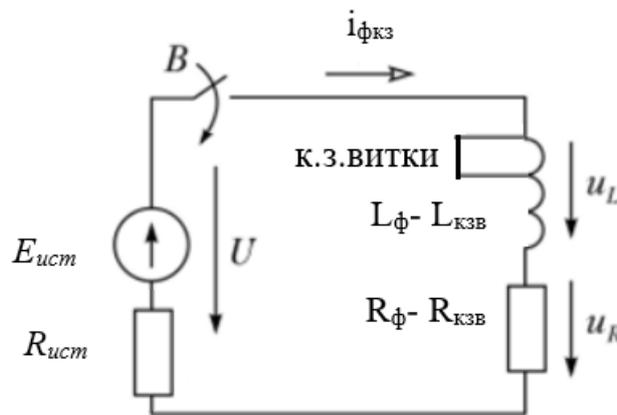


Рис.2.5.2. Схема для фазы с короткозамкнутыми витками при подаче ступеньки прямоугольного импульса напряжения

$$E_{ист} = i_{\phi кз} (R_{\phi} + R_{ист} - R_{кзв}) + (w_{\phi} - w_{кзв}) \frac{d(\Phi - \Phi_{кзв})}{dt}; \quad (2.5.2)$$

где $i_{\phi кз}$ – ток в фазе с короткозамкнутыми витками;

$R_{кзв}$ – активное сопротивление короткозамкнутых витков;

$w_{кзв}$ – количество короткозамкнутых витков;

$\Phi_{кзв}$ – поток от короткозамкнутых витков, который по правилу Ленца действует встречно потоку фазы.

Перепишем уравнение (2.5.2) и добавим к нему уравнение для контура короткозамкнутых витков

$$E_{ист} = i_{\phi кз} (R_{\phi} + R_{ист} - R_{кзв}) + (L_{\phi} - L_{кзв}) \frac{di_{\phi}}{dt} - M_{кзв} \frac{di_{кзв}}{dt}; \quad (2.5.3)$$

$$0 = i_{кзв} R_{кзв} + M_{кзв} \frac{di_{кзв}}{dt}, \quad (2.5.4)$$

где $L_{кзв}$ – индуктивность короткозамкнутых витков;

$M_{кзв}$ – взаимоиндуктивность короткозамкнутых витков с витками фазы;

$di_{кзв}$ – ток в короткозамкнутых витках.

Рассмотрим схемы и запишем уравнения для момента времени, когда действие импульса напряжения заканчивается.

Схема замещения для исправной фазы изображена на рис.2.5.3.

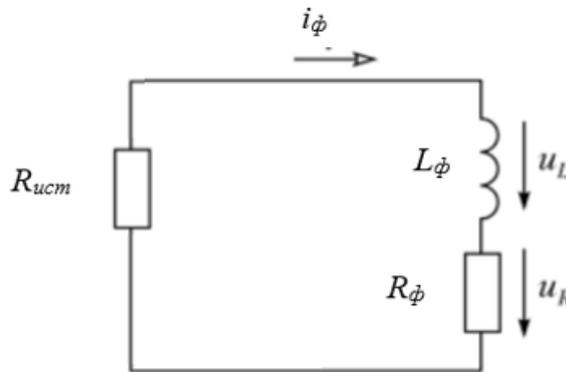


Рис.2.5.3. Схема для фазы с короткозамкнутыми витками после окончания действия прямоугольного импульса напряжения

Уравнение для исправной фазы будет иметь вид:

$$E_{ист} = i_{\phi} (R_{\phi} + R_{ист}) + w_{\phi} \frac{d\Phi}{dt} = i_{\phi} (R_{\phi} + R_{ист}) + L_{\phi} \frac{di_{\phi}}{dt}, \quad (2.5.5)$$

Схема замещения для поврежденной короткими витками фазы показана на рис.2.5.4.

Уравнения для поврежденной короткими витками фазы после окончания действия импульса будут иметь следующий вид:

$$0 = i_{\phi кз} (R_{\phi} + R_{ист} - R_{кзв}) + (L_{\phi} - L_{кзв}) \frac{di_{\phi}}{dt} - M_{кзв} \frac{di_{кзв}}{dt}; \quad (2.5.6)$$

$$0 = i_{кзв} R_{кзв} + M_{кзв} \frac{di_{кзв}}{dt}. \quad (2.5.7)$$

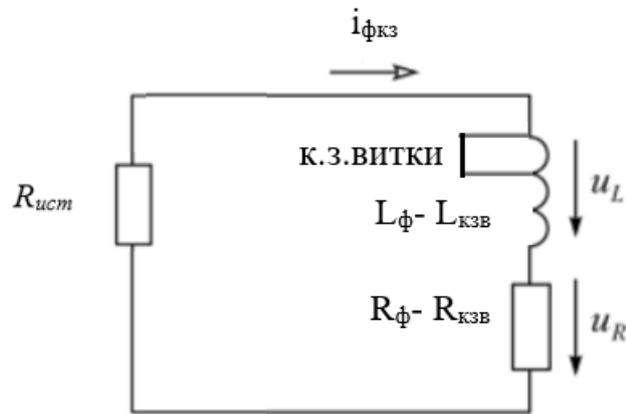


Рис.2.5.4. Схема для исправной фазы после окончания действия прямоугольного импульса напряжения

Визуально видно, что уравнения (2.5.1) и (2.5.3), (2.5.4) при воздействии импульса на фазы, а также уравнения (2.5.5) и (2.5.6), (2.5.7) после воздействия импульса на фазы отличаются друг от друга. Если решить эти уравнения относительно тока в фазе, то мы получим разные переходные процессы в исправной фазе и поврежденной фазе. Это различие и будет индикатором повреждения фазы витковым коротким замыканием.

Следует отметить, что аналитическое решение уравнений (2.5.1 – 2.5.7) достаточно сложно из-за нелинейной зависимости индуктивности нормальной и поврежденной фазы от насыщения магнитной системы. В нашем случае в этом нет необходимости, поскольку для целей диагностики мы создали достаточно точную цифровую модель, на которой можно провести цифровой эксперимент.

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).

На рис. 2.5.5. приведена схема импульсного воздействия на фазы.

Воздействующий импульс имеет следующие параметры:

- форма импульса напряжения – прямоугольник;
- амплитуда 100 В;
- скважность импульса 95%;
- частота импульса -100 Гц.

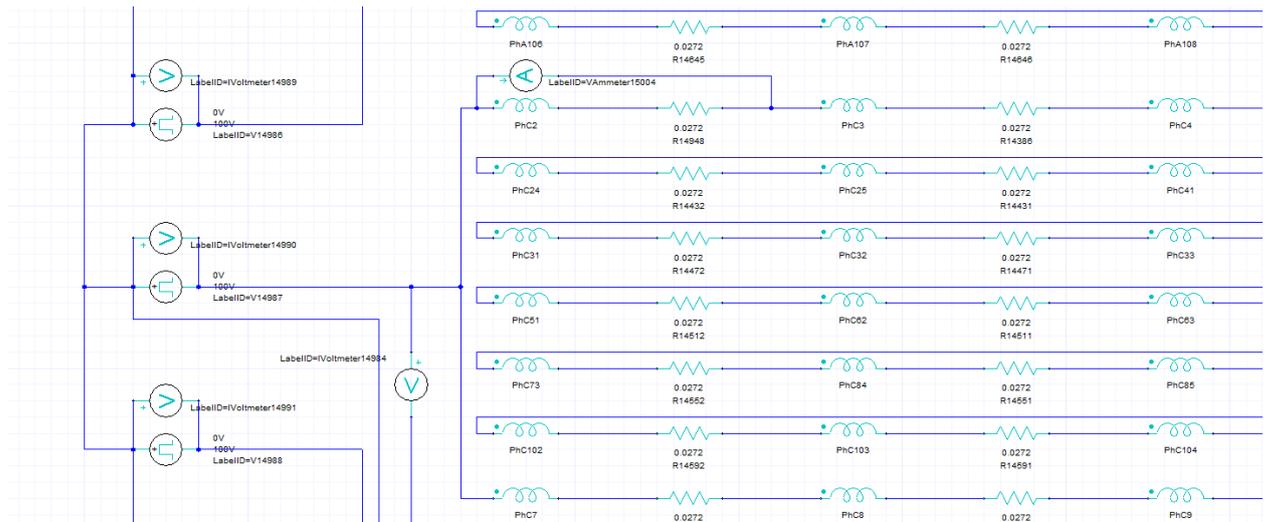


Рис. 2.5.5. Схема импульсного воздействия для диагностики определения поврежденной фазы.

Осциллограмма импульсного воздействия приведена на рис.2.5.6

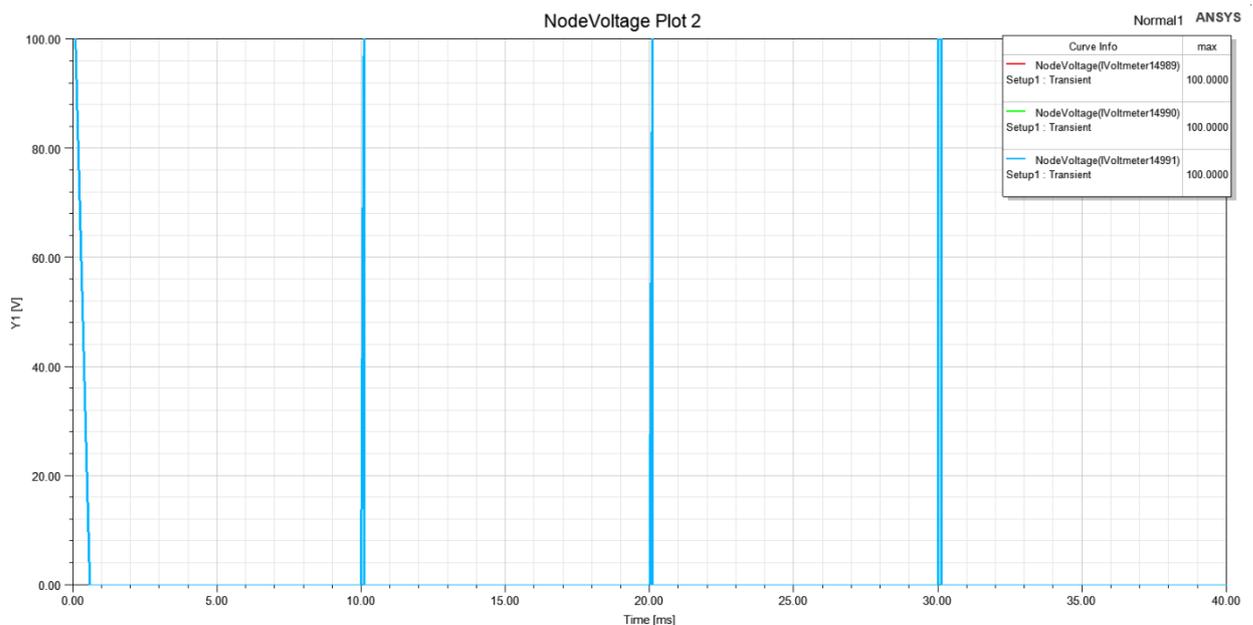
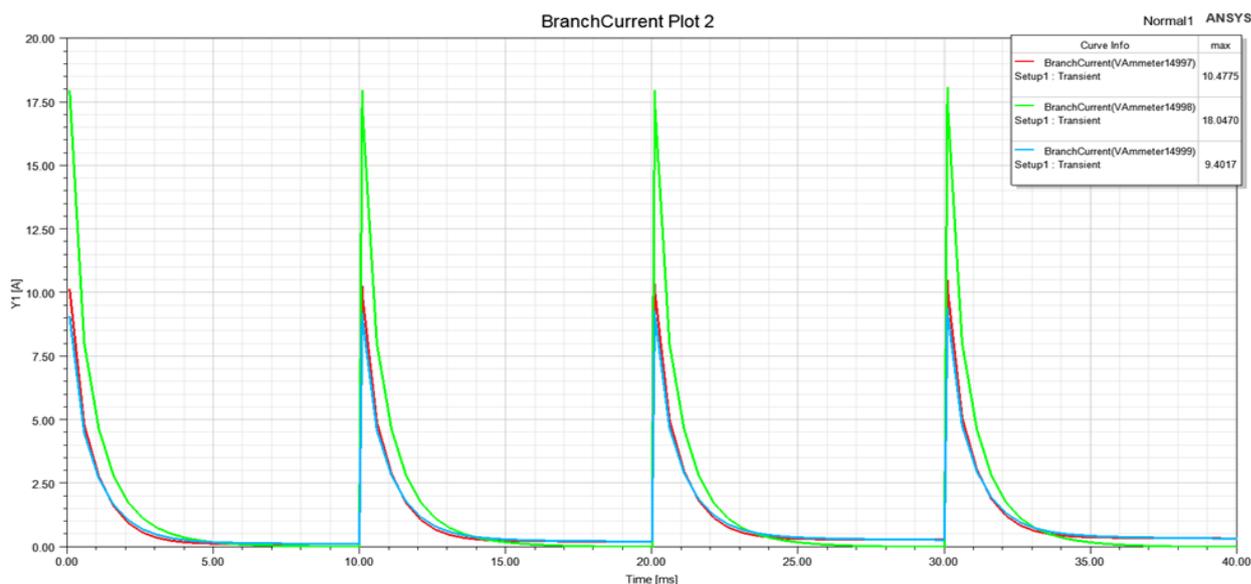


Рис. 2.5.6. Осциллограмма импульсного воздействия для определения поврежденной фазы с витковыми короткими замыканиями

На рис. 2.5.7. приведены 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 рис. 2.5.7. Осциллограммы тока переходного процесса в фазах после импульсного воздействия.

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.

Надо сказать, что на практике существуют приборы такой диагностики. Это приборы серии ЕЛ (см. приложение ПЗ). Принцип их работы основан на воздействии на обмотку импульсным напряжением с определенной скважностью и фиксации затухающего переходного процесса. Переходные процессы поврежденной фазы и нормальной фазы отличаются по форме. С помощью двухлучевого осциллографа визуально фиксируется это различие и делается заключение о наличии замыкания или его отсутствии. Для применения этого метода необходима эталонная фаза и проверяемая фаза. В качестве эталонной фазы может быть использована одна из фаз проверяемого

генератора или фаза заведомо исправного генератора. На практике это не всегда удобно. Приборы серии ЕЛ стоят достаточно дорого. Поскольку формируется диагностический цифровой комплекс для мини-ГЭС, то имеет прямой смысл создать цифровую систему диагностики поврежденной фазы.

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

2.6. Определение межфазного короткого замыкания

Следующим аварийным режимом, который достаточно часто возникает при эксплуатации, является короткое замыкание между обмотками двух фаз. Это повреждение можно определить при монтаже, когда концы фаз еще не объединены и есть возможность определить замыкание между фазами омметром. Но в процессе эксплуатации фазы соединяются в треугольник или звезду, и этот метод применить невозможно.

Проведем исследование межфазного короткого замыкания. Будем иметь в виду, что наше исследование отличается от классического межфазного замыкания выходных концов фазы. Рассмотрим режим генератора, близкий к холостому ходу, то есть нагрузку генератора примем достаточно большой, повреждение фаз возьмем примерно посередине фазных обмоток. Для отличия от хорошо изученного классического межфазного замыкания назовем этот тип повреждения межфазовым витковым замыканием.

На рис.2.6.1. Изображена испытательная схема при исследовании межфазного виткового короткого замыкания.



Рис.2.6.1. Испытательная схема при исследовании межфазного виткового короткого замыкания

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 (см. рис.2.6.2). Тем не менее, осциллограммы токов по фазам значительно отличаются друг от друга. Так зеленым цветом изображена нормальная фаза С без наличия коротких замыканий. Амплитуды замкнутых между собой фазы А и фазы С превосходят амплитуду фазы С соответственно в 3 и 2 раза.

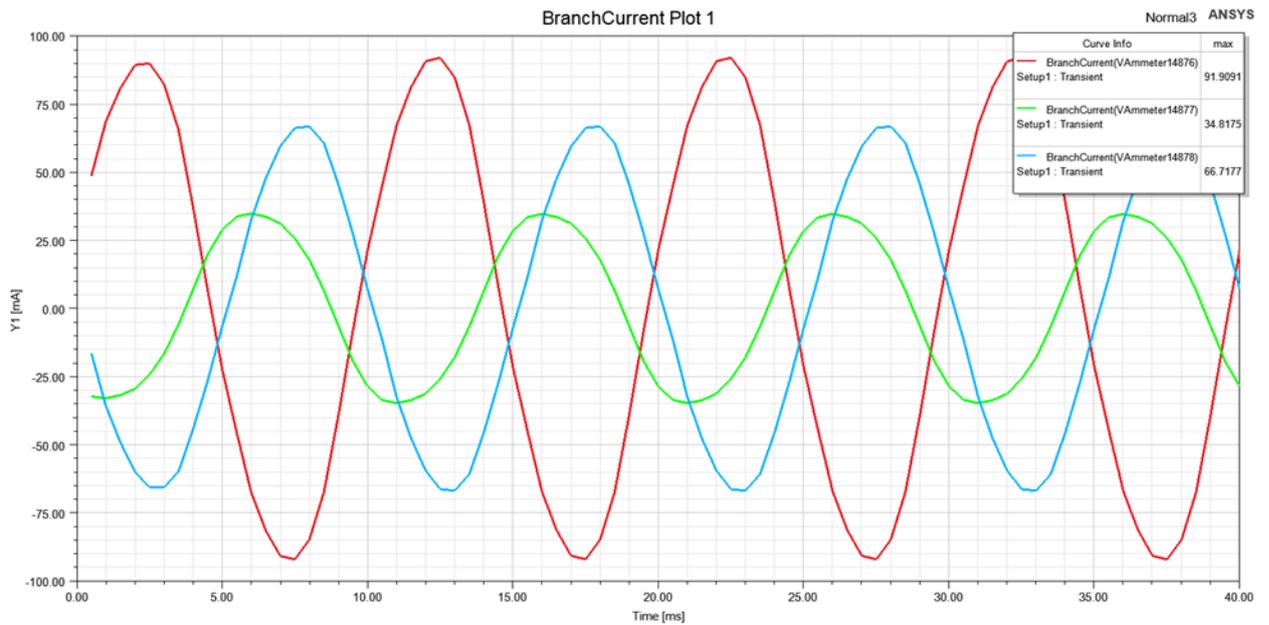


Рис.2.6.2. Осциллограммы фазных токов при межфазном витковом замыкании фазы А и фазы С.

На рисунке 2.6.3. изображены осциллограммы фазных напряжений при межфазном витковым замыкании фазы А и фазы С.

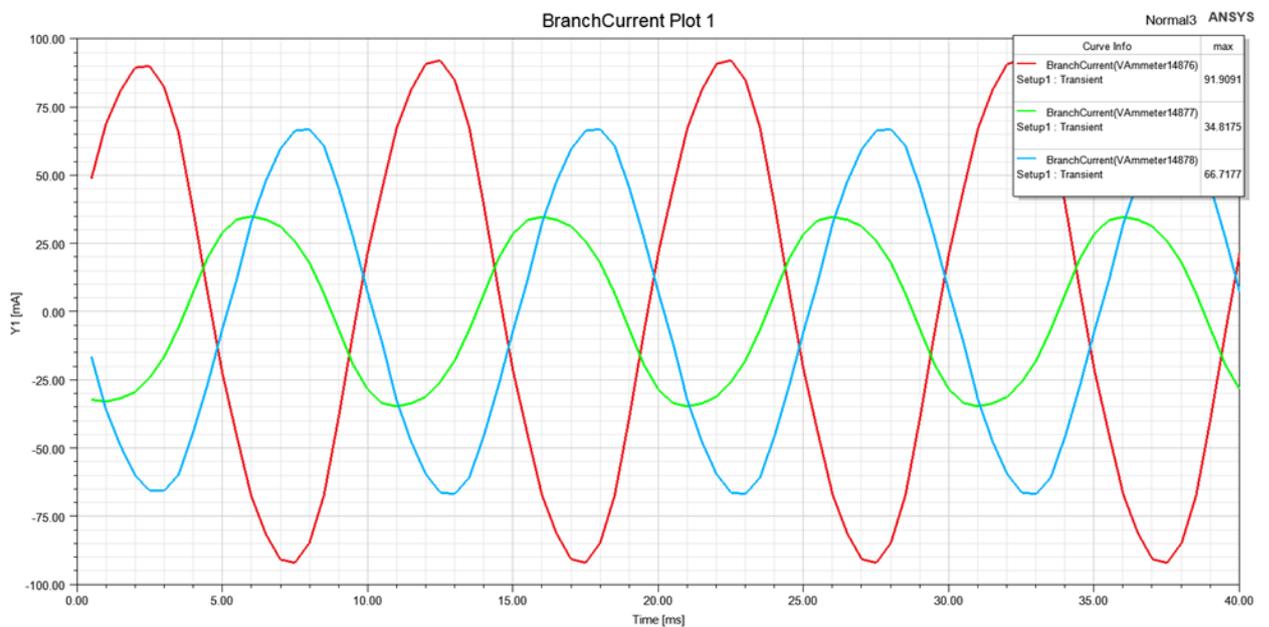


Рис.2.6.3. Осциллограммы фазных напряжений при межфазном замыкании фазы А и фазы С.

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.2.6.3).

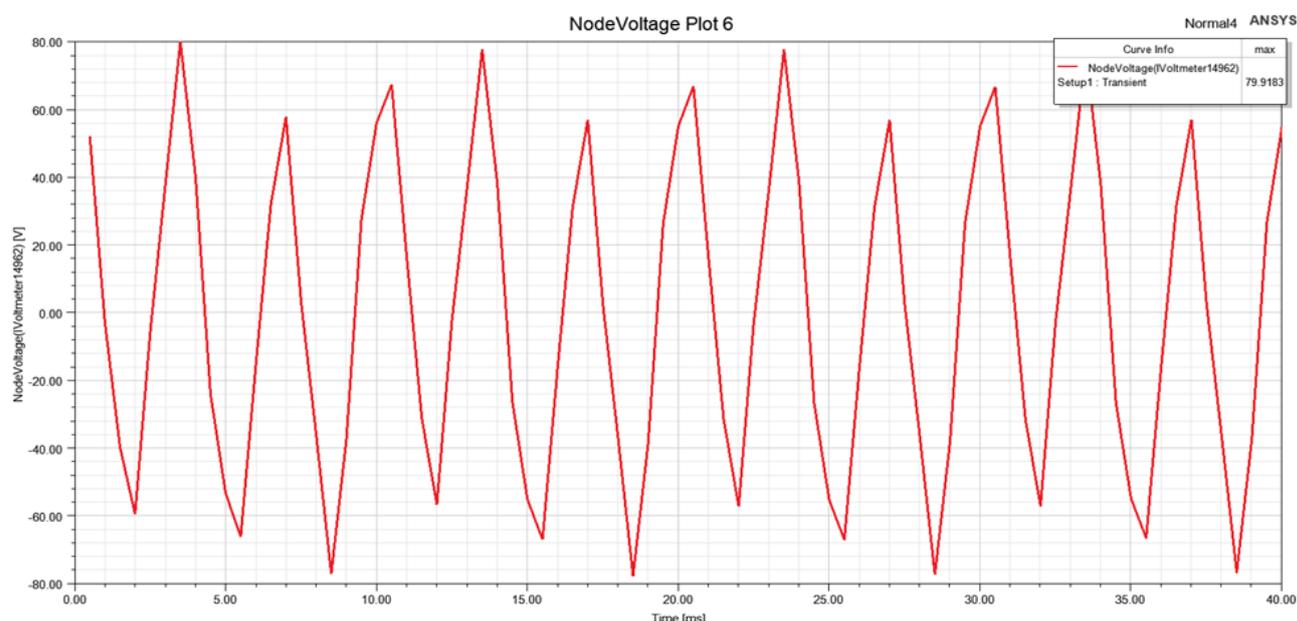


Рис.2.6.4. Осциллограмма фазного напряжения между двумя нейтралями в информационной обмотке при межфазном коротком замыкании.

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 нейтралями при соединении в треугольник);

- фазные токи силовой обмотки существенно отличаются друг от друга при симметричной нагрузке. Меньшее значение тока в фазе свидетельствует об отсутствии в ней повреждения. Большие значения тока по фазам свидетельствуют о наличии в них виткового межфазного замыкания;

- фазные напряжения силовой обмотки существенно отличаются друг от друга при симметричной нагрузке. Меньшее значение фазного напряжения свидетельствует об отсутствии в ней повреждения. Большие значения фазного напряжения свидетельствуют о наличии в них виткового межфазного замыкания.

Таким образом, и при этом типе повреждения информационная обмотка оказалась полезной, так как позволяет конкретизировать вид повреждения. Если в ней существуют отклонения по току (в случае соединения в треугольник) или по напряжению (в случае соединения в звезду), то это свидетельствует о наличии короткого замыкания в обмотке. Если фазные токи и фазные напряжения силовой обмотки равны и симметричны, то это случай викового замыкания в одной из фаз. Если фазные токи и напряжения силовой обмотки отличаются друг от друга при симметричной обмотке, то это индикатор межвиткового межфазового замыкания.

2.7. Анализ замыкания фазы на землю, двухфазного короткого замыкания и трехфазного короткого замыкания.

Следует отметить, что эти виды аварийного повреждения связаны не с диагностикой самого генератора, а с неправильной его эксплуатацией. Аварии подобного рода являются классикой. На эти ситуации настроена защитная аппаратура, которая, как показала практика их многолетней эксплуатации, работает достаточно надежно при возникновении аварии. Теория процессов, происходящих в генераторе, хорошо изучена и введена в учебный процесс подготовки инженеров электромехаников в виде практических лабораторных работ [34,46]. В данное исследование эти режимы введены для комплексного подхода ко всем возможным вариантам аварийных режимов короткого замыкания.

Короткое замыкание фазы и двух фаз являются предельными случаями несимметричной нагрузки (рис.2.7.1) [34].

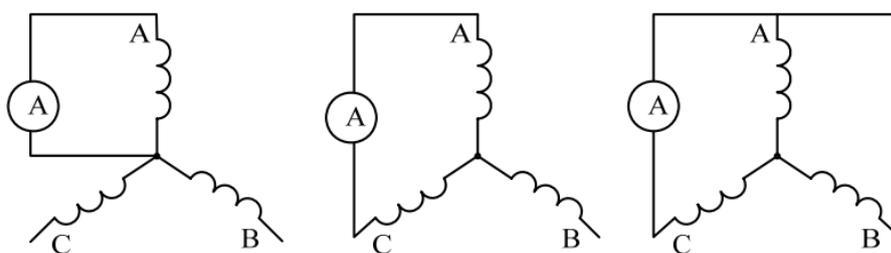


Рис. 2.7.2. Одно, двухфазное и трехфазное короткое замыкание.

Теория говорит о том, что в этих режимах большие якорные токи значительно увеличивают продольно-размагничивающую реакцию якоря. Результирующее поле при этом сильно ослабляется. Об этом свидетельствуют и классические характеристики короткого замыкания (рис.2.7.3) [46].

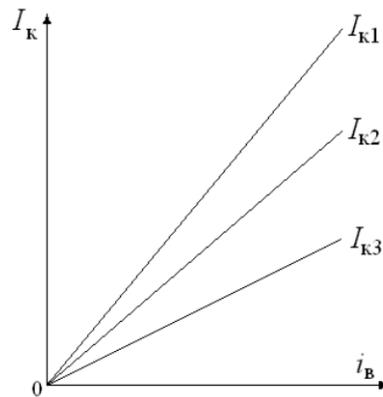


Рис.2.7.3. Классические характеристики однофазного, двухфазного и трехфазного коротких замыканий.

Характеристики подтверждают, что чем более сильное короткое замыкание, тем сильнее размагничивающая реакция якоря и ослабление общего поля (кривая трехфазного короткого замыкания идет ниже всех).

Не подвергая сомнению выводы классической теории проверим, как себя ведет информационная обмотка при этой несимметрии аварийного режима. На рис.2.7.4. изображено напряжение между нейтралями информационной обмотки при однофазном коротком замыкании.

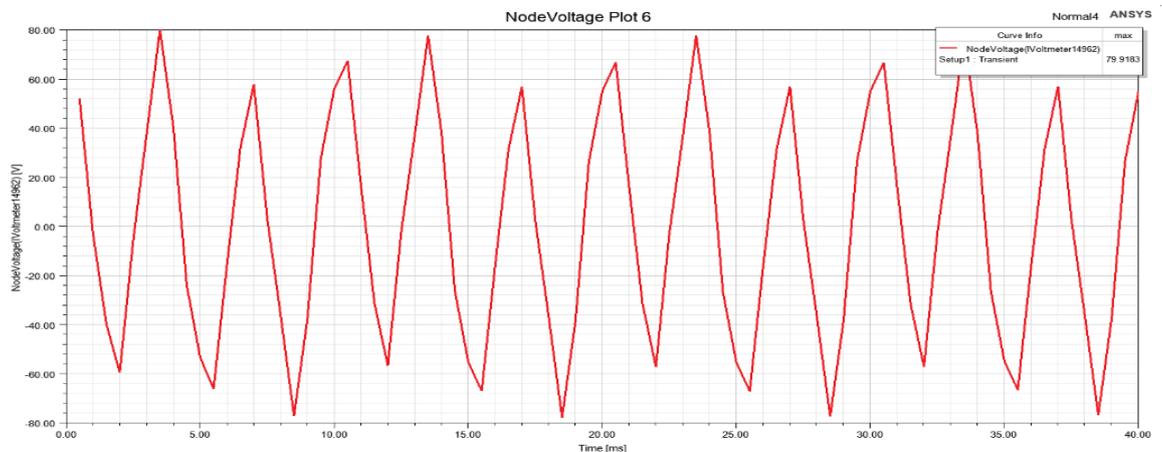


Рис.2.7.4. Напряжение между нейтралями информационной обмотки при однофазном коротком замыкании.

На рис.2.7.5. изображено напряжение между нейтралями информационной обмотки при двухфазном коротком замыкании.

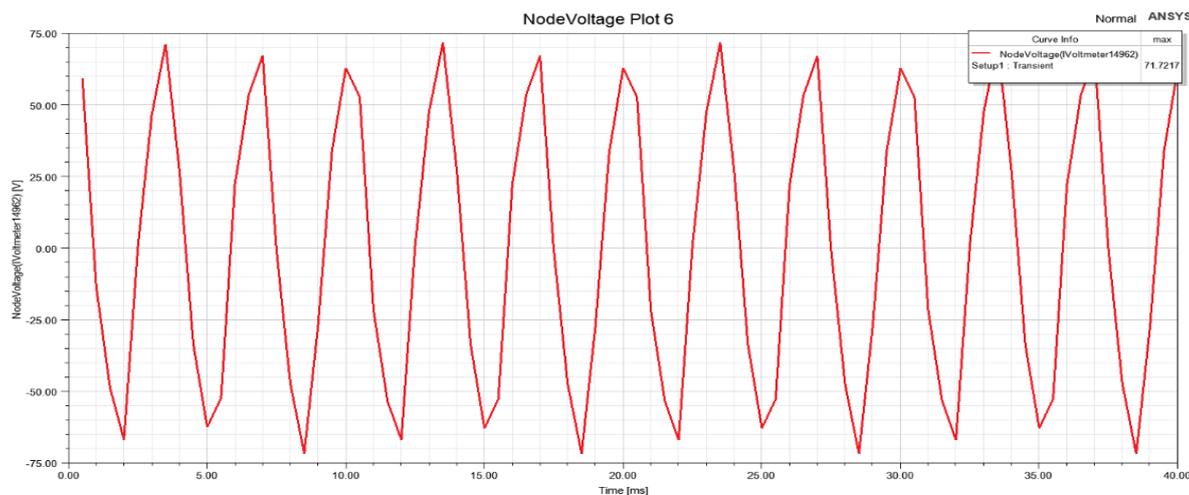


Рис.2.7.5. Напряжение между нейтралями информационной обмотки при двухфазном коротком замыкании.

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

Цифровое испытание показало, что при трехфазном коротком замыкании информационная обмотка на ситуацию не реагирует. Это можно объяснить двумя факторами:

- трехфазное короткое замыкание является симметричной аварийной нагрузкой, а информационная обмотка реагирует только на несимметрию;
- за счет сильной продольно размагничивающей реакции якоря поле очень сильно ослабляется и чувствительность информационной обмотки существенно ослабевает.

Тем не менее, и в этих режимах информационная обмотка, подтвердив классические выводы, показала свою полезность по индикации аварийных режимов.

2.8. Анализ безаварийных режимов работы генератора при несимметричной нагрузке.

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 должно реагировать только на магнитную несимметрию. Несимметричная нагрузка представляет собой электрическую несимметрию и на существенное ослабление магнитного поля влияния оказать не должна. Искажение магнитного поля информационной обмотка не улавливает. Для того, чтобы она стала индикатором необходимо усиление или ослабление поля.

Был проведен численный эксперимент со следующей нагрузкой: фаза А работала без нагрузки на холостом ходу, а для фазы В и фазы 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.

Следует отметить, что теоретически несимметричная нагрузка искажает поле и вносит в систему несимметрию, в том числе и магнитную, но в системе есть возможность настроить нулевой уравнительный ток и равенство потенциалов нейтралей за счет прецизионных подстроенных сопротивлений.

Выводы по главе 2

По представленному в главе анализу можно сделать следующие основные выводы:

1. Межвитковое замыкание обмотки фазы является трудно определимой аварийной ситуацией. Оно очень опасно, так как приводит к большим тепловым потерям в малой области короткого замыкания. Определить ее по внешним параметрам (фазным токам, фазным напряжениям) практически невозможно. Изменения находятся в пределах погрешности расчетов и измерений. Тем не менее межвитковое короткое замыкание приводит к изменению результирующего поля за счет токового воздействия

короткозамкнутых витков.

2. Для индикации аварийного режима межвиткового короткого замыкания введена отдельная информационная обмотка. Она полностью симметрична и представляет собой аналог силовой обмотки, находится в тех же пазах, но имеет отличное от силовой обмотки число витков. Фазы обмотки могут быть соединены в треугольник или звезду. При возникновении несимметричного режима межвиткового короткого замыкания в ней согласно теории симметричных составляющих несимметричной нагрузки протекают уравнивающие токи в случае соединения в треугольник и возникает разность потенциалов между нейтральными в случае соединения в звезду. Эти параметры могут быть индикатором аварийного состояния при межвитковых коротких замыканиях.

3. При витковом межфазном коротком замыкании так же возникает магнитная несимметрия, которая улавливается информационной обмоткой. При этом разность параметров силовой обмотки (фазных токов и фазных напряжений) позволяет распознать именно этот аварийный режим.

4. При однофазном, двухфазном и трехфазном коротких замыканиях должна сработать штатная защита при превышении допустимых токов, но при этом информационная обмотка является дополнительным индикатором аварии, показывая несимметрию в однофазном и двухфазном коротком замыкании.

5. При штатной несимметричной нагрузке информационная обмотка практически не реагирует на ситуацию и может быть настроена на нее за счет прецизионных построечных сопротивлений.

3. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО АНАЛИЗА МЕЖВИТКОВОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Вводные замечания.

Предыдущий анализ показал, что основной причиной аварийной ситуации коротких замыканий является тепловое разрушение изоляции якорной обмотки. Наиболее надежным, традиционным способом защиты от перегрева является встраивание термодатчиков в обмотку. Поскольку задачей исследования является построение и исследование цифрового аналога генератора, то было бы вполне логично использовать цифровую модель электромагнитного состояния для разработки цифровой модели теплового состояния. Современные САЕ системы позволяют решить такую связанную задачу.

3.1. Алгоритм построения тепловой модели генератора для аварийного режима 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. После составления и решения тепловой схемы определяются тепловые потоки, перепады температур и сами температуры нагретых частей. Точность метода зависит от подробности тепловой схемы замещения, погрешности расчета коэффициентов схода тепла, точности представления движения тепловых потоков. Метод может дать хорошие результаты и точности, но требует большого опыта работы с ним и корректности задания свойств материалов, скорости движения хладагента и характера схода тепла с охлаждающих поверхностей. С точки зрения математического аппарата он достаточно прост и представляет собой

совокупность линейных алгебраических уравнений, решение которых не требует больших компьютерных ресурсов.

В основу метода конечных элементов заложен другой принцип. Тепловое состояние элементарного объема тела с координатами x, y, z можно описать с помощью дифференциального уравнения Пуассона []:

$$\lambda_x \frac{d^2(T)}{dx^2} + \lambda_y \frac{d^2(T)}{dy^2} + \lambda_z \frac{d^2(T)}{dz^2} + \rho = 0, \quad 3.1.1$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – удельные теплопроводности по осям в элементарном объеме;

T – температура элементарного объема;

ρ – удельные потери элементарного объема.

Решение данного дифференциального уравнения для исследуемого объема V можно заменить минимизацией энергетического функционала []:

$$Q = \frac{1}{2} \int_V [(\frac{\lambda_x dT}{dx})^2 + (\frac{\lambda_y dT}{dy})^2 + (\frac{\lambda_z dT}{dz})^2 + \rho] dV + \int_S [(qT + \frac{1}{2}h(\Delta T)^2)] dS, \quad 3.1.2$$

где q – тепловой поток через поверхность схода тепла;

h – коэффициент теплообмена.

Для применения МКЭ исследуемая область разбивается на конечное число элементов и узлов в этих элементах. Для каждого элемента записывается минимизированное выражением функционала (3.1.2). В результате получается система локальных матриц для каждого элемента. Полученные локальные матрицы 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. Точность метода зависит от количества элементов, на которые разбивается расчетная область, точности задания свойств материалов, тепловых потерь и граничных условий. С точки зрения своей структуры, этот метод на порядок сложнее метода эквивалентных схем замещения, но он более точный и позволяет увидеть не интегральную среднюю температуру однородного тела, а подробно рассчитанное поле температур, включая локальные перегревы, что очень важно для решаемой нами задачи. Поэтому,

не смотря на сложность, выберем этот метод для теплового анализа короткого замыкания. Из множества CAE систем по решению тепловой задачи методом конечных элементов выберем программу Ansys Icerak. Это программное средство хорошо себя зарекомендовало, на него имеется лицензия университета и к нему есть свободный доступ на суперкомпьютер, который имеют сотрудники университета. Названные обстоятельства во многом и определили этот выбор.

Задача построения модели несколько упрощается в том, что существующие CAE системы достаточно отлажены и проверены на практике. Все сложности построения самой расчетной системы спрятаны внутрь алгоритма. Задача расчетчика заключается в том, чтобы создать трехмерную твердотельную модель, задать для нее потери в требуемых элементах и условия охлаждения. Процедуру деления на элементы, составления глобальной матрицы и ее решения система берет на себя.

Построение тепловой модели становится еще проще, если связать уже решенную электромагнитную задачу с тепловой задачей. В корректно построенной задаче электромагнитного расчета, которую реализует программа Ansys Electronics Desktop, уже построена твердотельная модель со своими материалами и определены тепловые потери в нагреваемых элементах. Необходимо передать эту информацию в программу Ansys Icerak и сделать соответствующие настройки.

Создадим тепловую модель по следующей схеме. Первоначально выполним расчет электромагнитного состояния генератора в программе Ansys Electronics Desktop. По результатам этого расчета более точно определим потери в стали и в меди обмотки якоря. Далее передадим данные в программную оболочку Workbench. Она является связующим звеном с программой теплового расчета. На следующем этапе передадим данные непосредственно в программу расчета теплового поля Icerack.

Таким образом, мы решаем связанные магнитодинамическую и термодинамическую задачи.

Данный алгоритм представлен на рис. 3.1.1.



Рисунок 3.1.1. Алгоритм создания тепловой модели

В программе Icespak 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 осуществляется итерационным способом, в процессе которого уточняется сетка деления на конечные элементы и определяется сходимость вычислительного процесса.

В результате расчета определяется температура в каждом элементе, на которые разбита модель генератора. Таким образом мы можем рассчитать поле температур в отличие от интегральной температуры, которая определяется методом тепловых схем замещения.

3.2. Результаты моделирования генератора для режима межвиткового замыкания

Как было отмечено, создание тепловой модели начинается с моделирования электромагнитных процессов в программной среде Ansys Electronics Desktop. На рис. 3.2.1 показана трехмерная твердотельная модель, сделанная в этой программе.

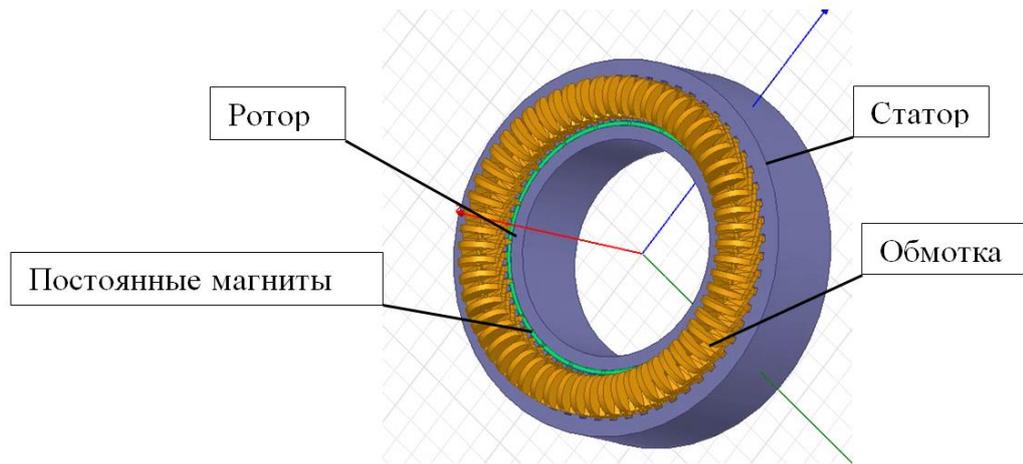


Рис.3.2.1. Трехмерная твердотельная модель генератора, созданная в программе Ansys Electronics Desktop для электромагнитных расчетов.

На рис. 3.2.2. показаны фрагменты результатов электромагнитного расчета в программе Ansys Electronics Desktop.

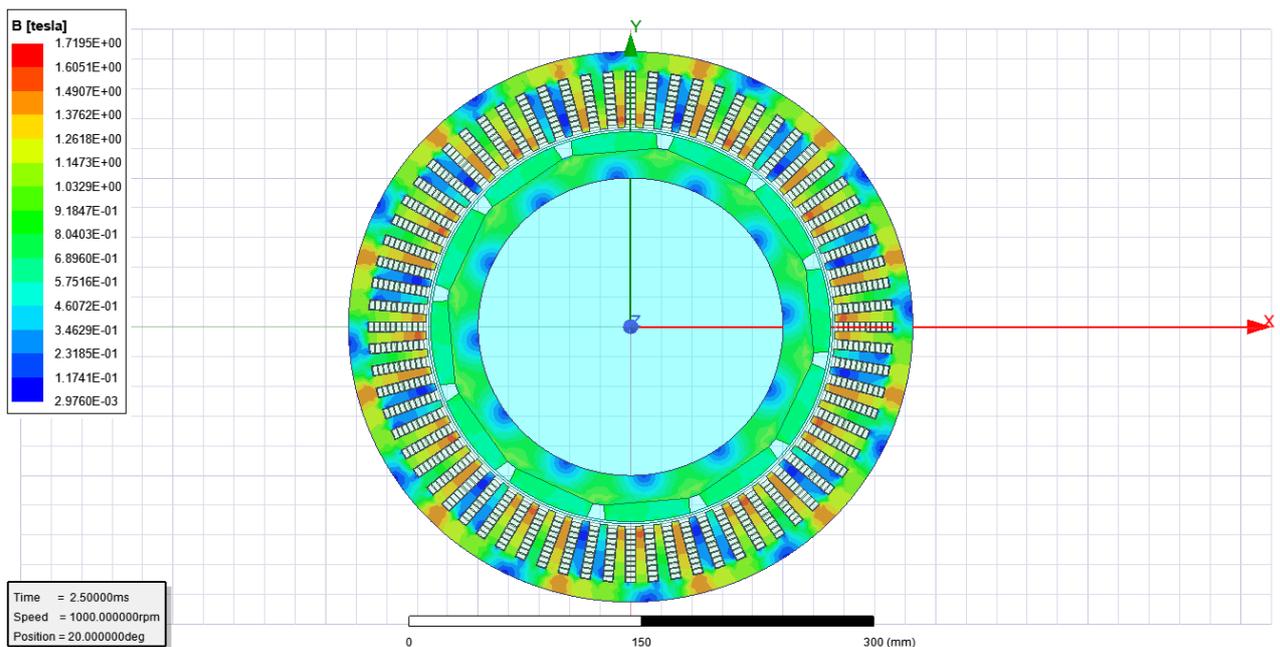


Рис. 3.2.2. Результаты электромагнитного расчета в программе Ansys Electronics Desktop

В программе Ansys Electronics Desktop определяются потери в стали и потери в меди якорной обмотки каждого элемента. Далее эта информация передается в программную связующую оболочку Ansys Workbench. Из программы Ansys Workbench все данные по геометрии и потерям по каждому элементу передаются в программу Ansys Iserac (рис.3.2.3).

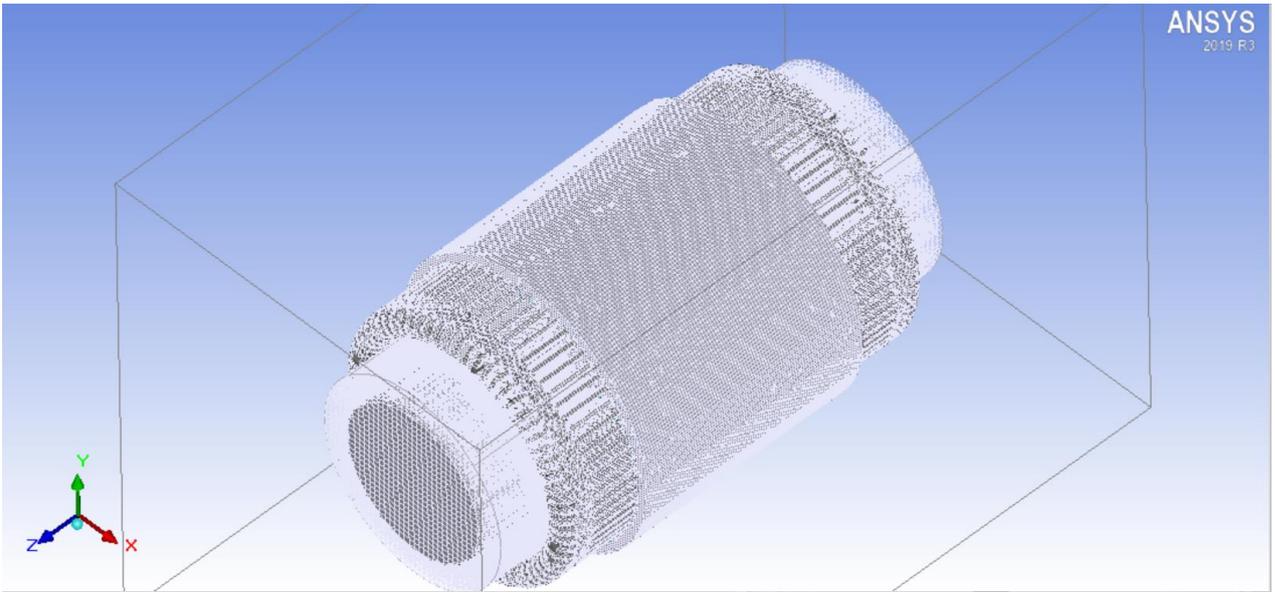


Рис.3.2.3. Расчетная тепловая модель с кабинетом для программы Ansys Iсерак

В программе Ansys Iсерак определяется кабинет (расчетная область, которая включает в себя сам генератор и окружающую его воздушную оболочку), задаются свойства материалов, из которых состоит генератор. Материалы задаются не с точки зрения электромагнитных расчетов, а с точки зрения тепловых расчетов.

Следующим этапом является деление расчетной области на сетку конечных элементов. Эту процедуру программа делает сама автоматически. Результаты создания цифровой тепловой модели на этом шаге показаны на рис.3.2.4.

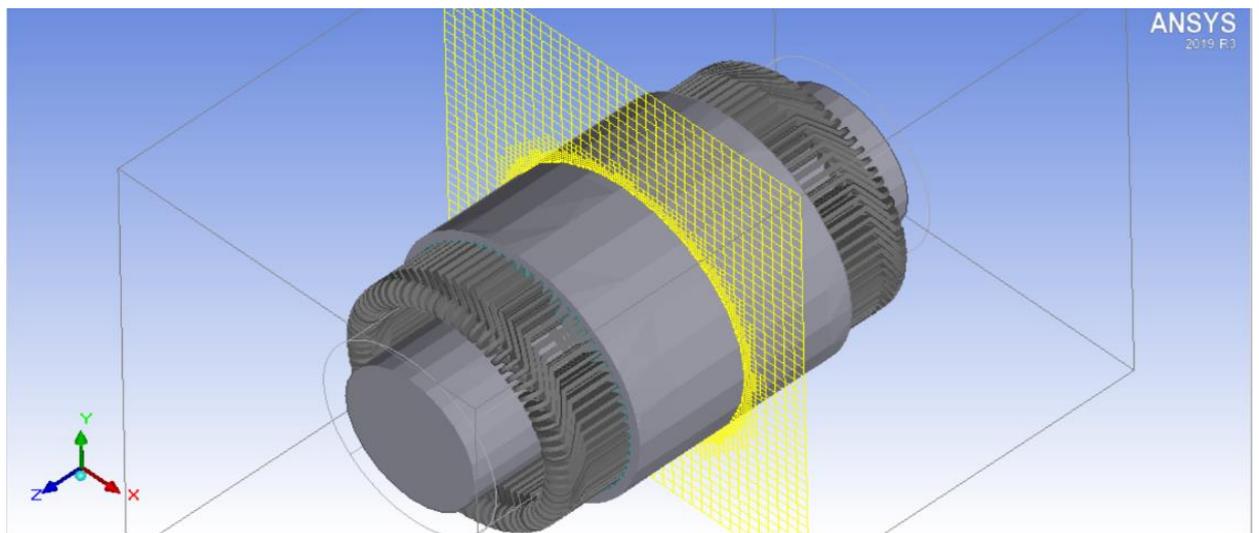


Рис. 3.2.4. Деление расчетной модели на сетку конечных элементов (для наглядности показано только одно сечение)

После задания граничных условий схода тепла со стенок кабинета происходит переход к следующему этапу создания модели. Решается система уравнений для каждого элемента и система уравнений глобальной матрицы всех элементов. Этот процесс итерационный, он заканчивается положительным решением только в случае достижения минимальной невязки между решениями. Процесс сходимости процесса к достоверному решению показан на рис.3.2.5.

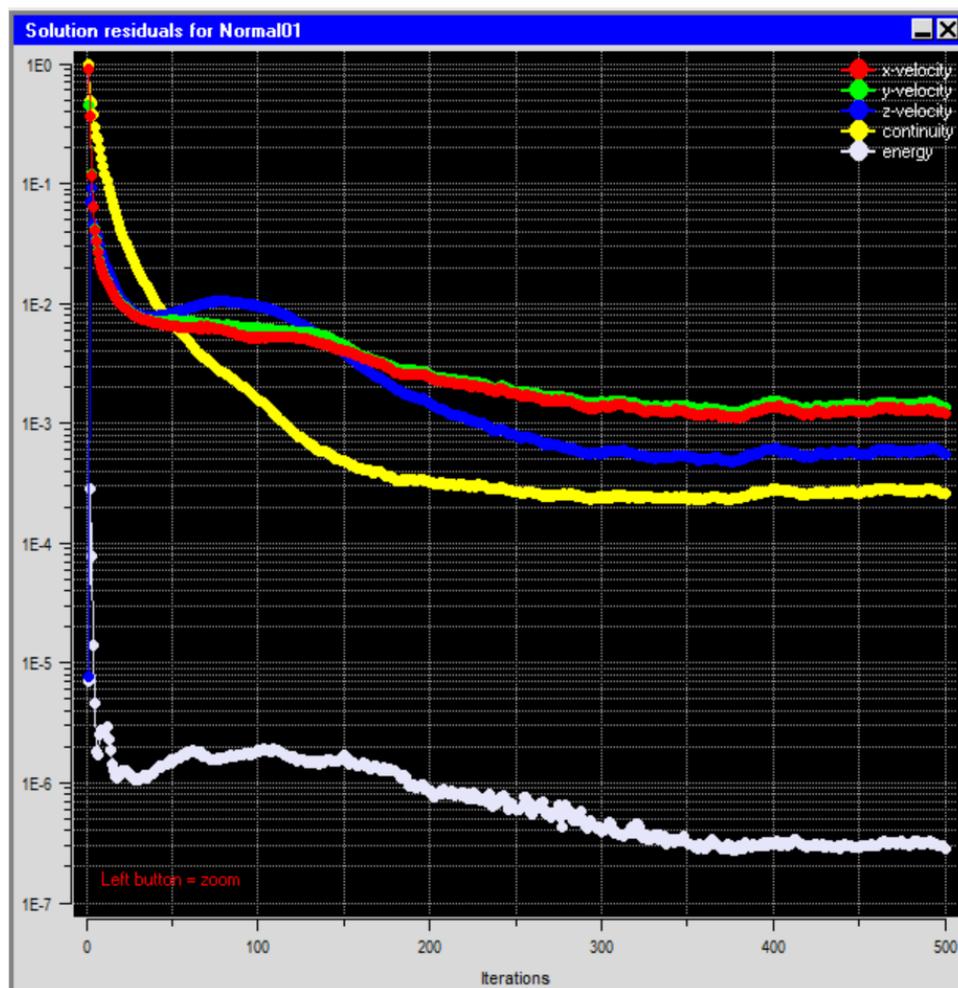


Рис.3.2.5. График сходимости итерационного процесса минимизации невязки.

В результате решения поставленной задачи получаем значение температуры в узлах расчетной сетки и поле температур в объеме генератора рис.3.2.6.

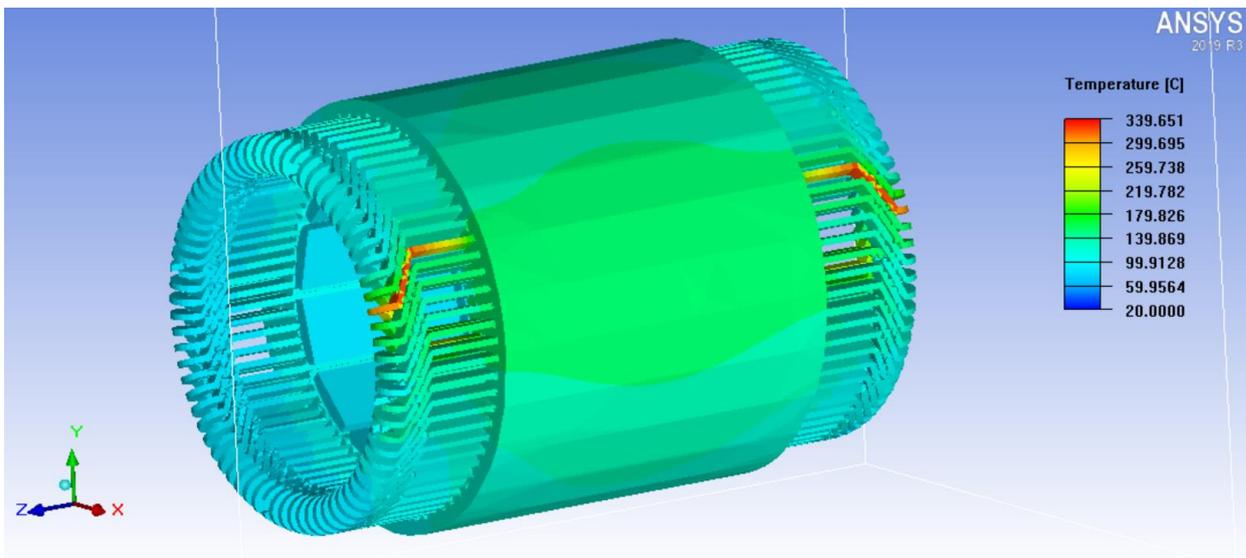


Рис.3.2.6. Поле температур в объеме генератора для аварийного режима межвиткового короткого замыкания

В данном разделе описано создание цифровой расчетной модели для режима межвиткового короткого замыкания 5-ти витков. По данной технологии строятся цифровые модели короткого замыкания аварийных режимов других типов.

3.3. Анализ результатов моделирования аварийного режима межвиткового короткого замыкания на цифровой модели

Созданная цифровая модель аварийного режима короткого замыкания позволяет получить информацию о перегревах во всем объеме и локальных перегревах в месте виткового короткого замыкания.

На рисунке 3.3.1. показано поле температур в объеме железа пакета статора. Следует отметить, что температура железа якоря порядка 210 градусов не критична для этого элемента.

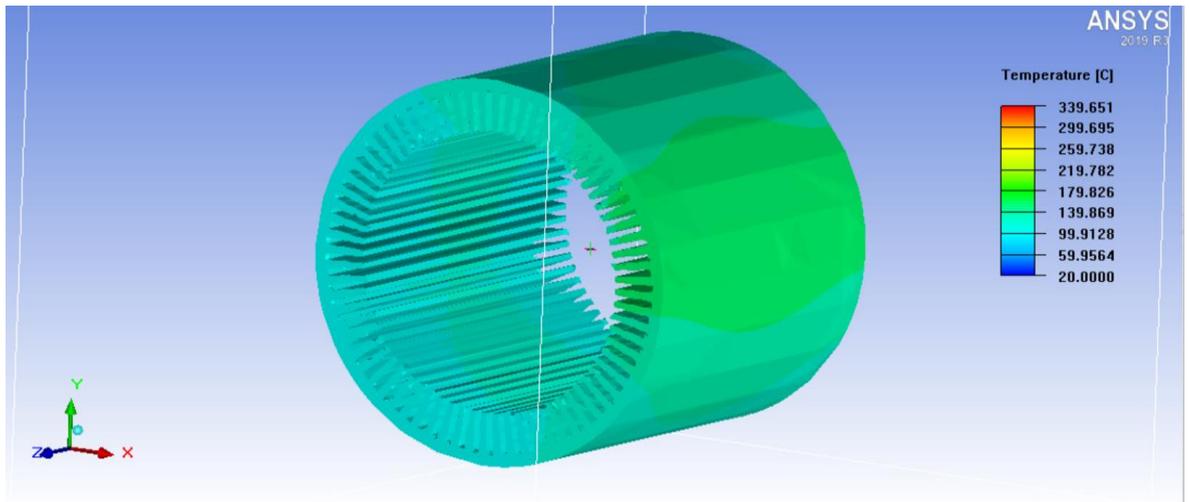


Рис.3.3.1. Поле температур в объеме железа статора

На рис. 3.3.2. показано распределение температуры в якорной обмотке.

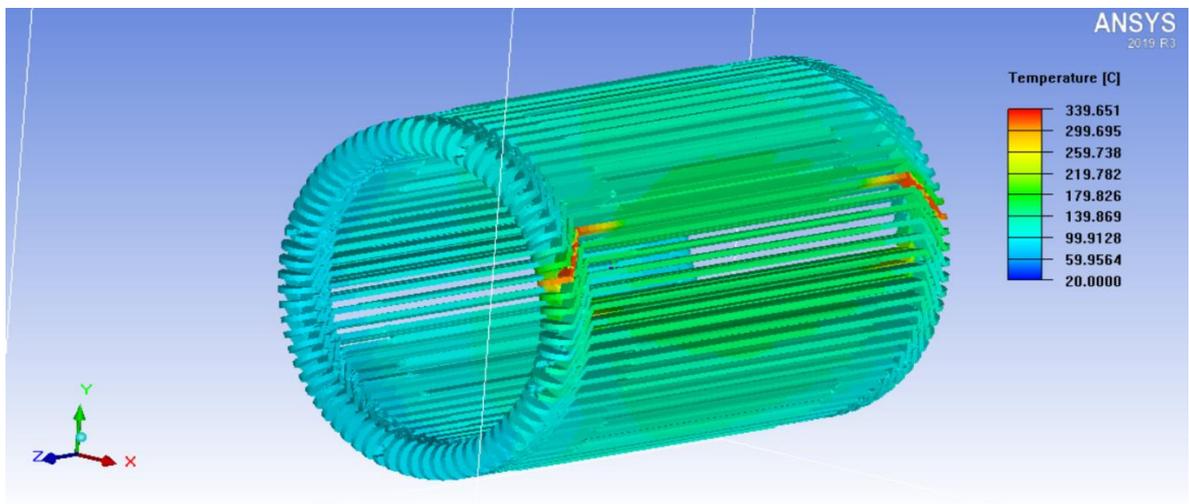


Рис. 3.3.2. Распределение температуры в якорной обмотке

Поле температур якорной обмотки показывает, что средняя температура в нормальных витках при номинальной нагрузке составляет порядка 140 C° , что вполне приемлемо для класса изоляции F (155 C°). При этом температура активной части короткозамкнутых витков составляет 220 C° , а температура этих же витков в лобовых частях составляет около 335 C° . Эти температурные режимы не приемлемы для существующих классов изоляции.

На рис.3.3.3. показана температура постоянных магнитов в месте виткового короткого замыкания.

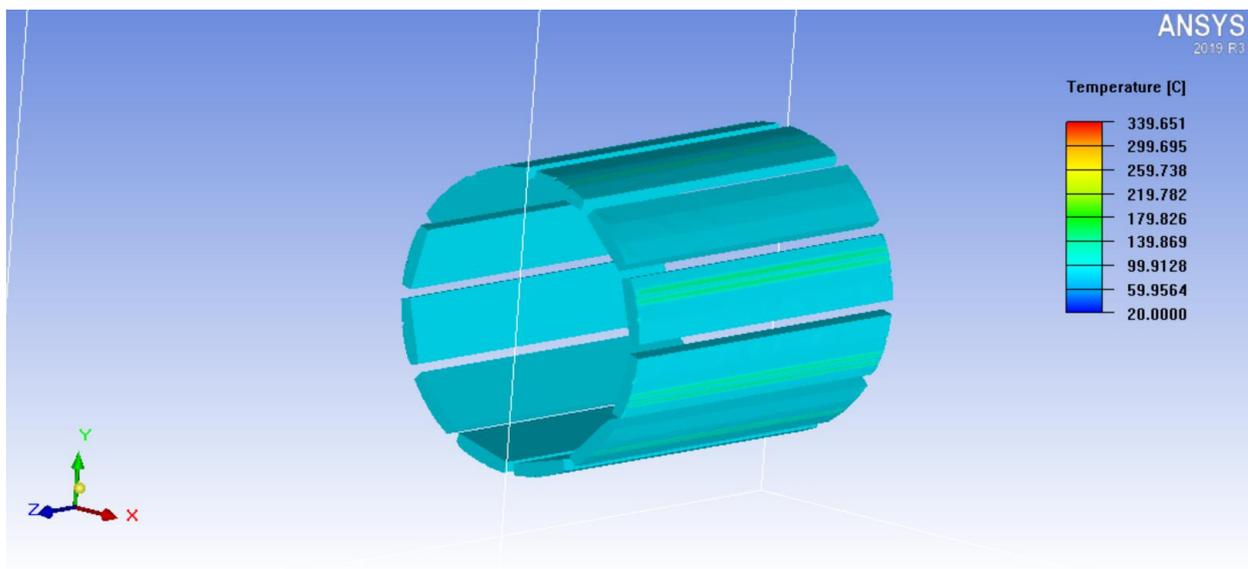


Рис.3.3.3. Температура постоянных магнитов в месте виткового короткого замыкания.

Локальная температура постоянных магнитов в месте виткового короткого замыкания составляет 210 С°. Следует отметить, что рабочая температура постоянных магнитов из материала неодим-железо-бор составляет в среднем около 150 С°. Это означает, что в аварийном режиме межвиткового короткого замыкания, помимо разрушения изоляции обмотки, существует опасность размагничивания постоянных магнитов от температурного воздействия. Эту неисправность достаточно сложно обнаружить и ликвидировать заменой.

Рис.3.3.1-3.3.3 показывают установившуюся температуру в режиме межвиткового короткого замыкания. На самом деле созданная модель термодинамическая и она может показать динамику нагрева от холодного состояния до установившейся температуры за выбранный интервал времени. Для этого необходимо установить датчики температуры в соответствующих частях генератора. Установим такие датчики в корпусе статора в месте повреждения, в обмотке статора, находящейся в пазу и в лобовых частях обмотки статора.

На рис. 3.3.4. показана динамика нагрева корпуса статора в месте межвиткового замыкания.

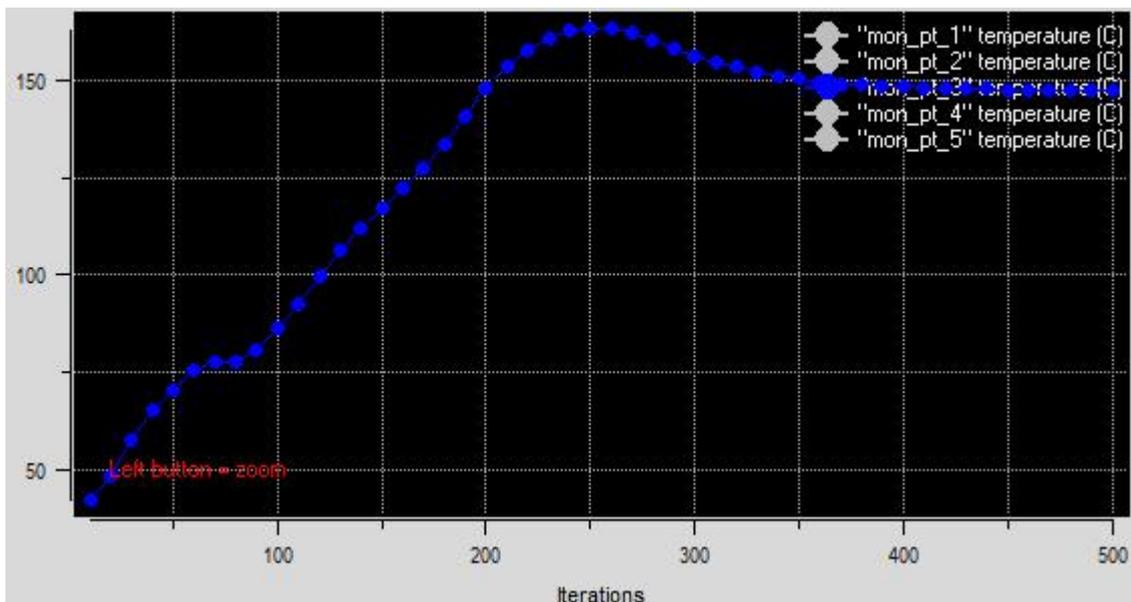


Рис. 3.3.4. Динамика нагрева корпуса статора в месте межвиткового замыкания.

Анализ кривой показывает, что для корпуса нарастание и установившаяся температура не критична.

На рис. 3.3.5. показана динамика нарастания температуры в обмотке якоря, находящейся в железе статора при межвитковом замыкании. Для сравнения показана кривая нарастания температуры для той же части обмотки, но без витковых замыканий. (рис.3..3.6.)

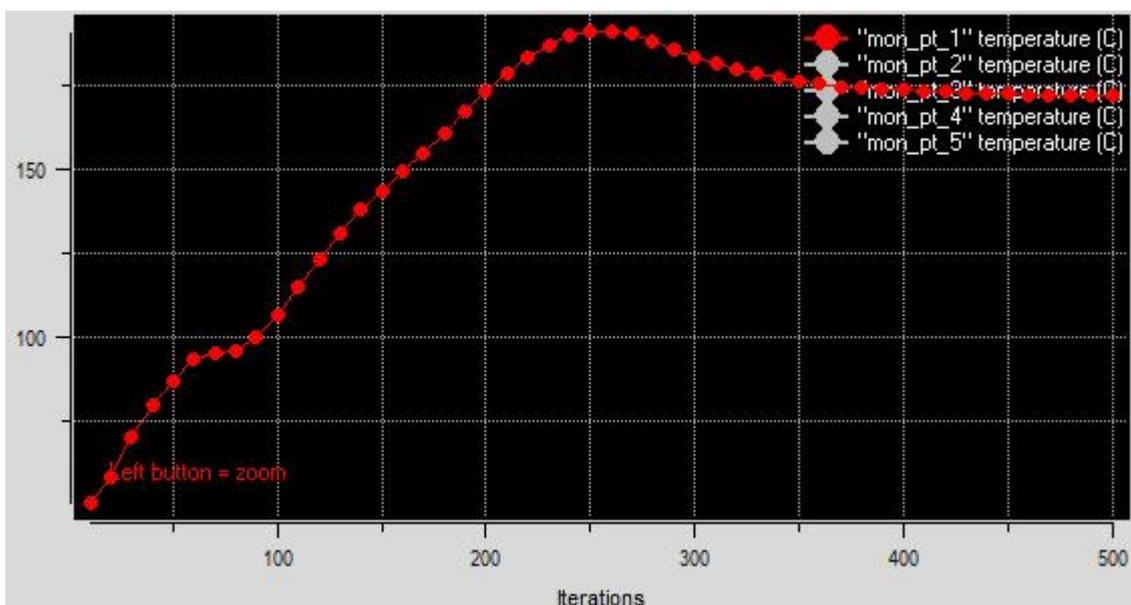


Рис. 3.3.5. Динамика нарастания температуры в поврежденном месте якорной обмотки, находящейся в пазах пакета

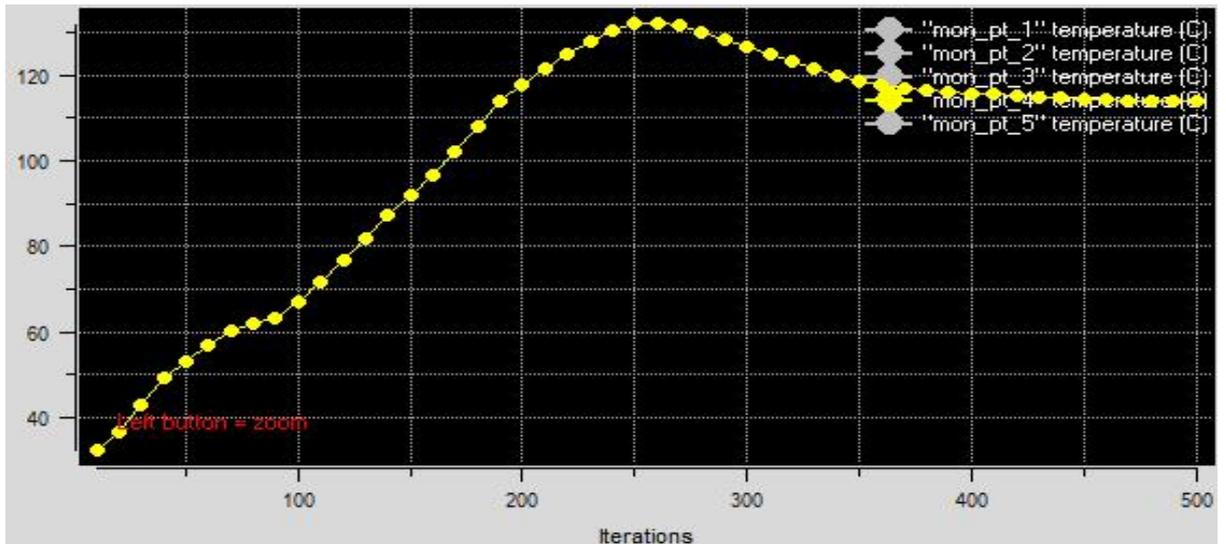


Рис. 3.3.6. Динамика нарастания температуры в неповрежденном месте якорной обмотки, находящейся в пазах пакета

Кривая рисунка 3.3.5. для поврежденной части показывает превышение температурного предела для класса изоляции F. Причем, это превышение достигается достаточно быстро за 250 сек.

На рисунке 3.3.7. показана динамика нарастания температуры в лобовых частях якорной обмотки в поврежденных витках. На рисунке 3.3.8. показана та же зависимость для лобовых частей нормальной обмотки без повреждения.

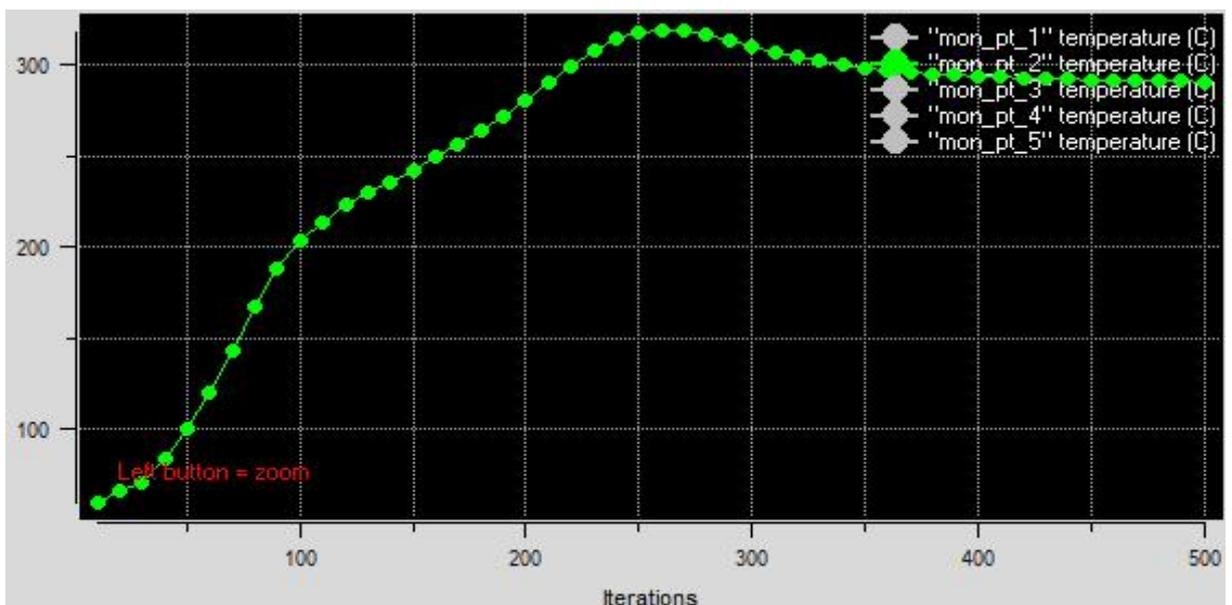


Рис. 3.3.7. Динамика нарастания температуры в лобовых частях якорной обмотки в поврежденных витках.

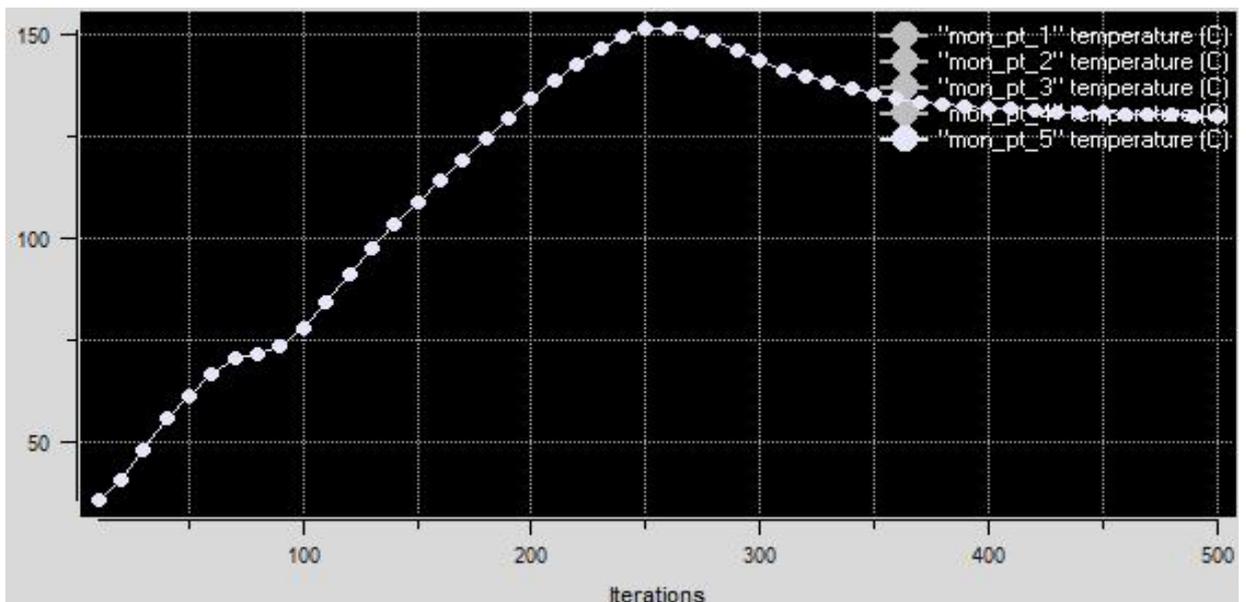


Рис. 3.3.8. Динамика нарастания температуры в лобовых частях якорной обмотки в неповрежденных витках

Анализ кривых показывает, что в лобовых частях поврежденной обмотки через 250 сек температура достигнет разрушительной для изоляции величины 320 С°.

Выводы по главе 3

В главе представлена разработка тепловой модели генератора для режима межвиткового короткого замыкания. Для разработки модели был выбран метод конечных элементов, реализованный в программе Ansys Iсерак. Основные выводы по проведенному моделированию можно сформулировать следующим образом:

1. Разработка тепловой модели была выполнена при решении связанной задачи по следующей технологической цепочке: создание электромагнитной модели в программе Ansys Electronics Desktop, программная оболочка Ansys Workbench, разработка цифровой тепловой модели в программе Ansys Iсерак. При этом на первых этапах создается трехмерная твердотельная модель и определяются тепловые потери, на последующих этапах на этой базе создается цифровая тепловая модель и определяется поле температур с учетом локальных перегревов. Данная методика вполне приемлема для моделирования других аварийных режимов короткого замыкания.

2. Разработанная тепловая модель показала недопустимый разрушающий локальный перегрев в поврежденной обмотке, находящейся в пазах железа якоря и в лобовых частях. Недопустимый перегрев был определен в постоянных магнитах в месте повреждения обмотки. Температурный нагрев корпуса находился в допустимых пределах.

3. Расчет динамики нарастания температуры показал, что при аварийных режимах она достигает критических недопустимых пределов достаточно быстро в течение 250 сек.

4. Разработанная цифровая тепловая модель вполне адекватно соотносится с практикой измерения температурных режимов электрических машин данного типа, на основании чего ее можно считать достоверной.

4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОПЫТНОМ ОБРАЗЦЕ ГЕНЕРАТОРА

Вводные замечания

Вся система диагностики аварийных режимов короткого замыкания строится на гипотезе, что введение информационной обмотки, фиксирующей магнитную несимметрию генератора, позволит реально диагностировать эти аварийные состояния. Эта концепция теоретически обоснована применением известного метода симметричных составляющих для несимметричных режимов работы синхронных генераторов. Для практического применения этого решения существуют технические риски. Предложенная методика может быть неработоспособна из-за того, что в концепции не были учтены неизвестные факторы, которые могли повлиять на эффект магнитной несимметрии при авариях и сделать метод неработоспособным. Такими факторами может быть неучтенное для принципа суперпозиции насыщение, наличие высших гармоник в кривой поля и другие факторы. Для проверки реальности применения данного метода для диагностики аварийных ситуаций было принято решение экспериментально проверить эту концепцию.

4.1. Разработка и изготовление измерительной системы для автоматизации испытаний

На первом этапе исследования была разработана и изготовлена автоматизированная 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.

Для минимизации трудозатрат при разработке измерительной системы было решено максимально использовать готовые электронные модули.

В качестве ядра системы была выбрана отладочная плата Nucleo-F103RC производства компании ST Microelectronics. Эта отладочная плата содержит высокопроизводительный микроконтроллер STM32F103RC и отладчик/программатор ST-Link, который полезен при разработке программного обеспечения для указанного микроконтроллера. Основные характеристики микроконтроллера:

- разрядность 32 бита;
- тактовая частота 72 МГц;
- оперативная память 20 КБ;
- постоянная память 128 КБ;
- 16 каналов АЦП разрядностью 12 бит;
- наличие модулей USART для организации связи с персональным компьютером.

Внешний вид отладочной платы Nucleo-F103RC показан на рисунке 4.1.1.

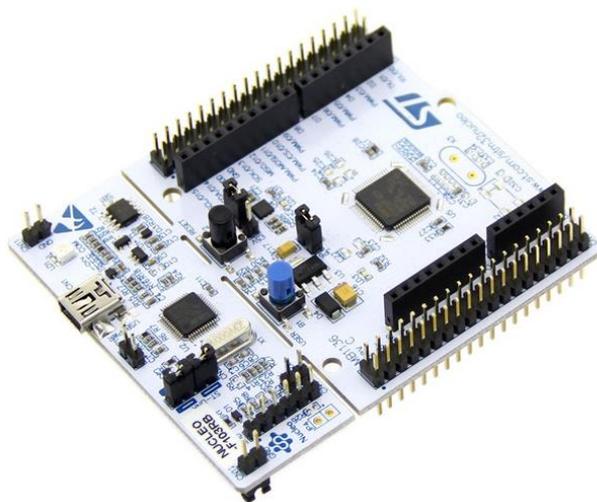


Рис. 4.4.1. Отладочная плата Nucleo-F103RC.

Дополнительно отладочная плата Nucleo-F103RC содержит отладчик ST-Link, частью которого является универсальный мост USB/UART с реализацией виртуального последовательного порта, что должно существенно упростить разработку программного обеспечения для персонального компьютера в операционной системе MS Windows.

В связи с тем, что микроконтроллер STM32F103RC содержит АЦП, у которого диапазон входного напряжения составляет от 0 до 3,3 В, все измеряемые сигналы необходимо привести к этому диапазону. Для этого потребовалось разработать и изготовить дочернюю плату с необходимыми электронными компонентами. Дочерняя плата подключается к отладочной плате Nucleo-F103RC посредством двух штыревых разъемов. В связи с тем, что в процессе испытаний необходимо измерять не только напряжения, но и токи, было принято решение использовать универсальные токоизмерительные модули на основе датчиков холла ACS712 производства компании Allegro. Общий вид указанного модуля представлен на рисунке 4.1.2.



Рис. 4.1.2. Токоизмерительный модуль с датчиком тока ACS712.

Разработка дочерней платы для автоматизированной измерительной системы выполнялась в системе автоматизированного проектирования Altium Designer, общий вид которой представлен на рисунке 4.1.3. Основными частями этой системы являются схемный редактор и редактор печатных плат. В схемном редакторе формируется схема электрическая принципиальная на проектируемое изделие. Такая схема содержит все электронные компоненты, которые должны быть расположены на печатной плате, а также все электрические связи между этими компонентами. Более подробно электрическая схема дочерней платы представлена на рисунках 4.1.4 – 4.1.7.

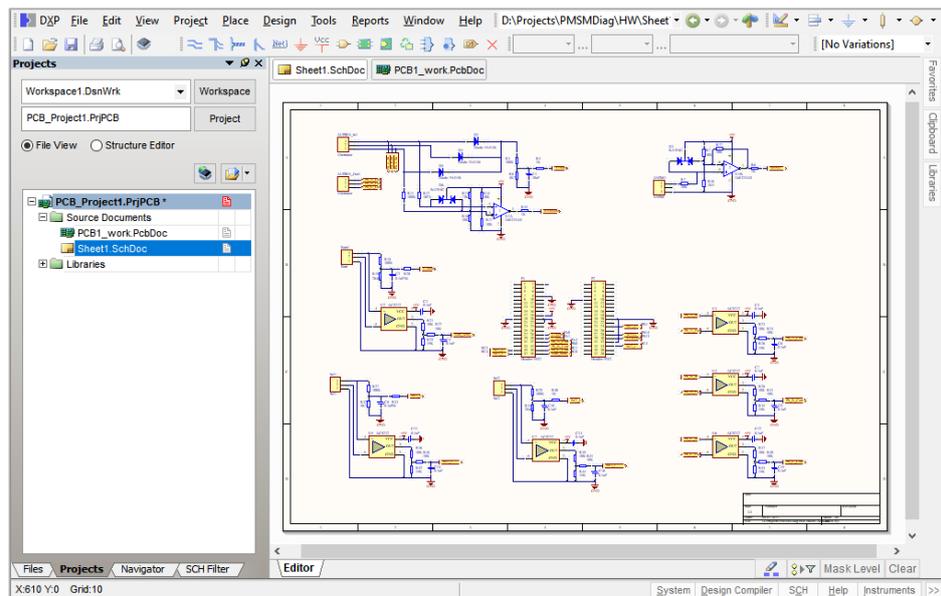


Рис. 4.1.3. Система автоматизированного проектирования Altium Designer.

На рисунке 4.1.4 показаны условные графические обозначения электрических разъемов, предназначенных для подключения к плате Nucleo-F103RC. На схеме показаны электрические соединения, которые подходят к соответствующим выводам этих разъемов и обозначены сигналы, которые поступают по этим линиям. В микроконтроллер передаются фазные токи и напряжения якорной обмотки, а также токи информационной обмотки, соединенной в треугольник. Отдельным сигналом на вход микроконтроллера подается информация о частоте вращения ротора электрической машины, определяемая по частоте переменного тока в якорных обмотках.

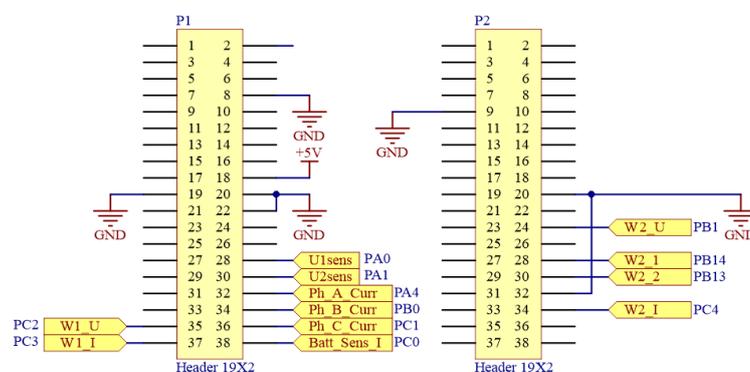


Рис. 4.1.4. Электрические соединения штыревых разъемов дочерней платы для подключения к плате Nucleo-F103RC.

Рисунок 4.1.5 показывает электрические компоненты, служащие для приведения диапазона измеряемого напряжения якорной обмотки генератора к величине, допустимой входными цепями аналогово-цифрового преобразователя микроконтроллера STM32F103RC (от 0 до 3,3 В). Дополнительно на резисторах R11 – R17 и операционном усилителе U1A организована схема контроля частоты вращения ротора электрической машины по частоте тока в фазных обмотках. Для этого напряжения от двух обмоток подаются на устройство сравнения, которое формирует сигнал высокого уровня, если напряжение в первой обмотке больше, чем во второй. При превышении напряжения во второй обмотке устройство сравнения переключает выход в низкий уровень, чем и формирует выходной сигнал с частотой, соответствующей частоте тока якорной обмотки.

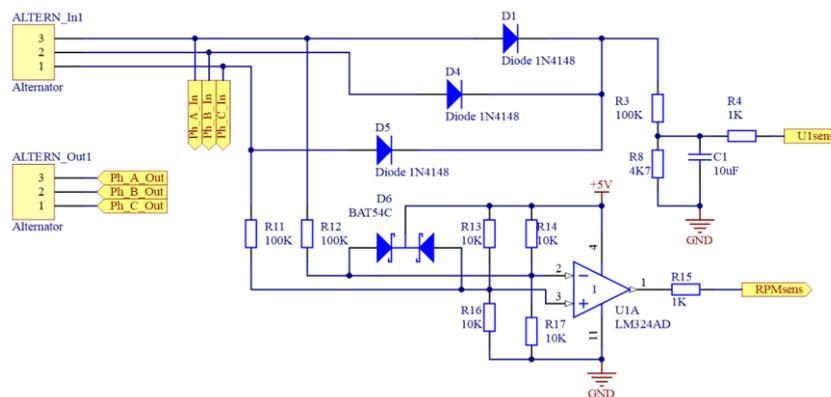


Рис. 4.1.5. Электрические соединения винтовых разъемов дочерней платы для подключения к якорным обмоткам генератора

На рисунке 4.1.6 показана часть электрической схемы, предназначенная для согласования уровней измеряемых напряжений якорной обмотки с диапазоном входных напряжения аналогово-цифрового преобразователя микроконтроллера. Также на этом рисунке показаны модуль токового датчика и резистивный делитель, предназначенный для пропорционального уменьшения напряжения, поступающего от датчика тока ACS712 в аналогово-цифровой преобразователь микроконтроллера. Это обусловлено тем, что

диапазон выходных напряжений датчика тока ACS712 составляет от 0 до 5 В, а диапазон входных напряжений АЦП – от 0 до 3,3 В.

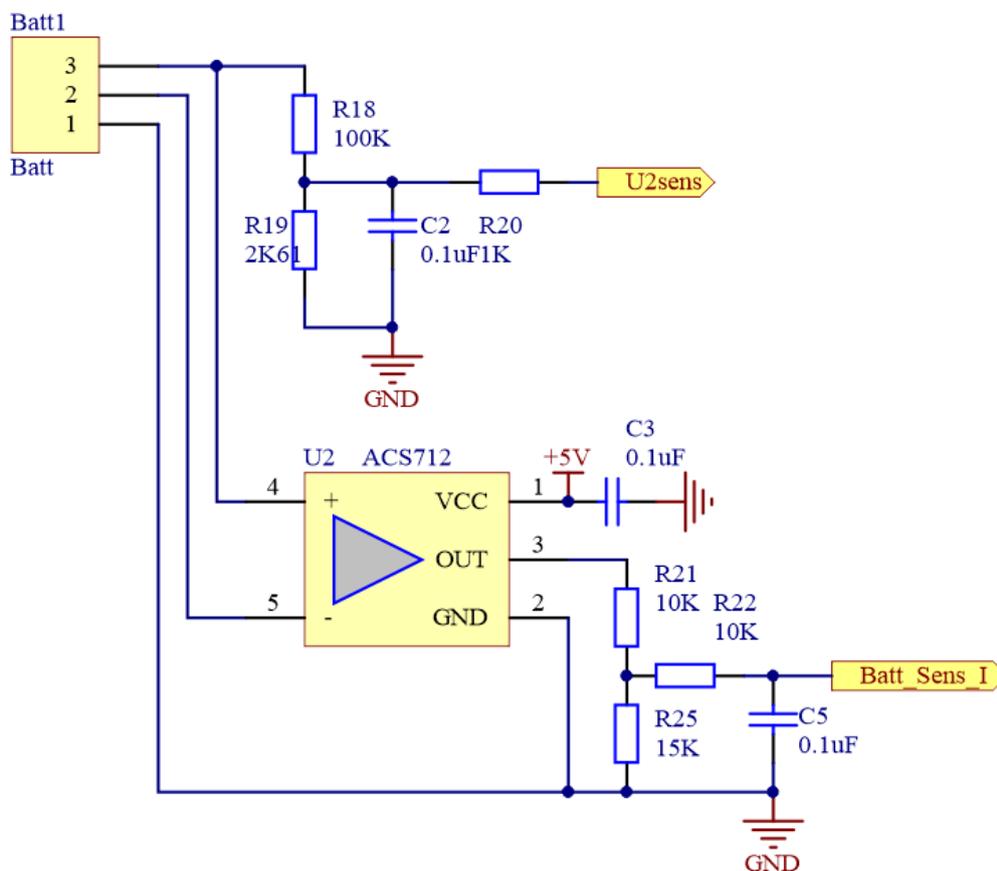


Рис. 4.1.6. Схема подключения модулей токовых датчиков и делителей напряжения якорных обмоток генератора

На рисунке 4.1.7 изображена схема подключения модулей токовых датчиков информационных обмоток генератора. Схема содержит три модуля токовых датчиков и соответствующие резистивные делители для согласования уровней напряжения выходных сигналов токовых датчиков и допустимых напряжений на входе АЦП. Для большей универсальности разрабатываемой измерительной системы в схеме не реализовано соединение концов измерительных обмоток, т. к. подразумевается, что эти соединения будут выполнены вне печатной платы. Такой подход позволит использовать проектируемое изделие не только при соединении информационных обмоток треугольником, но и при соединении звездой, а также включать

дополнительные сопротивления последовательно информационным обмоткам.

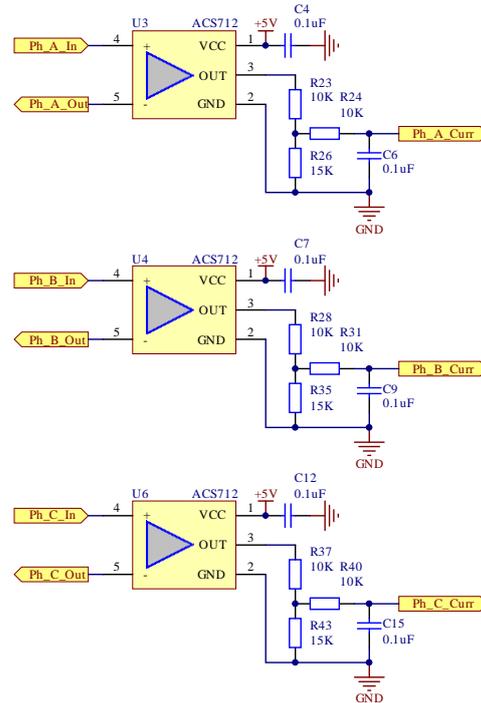


Рис. 4.1.7. Схема подключения модулей токовых датчиков информационных обмоток генератора

Представленные на рисунках 4.1.4 – 4.1.7 электрические схемы были реализованы на печатной плате, топология которой представлена на рисунке 4.1.8.

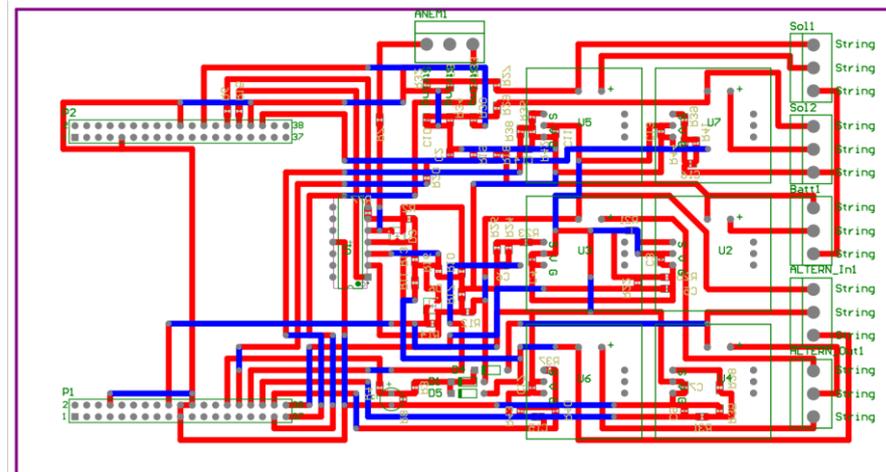


Рис. 4.1.8. Топология печатной платы, разработанная в среде Altium Designer

Особенностью представленной печатной платы является то, что она была разработана под технологию макетирования. Т.е. ввиду того, что изготовление

измерительной системы планировалось в единичном экземпляре, то размещать заказ на изготовление печатной платы на каком-либо производстве было нецелесообразно. Вместо этого было принято решение использовать макетную плату соответствующего размера, которая бы содержала только монтажные отверстия под устанавливаемые электронные компоненты. Все электрические соединения при этом выполняются монтажным проводом вдоль имеющихся контактных площадок. Такой подход позволил существенно сократить срок изготовления измерительной системы и оказался дешевле, чем если бы монтаж компонентов осуществлялся на специально изготавливаемую печатную плату. На рисунке 4.1.9 показан внешний вид собранной измерительной системы после монтажа электронных компонентов, соединительных проводников и электронных модулей.

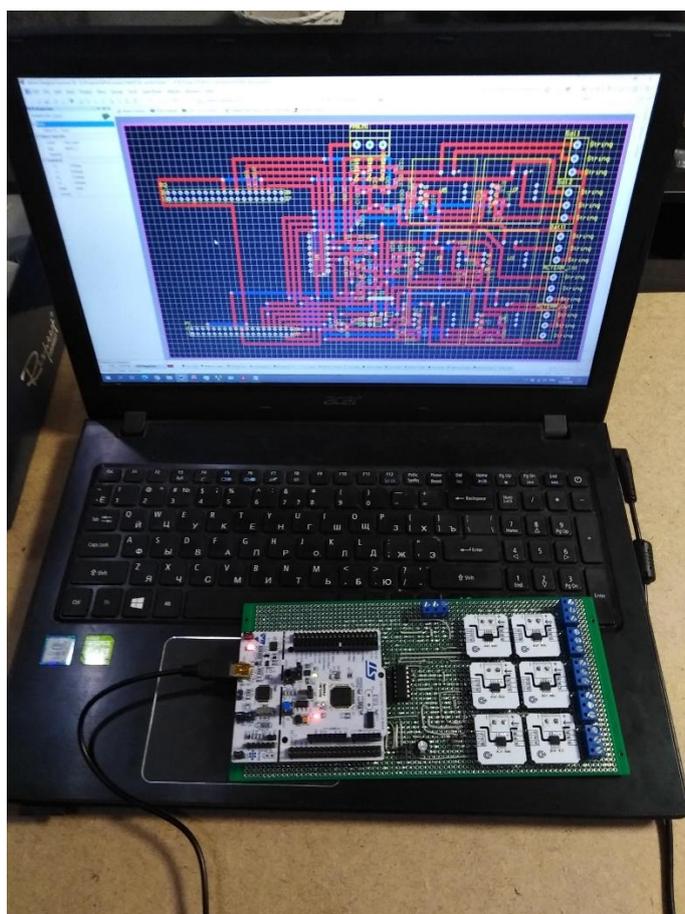


Рис. 4.1.9. Собранная печатная плата вместе с отладочной платой Nucleo-F103RC и модулями токовых датчиков во время отладки

Разработанная и изготовленная измерительная система предназначена для работы в составе персонального компьютера. При этом все электрические сигналы, измеряемые системой, попадают в микроконтроллер посредством аналогово-цифрового преобразователя. Затем с помощью программного обеспечения микроконтроллера они приводятся к стандартному цифровому виду и после этого передаются в персональный компьютер по стандартному интерфейсу. В качестве интерфейса взаимодействия с персональным компьютером выбран стандартный последовательный порт. При этом плата с микроконтроллером может подключаться двумя способами: через USB интерфейс посредством технологии виртуального последовательного порта, содержащегося в отладчике ST-Link на плате Nucleo-F103RC, либо с помощью дополнительного преобразователя UART \leftrightarrow RS232/RS485, подключаемого к соответствующему порту персонального компьютера.

В качестве протокола передачи данных выбран стандартный Modbus RTU, где разработанная система является ведомым устройством сети Modbus, а каждое измеренное значение хранится в соответствующем регистре этого устройства. Для получения необходимых данных ведущее устройство (персональный компьютер) должно послать запрос к ведомому устройству. Для организации обмена в ведомом устройстве реализованы функции Modbus 0x03 (чтение значений из нескольких регистров хранения) и 0x04 (чтение значений из нескольких регистров ввода).

Для работы с измерительной системой было разработано программное обеспечение, которое представляет собой оконное приложение для операционной системы Windows с соответствующими элементами управления. Требования к составу аппаратных и программных средств:

- процессор Pentium III/Celeron 866 MHz и выше;
- ОЗУ 1 Гбайт и выше;
- экран с разрешением 1024 x 768;
- свободное место на жестком диске не менее 1 Гб;

- адаптер интерфейса RS-485, подключенный к последовательному порту;
- операционная система Windows 10/8.1/8/7.

Главное окно приложения показано на рисунке 4.1.10. Окно приложения содержит характерные для операционной системы Windows элементы управления и вывода информации. В верхней части окна находятся закладки для быстрого переключения между панелями, содержащие элементы управления, сгруппированные по соответствующий функциональным назначениям.

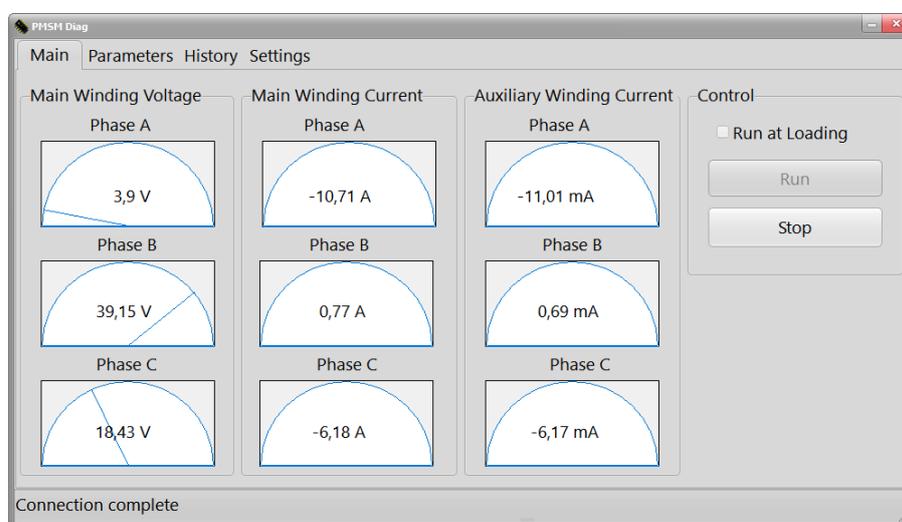


Рис. 4.1.10. Главное окно приложения

На главном окне представлены компоненты, показывающие значения измеряемых величин в реальном времени. Там же расположены кнопки для запуска и остановки процесса обмена данными с измерительной системой.

На рисунке 4.1.11 показаны компоненты, содержащиеся на вкладке «Parameters». Здесь задаются значения, необходимые для нормализации измеряемых значений при калибровке измерительной системы. Такая нормализация необходима в связи с тем, что все измеряемые сигналы оцифровываются в целочисленный диапазон от 0 до 4095 (12 разрядов). Затем эти значения передаются по протоколу Modbus как 16-и битные целочисленные значения. И уже на стороне компьютера они с помощью

линейных преобразований (умножение на коэффициент пропорциональности и сдвиг относительно нуля) приводятся к требуемым физическим величинам.

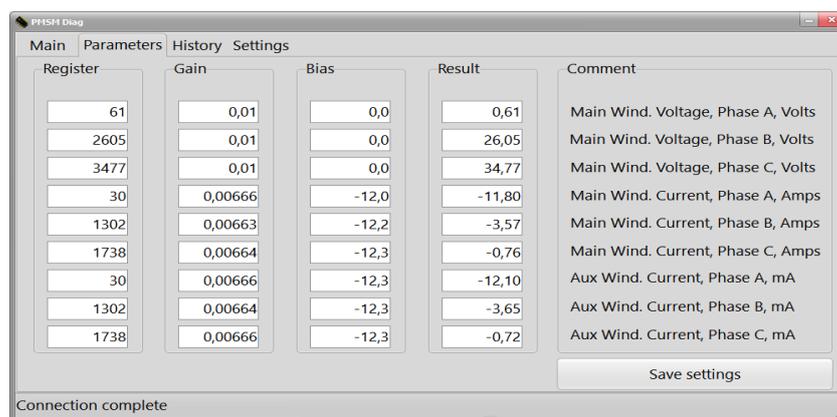


Рис. 4.1.11. Компоненты на вкладке «Parameters»

Для работы с измеряемыми величинами во временной области предназначена вкладка «History», показанная на рисунке 4.4.12. На этой вкладке содержатся поле графика измеренных значений и расположенные рядом компоненты выбора отображаемых на графике параметров. В нижней части этой вкладки слева находится таблица, демонстрирующая записи базы данных, в которой сохраняются измеряемые значения. Такая база данных может быть полезна при последующем анализе измеренных значений в различных пакетах анализа, например, MS Excel или Matlab. В нижней правой части окна содержатся кнопки навигатора по базе данных, которые позволяют перейти к любой записи для ее просмотра или удаления.

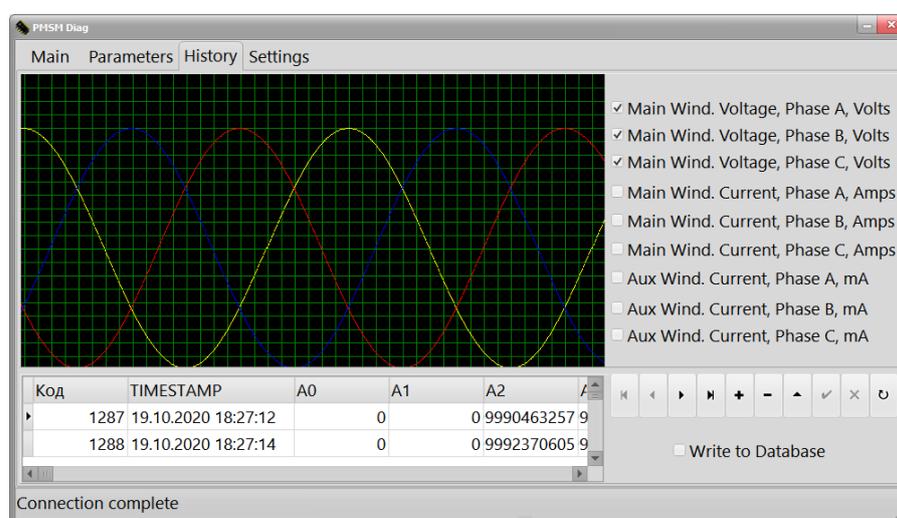


Рис. 4.1.12. Вкладка «History» для работы с измеряемыми величинами во временной области

Вкладка «Settings», показанная на рисунке 4.4.13, предназначена для настройки и проверки подключения программы к измерительной системе. На вкладке указывается номер порта персонального компьютера, к которому подключена измерительная система, также задается адрес ведомого устройства в сети Modbus. Здесь же дополнительно указываются номер функции Modbus, которая будет использоваться для обмена данными, а также начальный адрес и количество регистров, которые будут считываться из измерительной системы.

Для удобства работы все настройки, задаваемые на вкладке «Settings», сохраняются при закрытии приложения, и затем автоматически восстанавливаются при повторном запуске.

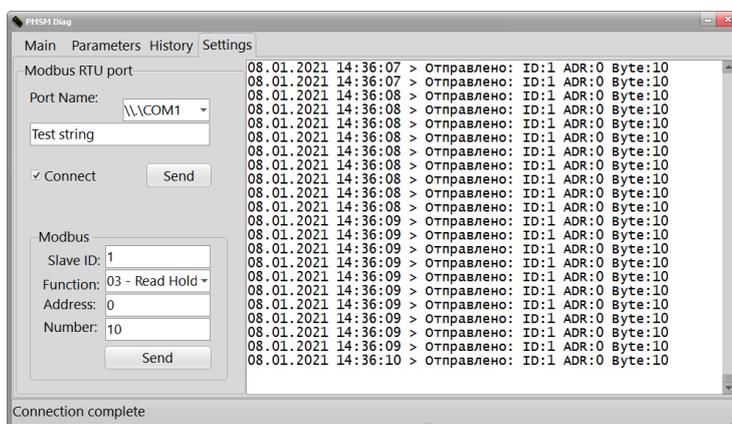


Рисунок 4.1.13. Вкладка «Settings»

Общая структурная схема измерительного комплекса для схемы соединения измерительной обмотки в треугольник представлена на рис. 4.1.14.

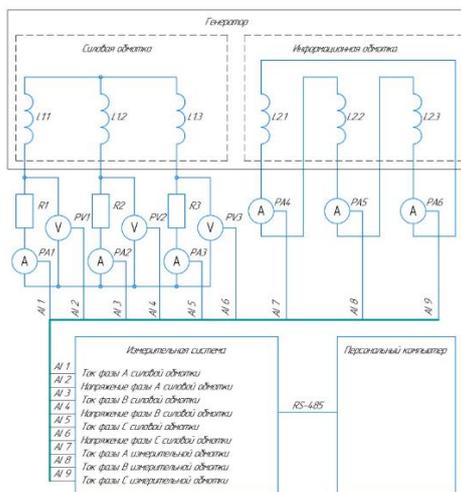


Рис.4.1.14. Структурная схема измерительного комплекса

Работоспособность комплекса была проверена при испытаниях опытного образца, результаты которых представлены ниже.

Следует отметить, что разработанная автоматизированная измерительная система представляет собой лабораторное оборудование для исследования. Для реального объекта необходимо проектирование системы контроля с применением серийных комплектующих компонентов, которые удовлетворяли бы всем требованиям, включая требования к климатическим воздействиям, механическим воздействиям, требованиям к электромагнитной совместимости и другим. Кроме этого, она должна включать в себя весь комплекс контрольно-защитных функций. Это задача опытно-конструкторского проектирования, но основную логику построения системы контроля можно использовать на основе представленной системы.

4.2. Проведение испытаний опытного образца

Представленные исследования относятся к вентильному генератору с постоянными магнитами, но сам предложенный принцип диагностики аварийных состояний относится к якорной обмотке и не зависит от типа возбуждения генератора. Для ускорения исследований и практического подтверждения теоретических выводов по применению информационной обмотки был выбран имеющийся в лаборатории генератор для бортовой сети автотракторных транспортных систем. Магнитная система генератора имеет когтеобразную конструкцию и электромагнитное возбуждение. Статорная обмотка представляет собой классическую трехфазную якорную обмотку, соединенную в треугольник.

Генератор имеет следующие паспортные данные (табл.4.2.1):

Трехфазный синхронный генератор переменного тока Г288Е.3701 со встроенным выпрямительным блоком предназначен для работы в качестве источника электрической энергии параллельно с аккумуляторной батареей в системе электрооборудования автомобиля КраЗ с двигателем ЯМЗ 236, 238. Генератор предназначен для поставок на внутренний рынок и на экспорт в страны всех климатических зон.

Таблица 4.2.1. Основные параметры генератора

Номинальное напряжение, В:	28
Максимальный выпрямленный ток, А:	47
Масса, кг:	10
Мощность, кВт:	1316
Частота вращения вала без нагрузки, об/мин:	1200
Частота вращения вала, об/мин / при токе, А:	2100/30
Длина, мм:	230
Диаметр, мм:	174
Применяемость:	а/м КрАЗ с дв. ЯМЗ 236, 238

Данный генератор представляет собой серийное изделие и не предназначен для размещения в ней информационной обмотки (рис. 4.2.1).

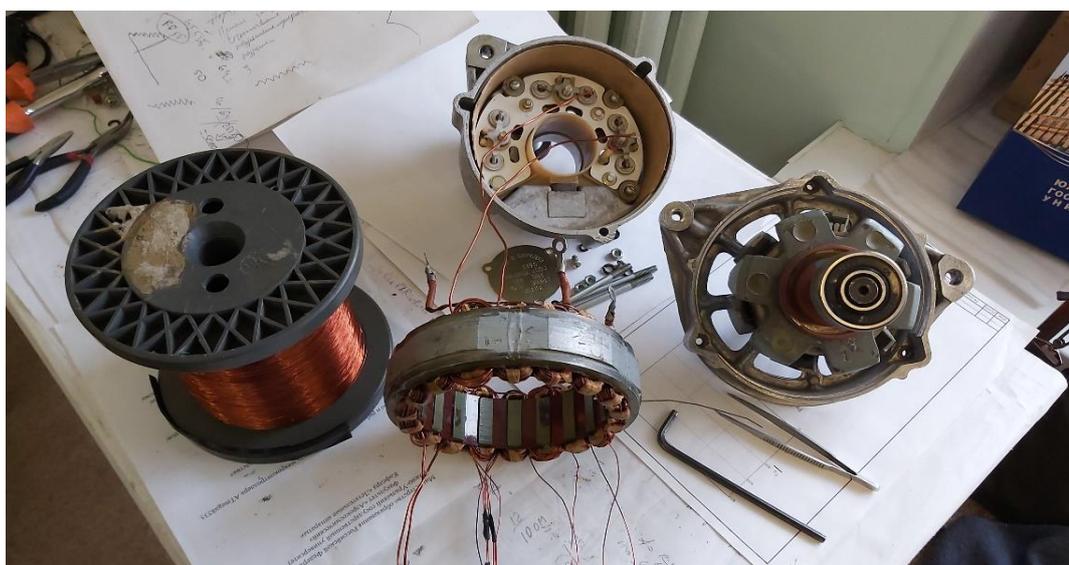


Рис.4.2.1. Основные части испытуемого генератора

Тем не менее генератор имеет 18 зубцов и незаполненное обмоткой пазовое пространство, в которое можно разместить информационную обмотку с диаметром провода 0.15 мм (рис.4.1.2).

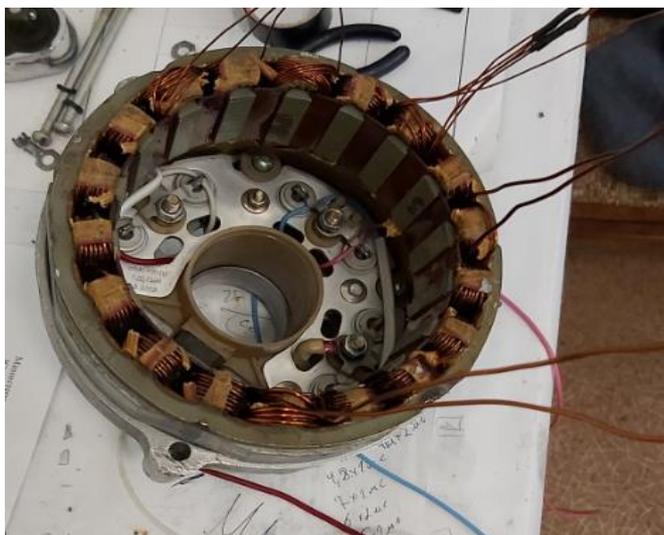


Рис.4.2.2. Якорная обмотка генератора

Для проведения эксперимента была сформирована трехфазная информационная обмотка. Число витков в секции 15, число витков в фазе 90.

По аналогии с силовой обмоткой информационная обмотка имела шаг по пазам 1. Концы фаз информационной обмотки были выведены наружу для возможности их соединения в звезду и треугольник.

Для имитации виткового короткого замыкания в пазы фазы А были вложены отдельные витки диаметром 1.5.мм (это диаметр провода якорной обмотки). Были заложены: 1 короткозамкнутый виток, 3 короткозамкнутых витка и 5 короткозамкнутых витков.

После сборки генератор был собран в испытательный стенд (рис.4.2.3.)

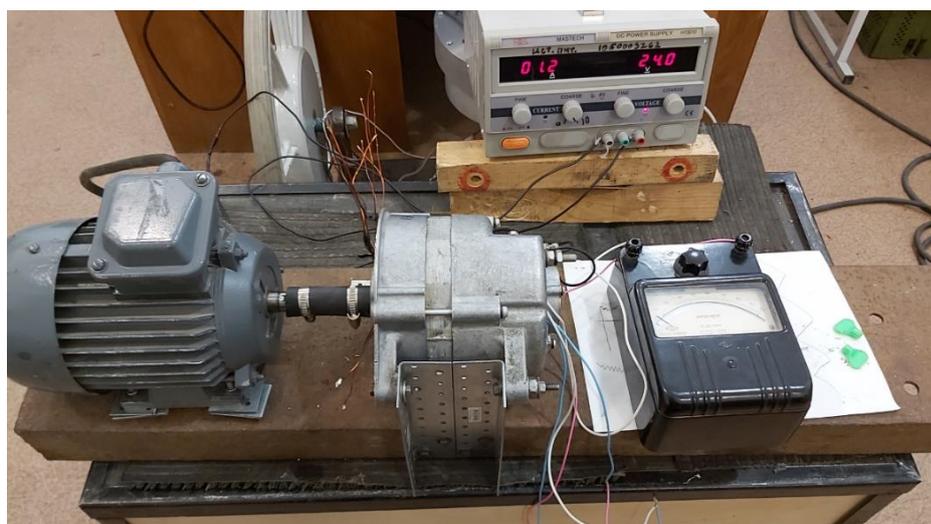


Рис.4.2.3. Стенд для испытания генератора в режиме межвитковых замыканий

В качестве привода использовался асинхронный двигатель с синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

На обмотку возбуждения генератора было подано напряжение 24 В. Обмотка возбуждения генератора потребляла ток 1.2 А (рис.4.2.4)



Рис.4.2.4. Питание цепи возбуждения генератора источником постоянного тока

Этот режим возбуждения близок к номинальному возбуждению генератора.

Для замера параметров применялись цифровые и аналоговые приборы класса точности 0.5. генератор испытывался без нагрузки на холостом ходу.

Первоначально испытания проводились без автоматизированной измерительной системы с целью принципиальной проверки предложенной концепции измерительной обмотки.

4.3. Результаты испытаний витковых замыканий генератора при соединении фаз информационной обмотки в треугольник.

Испытание проводилось при соединении информационной обмотки в треугольник по следующей общей схеме (рис.4.3.1.).

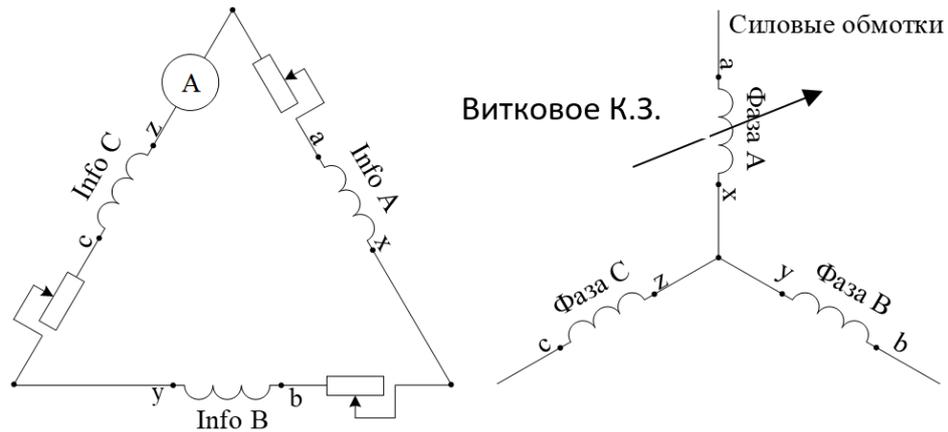


Рис.4.3.1. Схема испытания генератора в режиме виткового короткого замыкания при соединении информационной обмотки в треугольник. На холостом ходу переменными сопротивлениями ток в контуре информационной обмотки был выставлен около 0.

Далее были проведены замеры тока миллиамперметром при замыкании накоротко 1 витка, 3 витков, 5 витков (рис.4.3.2).

Информационная обмотка отреагировала на наличие короткозамкнутых витков.

Амперметр показал следующие результаты:

- 1 короткозамкнутый виток – 31 мА (рис. 4.2.3);
- 3 короткозамкнутых витка – 35 мА (рис. 4.2.4);
- 5 короткозамкнутых витков – 36 мА (рис. 4.2.5).



Рис.4.3.2. Формирование короткозамкнутого витка якорной обмотки



Рис.4.3.3. Показания амперметра при коротком замыкании 1 витка



Рис.4.3.4. Показания амперметра при коротком замыкании 3 витков



Рис.4.3.5. Показания амперметра при коротком замыкании 5 витков

Короткозамкнутые витки за несколько секунд нагревались до температуры более 100 С°.

Для исследований витковых замыканий при соединении фаз информационной обмотки в треугольник была использована автоматизированная информационная система. При подсоединении

информационной обмотки к системе и наличии витковых замыканий система фиксировала наличие токов. Осциллограммы токов представлены на рис.4.3.6. Расчетные токи в треугольнике информационной обмотки взяты из цифровой модели представлены на рис.4.3.7.

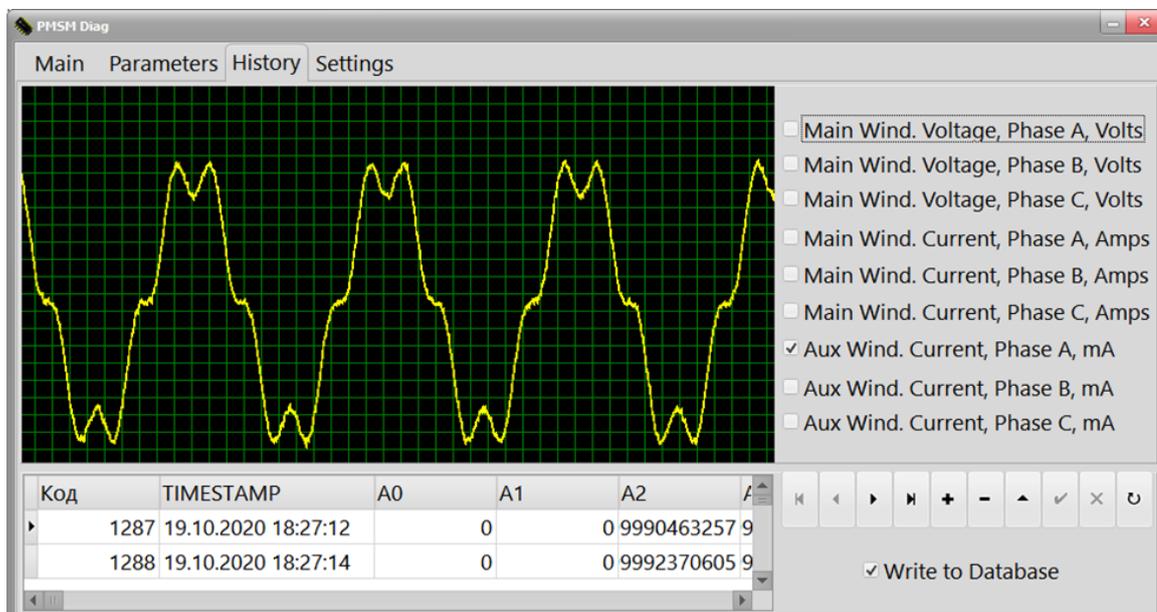
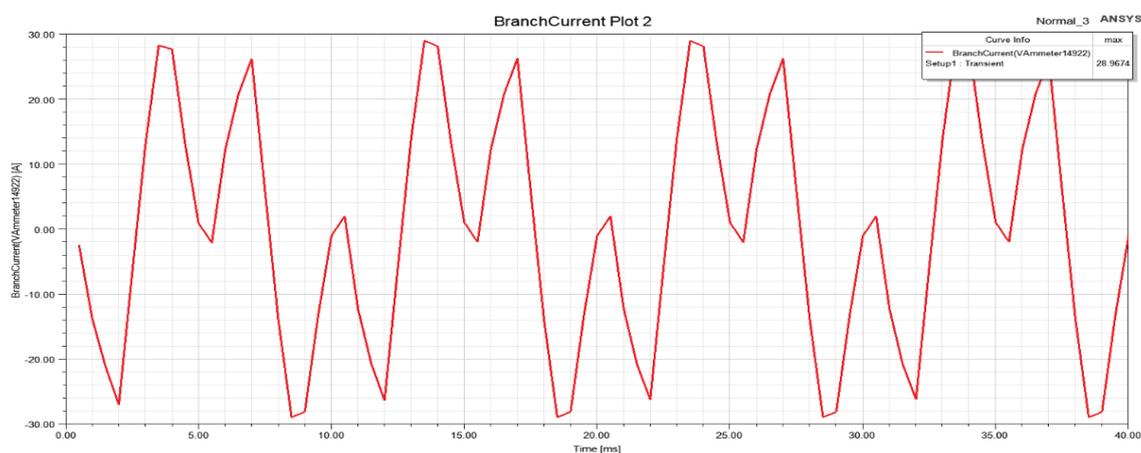


Рис. 4.3.6. Осциллограмма тока в информационной обмотке, соединенной в треугольник при 5-ти короткозамкнутых витках



4.3.7. Расчетные токи в треугольнике информационной обмотки при 5-ти короткозамкнутых витках

Как видно из рис. 4.3.6 и рис.4.3.7. формы токов из эксперимента и из расчета достаточно близки, что подтверждает работоспособность измерительной системы и достоверность цифровой модели.

Результаты испытаний показали, что при соединении информационной обмотки в треугольник она реагирует на несимметрию магнитной цепи, вызванную витковыми короткими замыканиями.

4.4. Результаты испытаний витковых замыканий генератора при соединении информационной обмотки в звезду

Испытание проводилось при соединении информационной обмотки в звезду по следующей общей схеме (рис.4.4.1).

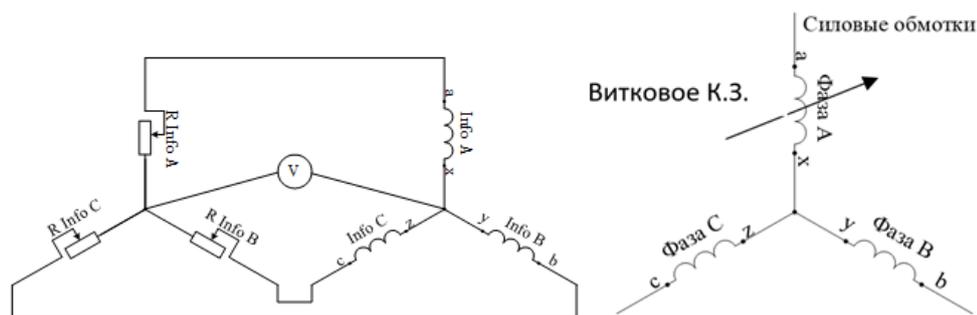


Рис.4.4.1. Схема испытания генератора в режиме виткового короткого замыкания при соединении информационной обмотки в звезду

В качестве нагрузки измерительной обмотки подбирались переменные резисторы общим номиналом 500 ом.

На холостом ходу переменными сопротивлениями величина напряжения между нейтральными в измерительной схеме была выставлена около нуля.

Далее были проведены замеры напряжения между нейтральными при замыкании накоротко 1 витка, 3 витков, 5 витков (рис.4.3.2).

Информационная обмотка отреагировала на наличие короткозамкнутых витков.

Милливольтметр показал следующие результаты:

- 1 короткозамкнутый виток – 72 мВ;
- 3 короткозамкнутых витка – 75 мВ;
- 5 короткозамкнутых витков 76 мВ.

Короткозамкнутые витки за несколько секунд нагревались до температуры более 100 С°.

Результаты испытаний показали, что при соединении информационной обмотки в звезду она реагирует на несимметрию магнитной цепи, вызванную витковыми короткими замыканиями.

Выводы по главе 4

Для испытаний опытного образца была разработана автоматизированная измерительная система, позволяющая проводить контроль параметров и диагностику коротких замыканий. При тестировании опытного образца было экспериментально подтверждено реагирование информационной обмотки на наличие витковых замыканий. По результатам проведения эксперимента можно сделать следующие выводы.

1. Логiku и структуру разработанной автоматизированной системы, показавшей свою работоспособность, можно заложить в проектирование промышленного комплекса диагностики и контроля витковых замыканий мини-ГЭС.

2. Для использования информационной обмотки в качестве индикатора витковых замыканий нужна ее предварительная настройка. Это связано с начальной несимметрией магнитной и электрической цепи генератора. Настройка нужна и для соединения в треугольник и для соединения в звезду.

3. При соединении информационной обмотки в треугольник она реагирует на наличие витковых замыканий в силовой якорной цепи. Это связано с возникновением токов нулевой последовательности в результате магнитной несимметрии при больших токах в короткозамкнутых витках.

4. При соединении информационной обмотки в звезду она реагирует на наличие витковых замыканий в силовой якорной цепи. Это связано со смещением потенциала нейтрали в результате магнитной несимметрии при больших токах в короткозамкнутых витках.

5. В реальных диагностических комплексах желательно иметь одновременно два варианта информационной обмотки при соединении в звезду и соединении в треугольник. По реагированию обмоток на аварийные ситуации можно более точно проводить диагностику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержатся научно доказанные теоретические положения по созданию электротехнического комплекса по диагностике аварийных режимов гидрогенератора гидроэлектростанций малой и средней мощности. В результате расширена существующая теоретическая база по анализу и диагностике гидрогенераторов мини-ГЭС, как альтернативных источников энергии. Основу диагностического комплекса составляет информационная обмотка, которая реагирует на магнитную несимметрию генератора при возникновении аварийных режимов короткого замыкания. Решенная техническая задача позволяет внести значительный вклад в развитие отечественного электромашиностроения, играющего важную роль в экономике страны.

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

1. Источники водной генерации электроэнергии Республики Таджикистан обладают большой мощностью. Энергогидропотенциал малых и средних рек республики в несколько раз превышает этот показатель для крупных рек, при этом потенциал крупных рек к настоящему времени уже освоен, а энергия малых и средних рек практически не используется. Освоение малой и средней гидроэнергетики будет сопровождаться созданием большого количества мини-ГЭС. Они могут быть рентабельными только в том случае, если будут эксплуатироваться без обслуживающего персонала в полностью автоматическом режиме. Такие мини-ГЭС должны иметь электротехнический комплекс по диагностике аварийных состояний энергоагрегата.

2. Самой ответственной структурной единицей мини-ГЭС является генератор. Для современной автоматизированной мини-ГЭС необходимо ориентироваться на вентильные генераторы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Одним из элементов, который может привести к аварийной ситуации и выходу мини-ГЭС из строя, является якорная обмотка

при правильно подобранных для эксплуатации подшипниках. Основные неисправности якорной обмотки – это различные варианты коротких замыканий. Наиболее сложно диагностируются витковые короткие замыкания. Для их определения необходимо в систему ввести дополнительную диагностическую обмотку, которая способна фиксировать магнитную несимметрию, возникающую при авариях.

3. Для диагностики коротких замыканий с помощью информационной обмотки можно использовать два метода: при соединении фаз обмотки в треугольник и при соединении фаз обмотки в звезду. Теоретической основой применения данного способа является метод симметричных составляющих, который применяется для анализа несимметричных нагрузок. При соединении фаз обмотки в треугольник и наличии несимметрии по фазам информационной обмотки протекает уравнивающий ток. При соединении фаз в звезду и наличии несимметрии в нейтральных фаз обмотки и нагрузки появляется разность потенциалов. Уравнивающий ток и разность потенциалов 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 для 1-го короткозамкнутого витка, 3-х короткозамкнутых витков, 5-ти короткозамкнутых витков. Применение информационной обмотки для индикации коротких замыканий можно рекомендовать для инженерной практики. Разработанная автоматизированная измерительная система может составить основу промышленного комплекса диагностики и контроля аварийных ситуаций мини-ГЭС.

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 состояния, 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.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Вентильная электрическая машина - бесщеточная машина постоянного тока, обмотка якоря которой связана с внешними цепями через вентильное коммутирующее устройство.

Схема Ларионова - трёхфазный выпрямитель, в котором три полумоста, соединенные параллельно, объединены звездой («звезда-Ларионова»).

Ansys Icepak – CAE система, позволяющая рассчитывать тепловое состояние сложных объектов на основе метода конечных элементов.

Ansys Electronics Desktop – CAE система, позволяющая рассчитывать электрические и магнитные поля сложных систем на основе метода конечных элементов.

Ansys Workbench – программная оболочка, позволяющая объединять различные CAE системы и решать таким образом связанные задачи.

Transient – режим программы **Ansys Electronics Desktop** который позволяет проводить анализ динамических характеристик с учетом взаимного перемещения статора и ротора.

Scopus – мировая библиографическая и реферативная база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях. База данных индексирует научные журналы, материалы конференций и серийные книжные издания, а также профессиональные журналы (Trade Journals).

Web of Science — поисковая интернет-платформа, объединяющая реферативные базы данных публикаций в научных журналах и патентов, в том числе базы, учитывающие взаимное цитирование публикаций. Web of Science охватывает материалы по естественным, техническим, общественным, гуманитарным наукам и искусству.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БС – блок связи;

ГОСТ – государственный стандарт;

ГТ – гидротурбина;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ДВП – датчики выходных параметров;

КЗА – коммутационно- защитная аппаратура;

КДА – контрольно-диагностическая аппаратура;

КРА – коммутационно - защитная и распределительная аппаратура;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛЭП – линия электропередачи;

МКЭ – метод конечных элементов;

Мини-ГЭС – гидроэлектростанция малой и средней мощности (до 500 кВт);

ОАО «МРСК Урала» - филиал «Челябэнерго» – межрегиональная сетевая компания;

ПЗТ – привод затвора турбины;

ПРТ – привод разгонный турбины;

РИНЦ – российский индекс научного цитирования;

Р – регулятор турбины;

РВ – регулятор возбуждения;

САЕ – система автоматизированного проектирования, предназначенная для анализа электромеханических систем;

СГ – синхронный трёхфазный генератор;

СПН – силовой преобразователь напряжения;

ТУВ – тиристорное устройство возбуждения;

ЭДС – электродвижущая сила;

Все аналитические выражения в диссертации приводятся для единиц измерения системы СИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаева, Ф.С. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР/ Ф.С. Абдуллоева, Г.Б. Баканин, С.М. Гордон. – Л.: Недра, 1965. – 658 с.
2. Авакян, А.Б. Энергетические ресурсы СССР. Гидроэнергетические ресурсы / А.Б. Авакян и др.; под ред. А.Н. Вознесенского – М.: Наука, 1967. – 599 с.
3. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана. Воронин С.Г., Давлатов А.М., Султонов О.О., Косимов Б.И., Гулов Д.Ю. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2019. Т. 19. № 3. С. 100-107.
4. Альтшуллер, Г. С. Введение в теорию решения изобретательских задач/ Г. С. Альтшуллер. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. - 235 с.
5. Аникин А.С., Возмилов А.Г., Кондрашов А.Н. К вопросу об определении резервов при интеграции ВЭС в электроэнергетические системы. Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 5 (145). С. 50-53.
6. Ануфриев, А.С. Особенности проектирования генераторных ветроустановок малой мощности. /А.С. Ануфриев, Ю.А. Макаричев, М.Н. Алимбеков. Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII международной научно-практической конференции/Под общ. ред. Трушкина В.А. – Саратов: ООО «ЦеСАин», ISBN 978-5-906689-54-2. 2017. – с. 13-15
7. Апевалов В. Д., Богуславский И. З., Данилевич Я. Б., Корчагин Н. В., Попов В. В., Рыбин Ю. Л., Цадкин А. Я. Проблемы разработки современных генераторов переменного тока средней мощности // Проблемы создания и эксплуатации новых типов энергетического оборудования. С.-Петербург, 2002.
8. Асинхронизированные синхронные генераторы для ветроэлектростанций и малых ГЭС Таджикистана / Н.И. Смолин, Д.Ю. Гулов, Б.И. Косимов, О.О. Султонов // Приоритетные направления развития энергетики в АПК: материалы I Всерос. науч.-практ. конф. – 2017. С. 100–105.

9. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов. - М.: Энергия, 1964. - 480 с.
10. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя/К. А. Басов. - М.: ДМК Пресс, 2005. - 640 с.: ил.
11. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS/ К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2006. - 248 с.: ил.
12. Безруких, П. П. Ветроэнергетика мира и России. Экономические и технические аспекты // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С. 9-16.
13. Безруких, П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г.А. Борисов, В. И. Виссарионов, В. М. Евдокимов и др // СПб.: Наука, 2002. – 314с.
14. Бертинов, А. И. Авиационные электрические генераторы/ А. И. Бертинов. - М.: Оборонгиз, 1959. - 594 с.
15. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - М.: Академия, 2006. - 320 с.
16. Богачев А.В., Иванов А.С., Ежов Е.В. Выбор генератора для системы рекуперации избыточного давления магистральной жидкости // Энергобезопасность и энергосбережение, 2012г.-№4. - С.12-15.
17. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Сравнение асинхронного и синхронного генераторов в системе рекуперации давления // Радиотехника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVIII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2012. -Т. 2.с.171-172
18. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Моделирование автономного синхронного генератора, работающего на подзаряд аккумуляторной батареи. // Радиотехника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XX междунар.

науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2014. -Т.2. - С.140-141.

19. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS/ О.Б. Буль. – М.: Академия, 2006. - 288 с.

20. Буль, О.Б. Точность расчета осесимметричной и трехмерной магнитных систем с помощью ANSYS // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 364-377.

21. Ганджа, С. А. Анализ магнитного поля стартер-генератора комбинированного возбуждения // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.73-76.

22. Ганджа, С. А. Генератор для автономных источников питания// Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9. - С.100-102.

23. Ганджа, С. А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». - 2007. - Вып.8, № 20. - С.19-23.

24. Ганджа, С. А. Подсистема оптимизации вентильного многосекционного моментного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984. -С. 13-21.

25. Ганджа, С. А. Применение программного комплекса Ansys для анализа вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным зазором/ С. А. Ганджа, М. С. Свиридов, А. А. Бедкер // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 361-363.

26. М.В. Глазырин. Анализ и исследование радиально-осевой гидротурбины для МГЭС с машинами двойного питания/ М.В. Глазырин, Р.Х.

Диёров // Вестник Таджикского технического университета №4. 2012. С. 73-77.

27. М.В. Глазьфин. Построение системы регулирования активной мощности гидроагрегата с переменной частотой вращения вала/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров, Е.А. Краснопеев // Вестник Таджикского технического университета №2. 2013. С. 54-59.

28. Глебов И.Я. Диагностика турбогенераторов /И.Я. Глебов, Я.Б. Данилевский. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1989. – 119 с.

29. Главтаджикгидромет. Гидрографический экспедиционный отдел. Схемные проработки. «Использование гидроэнергетических ресурсов малых и средних водотоков ГБАО средствами малой гидроэнергетики». Книга 1. Климата - Гидрологическое обоснование. Душанбе 1995. – 132 с.

30. Друзь, Н. Положение дел по использованию возобновляемых источников энергии в Центральной Азии /Н. Борисова, А. Асанкулова, Р. Захидов, У. Таджиев // Перспективы их использования и потребности в подготовке кадров. /ОБЗОР–ЮНЕСКО, – Алма-Ата: –2010. –144с.

31. Ермолин, Н. Г. Электрические машины малой мощности/ Н. Г. Ермолин. - М.: Высш. шк., 1967. - 503 с.

32. Инояттов, М.Б. К вопросу об использовании малой гидроэнергетики применительно к условиям Республики Таджикистан / М.Б. Инояттов, А.К. Киргизов // Вестник Таджикского технического университета. – 2008. – № 2. С. 38–42.

33. Иваницкий С. В. Особенности компьютерной модели для расчета генераторного режима линейной асинхронной машины / С. В. Иваницкий, Ф. Н. Сарапулов // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.158-160.

34. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: в 2 т. Т. 2. / А. В. Иванов-Смоленский. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2005. - 528 с.

35. Кавун, Ю. Ю. Новые типы синхронных электрических машин с постоянными магнитами/ Ю. Ю. Кавун, Л. К. Ковалев // Проектирование и изготовление аэрокосмических аппаратов / под ред. проф. Ю. Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ, 2006.

36. Казаков, Ю. Б. Автоматизированное распределение обмоток статора неявнополюсных машин постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 8. – С. 8-11.

37. Казаков, Ю. Б. САПР машин постоянного тока на основе декларативных знаний с динамически формируемым алгоритмом расчета / Ю.Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1997. - № 4. - С. 30-32.

38. Казаков, Ю. Б. Конечно-элементное исследование магнитных систем машин постоянного тока с неявновыраженными полюсами / Ю. Б. Казаков, В. С. Мостейкис, А. И. Тихонов // Автоматизированный анализ физических процессов и проектирование в электромеханике: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. -Иваново, 1990. - С. 33-37.

39. Казаков, Ю. Б. Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учетом взаимного влияния физических полей: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01/ Ю. Б. Казаков. - М., 2000. - 39с.

40. Калаев, В. Е. Актуальность и вопросы использования герметичных электрических машин/ В. Е. Калаев, С. В. Леонов // XI Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта, 18-23 сентября/Моск. ин-т электротехн. (МЭИ) – М., 2006. – Ч. 1. - С. 196.

41. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферова. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 273 с.

42. Киргизов, А.К. Методика определения расхода воды при проектировании малых ГЭС на горных водотоках. Таджикистана /А. К. Киргизов, С. Р. Расулов // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: материалы девятнадцатой Всеросс. Науч.-техн. конф. / Томский

политехнический университет. Т.1.– Томск: «СПБ Графика», – 2013. – С. 82-84.

43. Киргизов, А.К. Потенциал нетрадиционных источников энергии в Таджикистане / А.К. Киргизов, С. Р. Расулов, У.У. Косимов // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: материалы восемнадцатой Всеросс. науч.-техн. конф. / Томский политехнический университет. – Томск: «СПБ Графика», – 2012. – С. 99-101.

44. Киргизов, А.К. Водно-энергетический потенциал малых рек Памира / А.К. Киргизов, Дж. С. Ахъеев, Дж, Х. Худжасаидов // 8-я Межд. конф. по проблемам горной промышленности, строительство и энергетики —Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики // ТулГУ. Тула-Донецк-Минск. – 2012. – С. 480-485.

45. Киргизов А.К. Развитие и оптимизация режимов электроэнергетической системы с распределёнными возобновляемыми источниками энергии методами искусственного интеллекта (на примере Республики Таджикистан): Дис. - канд. техн. наук : Специальность 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические системы. – Новосибирск, 2017. – 189 с.

46. Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. — 5-е изд. - М.: Высш. шк., 2006. - 607 с.

47. Куприянов, А. Д. Автоматизированное проектирование электромеханических преобразователей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01/ А. Д. Куприянов. - М., 2004. - 17 с.

48. . Лукутин, Б.В. Автономное электроснабжение микрогидроэлектростанцией / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.Б. Шандарова. – Томск, 2001. – 104 с.

49. Любимов, Э. В. Системы автоматизированного проектирования электрических машин: учеб. пособие/ Э. В. Любимов / Перм. гос. тех. ун-т. - Пермь, 2001. - 186 с.

50. Макаричев, Ю.А. Оптимизация энергетических параметров синхронного генератора малой мощности. / Макаричев Ю.А., Овсянников В. Н., Зубков Ю. В., Ануфриев А.С. Вестник транспорта Поволжья. №3(69) -2018. С.13-19.

51. Макаричев, Ю.А. Критериальный анализ параметров генераторов малой мощности. /Макаричев Ю.А., Ануфриев А.С. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. №2 (62), 2018. с.42-47.

52. Морозов, В.А. Электрооборудование летательных аппаратов. Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 2: Элементы и системы электропитания-приемники электрической энергии/ В.А. Морозов, В.И. Нагайцев, С.А. Грузков/ Моск. энерг. ин-т (МЭИ). - М., 2008. – 552с.

53. Новиков, Н. Н. О постановке задачи оптимального проектирования явно полюсных синхронных двигателей / Н. Н. Новиков, В. Ф. Шутько // Автоматизация исследований и проектирования электрических машин и трансформаторов: межвуз. сб. науч. трудов. - Иваново, 1987. – С. 81-86.

54. Норматов, П.И. Курбонов, Н.Б. Фурмин, Г.Т.Норматов, И.Ш. Метеорологические особенности и гидрохимия озера Искандеркуль и впадающих в него рек / П.И. Норматов, Н.Б. Курбонов, Г.Т. Фрумин, И.Ш. Норматов // Научно-теоретический журнал / Российский государственный гидрометеорологический университет, 2016 – С. 13-17

55. Отчет Министерства экономического развития и торговли Республики Таджикистан «Экспресс-оценка и анализ пробелов в энергетическом секторе Таджикистана». – Душанбе, 2011.

56. Пат. № 2313890 РФ RU, МПК 51 H02M 7/08, H02H 3/28. Устройство для дифференциально-фазной защиты / ФГОУ ВПО КубГАУ авт.А.В. Богдан,А.Н. Соболев. – № 2006124282; заявл. 06.07.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.

57. Пат. № 2295815 РФ RU, МПК 51 H02H 7/08, G01M 15/00, H02K 15/00. Устройство защиты машин переменного тока / ФГОУ ВПО КубГАУ авт.А.В. Богдан, И.Г. Стрижков, И.А. Потапенко, А.Н. Соболев. – № 2005131150; заявл.

07.10.2005; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8. 6. Пат. № 66127 РФ RU, МПК 51 Н02К 11/00, Н02Н 7/08. Устройство для дифференциальной защиты асинхронного генератора / ФГОУ ВПО КубГАУ авт.А.Н. Соболев. – № 2006147115; заявл. 27.12.2006; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 24.

58. Перминов, Э. М. Опыт и перспективы развития возобновляемой энергетики в России // ЭЛМАШ-2009 Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.17-27.

59. Пластун, А. Т. Статор асинхронного двигателя малой мощности с кольцевыми обмотками / Пластун, А. Т. [и др.] // «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: XI-я Международная конференция, Украина, Крым, г. Алушта, 18-23 сентября 2006 г.– М., 2006. - Ч. 2. – С. 324-325.

60. Повышение экономической эффективности малых гидроэлектростанций республики. Таджикистан . Давлатов А.М., Косимов Б.И., Гулов Д.Ю., Султонов О.О. В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 456-461.

61. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. –С. 57–61.

62. Положение дел по использованию возобновляемых источников энергии в Центральной Азии. Перспективы их использования и потребности в подготовке кадров. Обзор / Н. Друзь, Н. Борисова А. Асанкулова и др. – ЮНЕСКО; Алматы, 2010. –144 с.

63. Приступ, А. Г. Частотно-регулируемый торцевой асинхронный электродвигатель: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01/А. Г. Приступ. - Новосибирск, 1990. - 16 с.

64. Программный комплекс моделирования электромагнитных процессов / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, А. Г. Каранкевич, О. П. Муравлев // Оптимизация режимов работы электромеханических систем: межвуз. сб. науч. трудов / Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - С.127-132.

65. Пятаков А.В. Повышение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей выявлением витковых замыканий в трансформатора 6-10/0,4 кВ. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. 05.20.02, Троицк, 2017.

66. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск.3. Бассейн р. Амударья: Гидрометиздат, 1971. – 359 с.

67. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы: Аварии и инциденты: техническое пособие. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 488 с.

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

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

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

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

72. Семкин, Б.В. Микро-ГЭС как автономный источник энергии / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Горы и человек: в поисках устойчивого

развития. Тез. докл. на междунар. научн. - практ. конф. - Барнаул. – НИИ Горного природопользования. - 1996. - С. 248-250.

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

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

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

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

77. Смолин, Н.И. Асинхронизированные синхронные генераторы для ветроэлектростанций и малых ГЭС Таджикистан /Д.Ю. Гулов, Б.И. Косимов, О.О. Султонов // В сборнике: Приоритетные направления развития энергетики в АПК Материалы I Всероссийской научно-практической конференции. – 2017. – С. 100-105.

78. Соболев, А.Н. Сравнение методов расчета однофазных КЗ в электроустановках до 1 кВ / А.Н. Соболев А.В. Богдан, В.А. Богдан, В.В. Савиных // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 11. – С. 30 – 31.

79. Соболев, А.Н. Признаки повреждения обмотки статора асинхронного генератора / А.Н. Соболев А.В. Богдан, И.А. Потапенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 8. – С. 13 – 14.

80. Соболев, А.Н. Токи повреждений в обмотках асинхронных генераторов с емкостным самовозбуждением / А.Н. Соболев А.В. Богдан // Кибернетика энергетических систем: материалы XXVIII сессии семинара «Диагностика энергооборудования» / ЮРГТУ. – Новочеркасск, 2006 / Ред. журн. «Изв. вузов – Электромеханика». – 2006. – С. 170 - 171.

81. Соболев, А.Н. Анализ неисправностей асинхронного генератора / А.Н. Соболев // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе: сборник научных трудов / СГАУ. – Ставрополь, 2007. –С. 177 – 178.

82. Соболев, А.Н. Анализ повреждений в обмотках асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением / А.Н. Соболев, А.В. Богдан // Перспективы и направления развития энергетики АПК: материалы Международной научно-технической конференции / БГАТУ. – Минск, 2006. – С. 40 – 42. 10. Соболев, А.Н. Защита при витковых замыканиях в обмотке статора асинхронных генераторов с емкостным возбуждением / А.Н. Соболев, А.В. Богдан, А.И. Богдан, М.М. Ключников // Энергосберегающие комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. – Краснодар, 2006. – С. 192 – 196.

83. Соболев, А.Н. Использование методов расчета однофазных КЗ в электроустановках АПК / А.Н. Соболев, А.В. Богдан, В.В. Савиных // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки: материалы 4-й научной конференции факультетов механизации и электрификации / КубГАУ. – Краснодар, 2005. – С.115 – 1116. Соболев, А.Н. Токи при коротком замыкании витков в статорной обмотке асинхронного двигателя и генератора / А.Н. Соболев // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники электропитания для АПК / КубГАУ. – Краснодар, 2005. – С. 276 – 278.

84. Соболев, А. Н. Трехфазные короткие замыкания в обмотке статора асинхронного генератора / А.Н. Соболев, А.В. Богдан // Электроэнергетические комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. – Краснодар, 2005. – С. 150-153

85. Совместный магнитно-тепловой конечно-элементный расчет неявнополюсного двигателя постоянного тока / Е.Б. Герасимов, Ю.Б. Казаков, А.И. Тихонов, Ю.Я. Щелькалов // Электротехника. -1996. -№10. –С.39-42.
86. Способ диагностики работы двигателя: пат. 2154813 РФ, МПК G01M15/00. № 99105603/06; заявл. 19.03.1999; опубл.20.08.2000, Бюл. № 23. – 7 с.
87. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента: пат. 2188939 РФ, МПК7 E 21 В 44/06, E 21 В 45/00. № 2001113974/03; заявл. 25.05.2001; опубл. 10.09.2002, Бюл. № 25. – 6 с.
88. Таджикистан. Природа и природные ресурсы. – Душанбе: Дониш, 1982. – 96 с.152
89. Тимошевский, М.В. Кавитирующее обтекание уменьшенной модели направляющих лопаток турбины высокого давления / С.А. Чуркин, А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К. Ханялич// Международный журнал многофазного потока 78, – 2016, С. 75-87.
90. Тресман, А.Г. Кривые обеспеченности и естественная зарегулированность стока рек Таджикистана / А.Г. Тресман. – Душанбе: Дониш, 1969. – 168 с.
91. Тресман, А. Г. Определение годового стока на неизученных створах рек Памира /А. Г. Тресман // Доклад АН Тадж. ССР. – № 4. т. 11, Душанбе – 1959.– 98 с.
92. Тубис, Я. Б. База знаний «Тепловентиляционный расчет асинхронных двигателей» как составная часть расчетной подсистемы интеллектуальной САПР АЭД / Я. Б. Тубис, А. Э. Кравчик, А. С. Кобелев // Электротехника. - 2004. - №7. - С. 2-8.
93. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора: пат. 22450 (KZ). № 2008/1073.1, заявл. 29.09.2008; опубл.15.04.2010, Бюл. № 5. – 4 с.

94. Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования: пат. 2437147 РФ, МПК G 06 F17/14. № 2010127068/08; заявл. 01.07.2010; опубл.20.12.2011, Бюл. № 35. – 9 с.

95. Февралев, А. В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках: Учебное пособие / А. В. Февралев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2014. – 181 с.

96. Федий, К. С. Низкоскоростной синхронный генератор автономных источников электроснабжения: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / К. С. Федий. - Красноярск, 2007. - 20 с.

97. Федянин, А. Л. Информационные технологии в моделировании электромеханических систем / А. Л. Федянин, С. В. Леонов // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 8-11 декабря 2005 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2006. – Т. 1. -С. 258-259

98. Федянин, А. Л. Программный комплекс моделирования электромеханических устройств / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. - С.163-165.

99. Фортов, В.Е. Энергетика в современном мире/ В.Е. Фортов, О.С. Попель. – Издательский Дом «Интеллект».: Долгопрудный, 2011. – 168 с. 3. Режимы внутригодового распределения стока рек Таджикистана: отчет о НИР / Тресман А.Г. – Душанбе: Отдел энергетики АН Таджикской ССР, 1959. – 103 с.

100. Хамухин А.А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 87–93.

101. Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Известия Томского политехнического университета. – 2010. –Т. 317. – № 5. – С. 149–153.

102. Шульц, В.Л. Реки Центральной Азии/ В. Л. Шульц // Научно-исследовательский Институт по гидрометрологии Центральной Азии. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. — 691 с.
103. Ahmet M. Hava y Seung-Ki, “Dynamic Overmodulation Characteristics of Triangle Intersection PWM Methods,” IEEE Industry Applications Society Annual Meeting New Orleans, vol. 2, pp. 1520–1528, 1997
104. Borkowski, D. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed / D. Borkowski, T. Wegiel, // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2013. – Vol. 28 (2). – 6479690. – P. 452–459. DOI: 10.1109/tec.2013.2247605
105. 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. Bakhtiyor Kosimov^{1,2} Sergey Gandzha¹ Dilshod Aminov^{1,2}, Azamdzhon Davlatov¹, Dilovar Gulov¹, Ilhom Abdulloev¹
106. Dietz, A. Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator / A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler // 1st International Electric Drives Production Conference 2011, EDPC–2011 – Proceedings. – 6085557. – P. 93–100. DOI: 10.1109/edpc.2011.6085557 11.
107. G. Dilovar and S. Gandzha, "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, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234366.
108. Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator / A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler, / 1st International Electric Drives Production Conference 2011, –EDPC-2011 – Proceedings 6085557, – P. 93-100.
109. Frede Blaabjerg, Tomislav Dragicevic, and Pooya Davari, “Applications

of Power Electronics Department of Energy Technology,” Aalborg University, 9220, 2019,

110. Farret, F.A. Small Hydroelectric Systems /F.A. Farret, M.G. Simoes, A. Michels // Green Energy and Technology. – 2013. – Vol. 59. – P. 151–184. DOI: 10.1007/978-1-4471-5104-3_5

111. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 15-18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: [10.1109/ICIEAM.2018.8728650](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728650).

112. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms. Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018 Chelyabinsk, Russia. DOI: [10.1109 / URALCON.2018.8544320](https://doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544320) pp. 282-287

113. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I., Bakhtiyor K. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC) 13-15 Nov. 2018. Chelyabinsk, Russia DOI: [10.1109 / GloSIC.2018.8570132](https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570132)

114. Gandzha S., Bakhtiyor K., Aminov D. Selecting Optimal Design of Electric Motor of Pilgrim Mill Drive for Manufacturing Techniques Seamless Pipe. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 25-29 March 2019. Sochi, Russia DOI: [10.1109/ICIEAM.2019.8742941](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742941)

115. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), ECF Paper 25-29 March 2019 Sochi, Russia, DOI: [10.1109 / ICIEAM.2019.8742976](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742976).

116. Gandzha S., Bakhtiyor K., Aminov D. Development of a system of multi-level optimization for Brushless Direct Current Electric Machines.

International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural Con) 2019. 1-3 Oct. 2019 Chelyabinsk, Russia. DOI: [10.1109/URALCON.2019.8877650](https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877650).

117. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Application of the combined excitation submersible hydrogenerator as an alternative energy source for small and medium rivers. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia. DOI: [10.1109 / PEAMI.2019.8915294](https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915294).

118. S. A. Haritonov and V. M. Berestov, “Analysis of sinusoidal PWM with natural sample (methodical aspect),” Technical electrodynamics. Special Issue: Power Electronics and energy efficiency, part 2, pp. 31–37, 2002.

119. Haval Sardar Kamil and Dalila Mat Said, “Control Strategy for a Three Phase Four-leg Grid Connected PV Inverter under Unbalanced Faults,” Centre of Electrical Energy Systems, 2018.

120. Hongtao Shi, Fang Zhuo, and Hao Yi, “Control strategy for microgrid under three-phase unbalance condition,” J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 4(1), pp. 94–102, 2016. DOI: [10.1007/s40565-015-0182-3](https://doi.org/10.1007/s40565-015-0182-3)

121. P. Hsu and M. Behnke, “A three-phase synchronous frame controller for unbalanced load,” Power Electronics Specialists Conf., vol. 2, pp. 1369– 1374, 1998.

122. Jofey Simon, “Control of a four leg inverter for unbalanced power networks,” MTPS, CUFE, Bangalore, India (ONLINE): 2394–0697, vol. 2, is. 3, pp. 72–77, 2015.

123. A. Kouzou, M. O. Mahmoudi, and M. S. Boucherit, “The Space Vector Modulation PWM Control Methods Applied on Four Leg Inverters Djelfa University and ENP Algiers,” Algeria. [Online]. Available: www.intechopen.com

124. Lewis, B.J. Unsteady computational fluid dynamic analysis of the behavior of guide vane trailingedge injection and its effects on downstream rotor performance in a francis hydroturbine / B.J. Lewis, J.M. Cimbala // Journal of Turbomachinery. – 2015. – Vol. 137 (8). – 81001. DOI: [10.1115/1.4029427](https://doi.org/10.1115/1.4029427)

125. Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short Circuit of Rotor Windings of TurboGenerators Based on the Thermodynamics Modeling Method // Journal of Power Electronics. – 2011. – Vol. 11. – № 3. – P.759–766.
126. Li, X. Guide vane asynchronous closure mode for improving the transient quality of hydroturbines /X. Li, J. Chang, C. Li // Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering. – 2014. – Vol. 33 (1). – P. 202–206. DOI: 10.1115/1.4036234
127. Ma H.Z., Pu L. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings // J. Electromagnetic Analysis & Applications. – 2009. – № 3. – P.187–191.
128. M. N. Marwali, D. Min, and A. Keyhani, “Robust stability analysis of voltage and current control for distributed generation systems,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 2, pp. 516–526, 2006.
129. M. Mokhtari, S. Golshannavaz, D. Nazarpour, and F. Aminifar, “Design of an Asymmetrical Three-phase Inverter for Load Balancing and Power Factor Correction Based on Power Analysis,” Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 6, no. 3, pp. 293–301, 2011.
130. Petrov, G.N. Tajikistan`s Hydropower Resources. Central Asia and Caucasus / G.N. Petrov // Center for Social and Political Studies. Sweden. – 2003. – №33 (21), – pp. 153–161.
131. Raef Aboelsaud and A. Ibrahim, “Voltage Control of Autonomous Power Supply Systems Based on PID Controller Under Unbalanced and Nonlinear Load Conditions,” 2019. DOI: 10.1109/REEPE.2019.8708841.
132. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ren21.net.
133. P. Rioual, H. Pouliquen, and H. P. Louis, “Control of a PWM rectifier in

the unbalanced state by robust voltage regulation,” Proc. 5th Eur. Conf. Power Electron. Appl., vol. 4, pp. 8–14, 1993.

134. A. Kh. Saidov, “Load balancing in three-phase networks with discret formation of phase voltages,” Scientific research: materials of the ninth scientific conf. of graduate and doctoral students, pp. 47–54, 2017.

135. Sergey Gandzha, Bakhtiyor Kosimov, Dilshod Aminov. Development of analysis methods for Clow Pole Synchronous Motor of the Pilger mill for the Manufacturing of Seamless Pipers. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. . 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia. DOI: DOI: [10.1109/PEAMI.2019.8915343](https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915343)

136. Sergey Gandzha. Dilshod Aminov, Bakhtiyor Kosimov, Rustam Nimatov, Azamdzhon Davlatov and Azamjon Mahmudov. Development of a concept of an energy-efficient house for an environmentally friendly settlement in the South Ural. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE – 2019). Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 18 December 2019 St. Petersburg, Russia. DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011009>

137. Sergey Gandzha, Bakhtiyor Kosimov, Dilshod Aminov. Application of the Ansys Electronics Desktop Software Package for Analysis of Claw-Pole Synchronous Motor. Machines 2019, 7 (4),

138. T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, “A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island,” IEEE Trans. Energy Convers, vol. 21, no. 2, pp. 406–414, 2005.

139. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed/ D. Borkowski, T.Wegiel, // IEEE Transactions on Energy Conversion 28(2), – 2013, – 6479690, – P. 452-459.

140. H. S. Song and K. Nam, “Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 46, no. 5, pp. 953–959, 1999.

141. Switched Model and Dynamic Analysis of a Hydroturbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient / H. Li, D. Chen, F. Wang, H. Zhang // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME. – 2017. – Vol. 139 (10). – 101002.
142. Switched Model and Dynamic Analysis of a Hydroturbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient /H.Li, D. Chen, F. Wang, H. Zhang//Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME – 2017,– 139(10), – 101002.
143. Unsteady computational fluid dynamic analysis of the behavior of guide vane trailing-edge injection and its effects on downstream rotor performance in a francishydro turbine/ B.J. Lewis, J.M.Cimbala //Journal of Turbomachinery – 2015 ,– 137(8), – 81001.
144. Variable speed small hydropower plant / T. Wegiel, D.Borkowski, // Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, – PEDG 2012, – 6253996,– P. 167-174.
145. Voltage Balancing at the Output of Three-Phase Semiconductor Converter. Sergey Voronin, Olamafruz Sulstonov, Dilovar Gulov. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) Magnitogorsk, Russia 4–5 October 2019 C. 94–98. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915374
146. I. Vechiu, O. Curea, H. Camblong, and S. Ceballos, “Digital Control of a Three-Phase Four-Leg Inverter under Unbalanced Voltage Conditions,” Proc. of IEEE-EPE, pp. 1–10, 2007.
147. I. Vechiu, O. Curea, and H. Camblong, “Transient operation of a four-leg inverter for autonomous applications with unbalanced load,” IEEE Trans. Power Electron, vol. 25, no. 2, 2010. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2025275
148. S. G. Voronin and D. A. Kurnosov, “Vector control of synchronous motors with excitation from permanent magnets,” Electrical Engineering, no. 10, pp. 50–54, 2013.

149. S. G. Voronin, D. V. Korobotov, V. V. Zapunny, and P. O. Shaburov, "Vector control of a valve actuator," *Bulletin of SUSU. Series Energy*, is. 5, no. 4(33), pp. 11–15, 2004.
150. Wegiel, T. Variable speed small hydropower plant / T. Wegiel, D. Borkowski // *Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG 2012)*. – 6253996. – P. 167–174. DOI:10.1109/pedg.2012.6253996
151. Wood J.W., Hindmarch R.T. Rotor winding short detection. *IEEE Proceedings*. – 1986. – Vol 133. pt B, № 3. – P. 181–189.
152. Yuri N. Dementyev, A. D. Bragin, N. V. Kojain, and L. S. Udut, "Control System with Sinusoidal PWM Three-Phase Inverter with a Frequency Scalar Control of Induction Motor," *2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications*, 2015.
153. Yunwei, D. M. Vilathgamuwa, and L. P. Chiang, "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 1, pp. 1707– 1719, 2005.

**Приложение П1. Виды коротких замыканий, регламентированных
ГОСТ 26522**

Таблица П1. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения.

Термин	Определение
Виды коротких замыканий	
<p>1. Короткое замыкание в электроустановке</p> <p>Короткое замыкание</p>	<p>Замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительности режима.</p> <p>Примечания:</p> <p>1. Замыканием называют всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или землей.</p> <p>2. Следует отличать данное понятие термина от другого его понятия, не используемого в настоящем стандарте, означающего действие, приводящее к электрическому соединению между собой различных точек, например, замыкание контактов, замыкание цепи.</p>
<p>2. Короткое замыкание на землю в электроустановке</p>	<p>Короткое замыкание в электроустановке, обусловленное соединением с землей какого-либо ее элемента.</p>
<p>3. Короткое замыкание с землей в электроустановке</p>	<p>Короткое замыкание в электроустановке, сопровождающееся контактированием точки короткого замыкания с землей.</p>
<p>4. Однофазное короткое замыкание на землю</p> <p>Однофазное короткое замыкание</p>	<p>Короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна фаза.</p>
<p>5. Двухфазное короткое замыкание</p>	<p>Короткое замыкание между двумя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.</p>
<p>6. Двухфазное короткое замыкание на землю</p>	<p>Короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы.</p>

Продолжение таблицы П1.

Термин	Определение
7. Двухфазное короткое замыкание с землей	Двухфазное короткое замыкание в трехфазной электроэнергетической системе с незаземленными или резонансно-заземленными нейтралями силовых элементов, сопровождающееся контактированием точки короткого замыкания с землей.
8. Двойное короткое замыкание на землю в электроустановке	Совокупность двух однофазных коротких замыканий на землю в различных, но электрически связанных частях электроустановки.
9. Трехфазное короткое замыкание	Короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.
10. Трехфазное короткое замыкание на землю	Короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей соединяются три фазы.
11. Трехфазное короткое замыкание с землей	Трехфазное короткое замыкание в трехфазной электроэнергетической системе с незаземленными или резонансно-заземленными нейтралями силовых элементов, сопровождающееся контактированием точки короткого замыкания с землей.
12. Короткое замыкание между ветвями обмотки одной фазы	Межветвевое короткое замыкание.
13. Короткое замыкание между катушками или секциями обмотки одной фазы	Межкатушечное или межсекционное короткое замыкание.
14. Межвитковое короткое замыкание	Короткое замыкание между разными витками одной катушки или секции обмотки электрической машины, трансформатора или электрического аппарата.
15. Повторное короткое замыкание	Короткое замыкание в электроустановке при автоматическом повторном включении коммутационного электрического аппарата поврежденной цепи.

Продолжение таблицы П1.

Термин	Определение
16. Видоизменяющееся короткое замыкание	Короткое замыкание в электроустановке с переходом одного вида короткого замыкания в другой.
17. Устойчивое короткое замыкание	Короткое замыкание в электроустановке, условия возникновения которого сохраняются во время бестоковой паузы коммутационного электрического аппарата.
18. Неустойчивое короткое замыкание	Короткое замыкание, в электроустановке, условия возникновения которого самоликвидируются во время бестоковой паузы коммутационного электрического аппарата.
19. Симметричное короткое замыкание	Короткое замыкание в электроустановке, при котором все ее фазы находятся в одинаковых условиях.
20. Несимметричное короткое замыкание	Короткое замыкание в электроустановке, при котором одна из ее фаз находится в условиях, отличных от условий других фаз.
21. Удаленное короткое замыкание	Короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуда периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и в произвольный моменты времени практически одинаковы.
22. Близкое короткое замыкание	Короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуда периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и в произвольный моменты времени существенно отличается.
23. Неудаленное короткое замыкание	Близкое короткое замыкание на присоединенной к выключателю воздушной электрической линии, находящееся от него на расстоянии от нескольких сотен метров до нескольких километров, при котором условия отключения существенно утяжеляются.

Приложение П2. Основные виды коротких замыканий в электроустановках, регламентированных ГОСТ Р 52735.

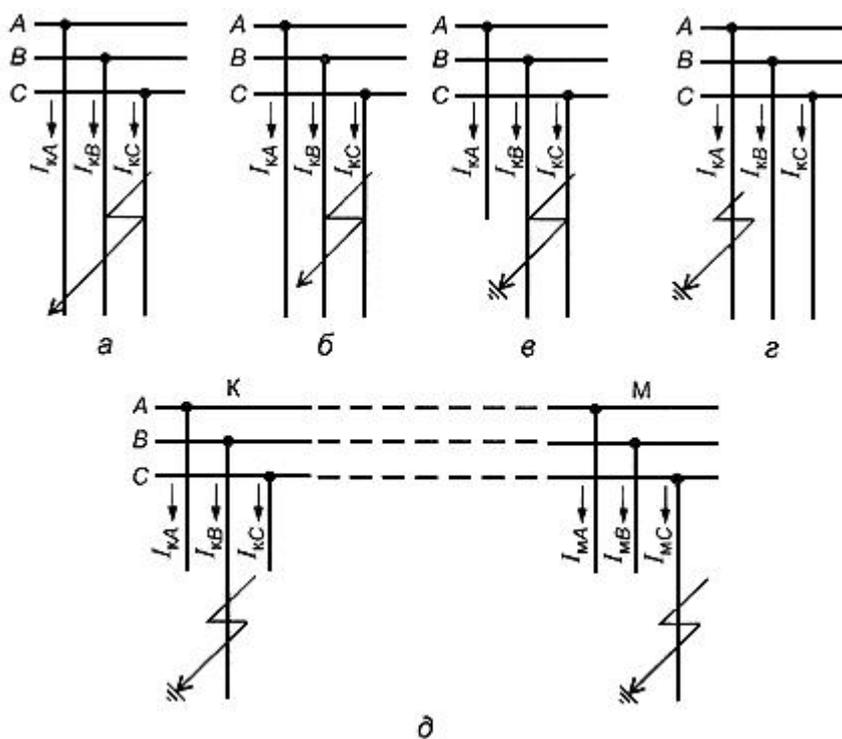


Рис. П.2.1. Основные виды коротких замыканий

а - трехфазное КЗ ; *б* - двухфазное КЗ ; *в* - двухфазное КЗ на землю;
г - однофазное КЗ на землю - К ; *д* - двойное КЗ на землю

Приложение ПЗ. Информация о приборе для проверки обмоток электрических машин ЕЛ-15

Аппарат ЕЛ-15 является электронным устройством, предназначенным для проверки в процессе изготовления и ремонта обмоток электрических аппаратов и машин мощностью до 110 кВт, напряжением до 660 В при количестве витков в испытываемых обмотках или секциях не менее двух.

Аппарат ЕЛ-15 служит для обнаружения витковых замыканий и обрывов в обмотках электрических машин и аппаратов, нахождения паза с короткозамкнутыми витками в обмотках статоров и якорей электрических машин по схеме, а также маркировки выводных концов фазных обмоток электрических машин. Чувствительность аппарата обеспечивает обнаружение одного короткозамкнутого витка на каждые 2000 витков в обмотках контрольных катушек.

Устройство и работа ЕЛ-15

По конструкции аппарат выполнен в виде переносного электрического прибора.

Схема аппарата ЕЛ-15 состоит из трех основных узлов:

- генератора импульсов;
- блока развертки луча и синхронизации электроннолучевой трубки;
- высоковольтного источника питания трубки.



Генератор импульсов вырабатывает импульсы испытательного напряжения с частотой 100 кГц, амплитуду которых можно плавно регулировать. Эти импульсы подаются на две проверяемые обмотки и одновременно поступают в блок развертки луча, управляя им. Импульсы напряжения, прошедшие через проверяемые обмотки, сравниваются на экране электроннолучевой трубки. Если одна из проверяемых обмоток имеет дефект, то импульс, прошедший через нее уменьшается и на экране будет наблюдаться раздвоение луча или уменьшение амплитуды. Таким образом, при проверке обмоток напряжение с них поочередно подается на вертикально отклоняющие пластины электроннолучевой трубки. Если сравниваемые обмотки одинаковы и исправны, то кривые этих напряжения будут накладываться друг на друга, в противном случае появится существенное раздвоение луча, по характеру которого можно сделать вывод о причинах неисправности обмоток.

Рекомендуемые аналоги:

ИДВИ-04 — Индикатор дефектов обмоток электрических машин,

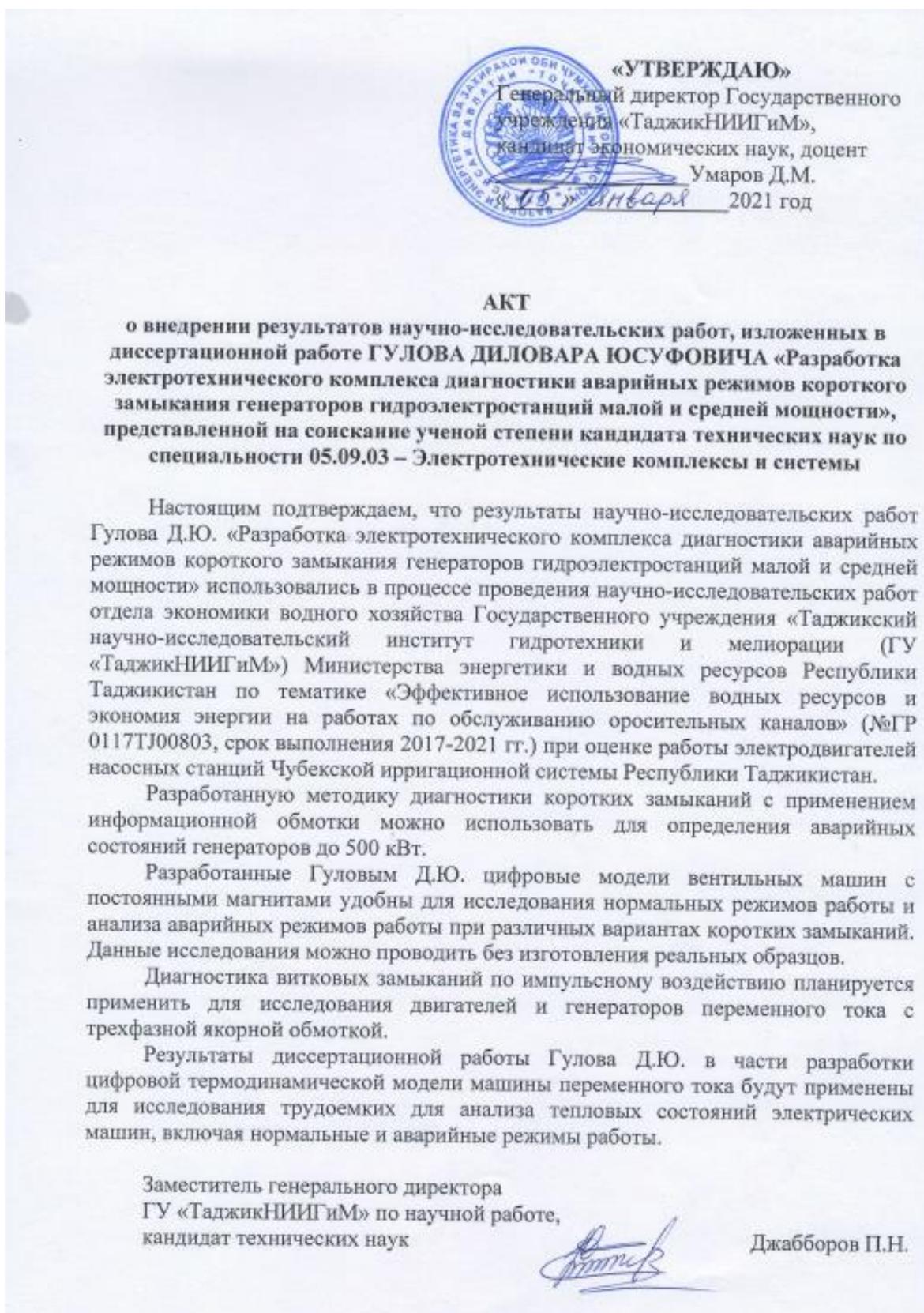
ИДО-06 – индикатор дефектов обмоток электрических машин,

Индикатор дефектов обмоток электрических машин ИДВИ-02,

Индикатор дефектов обмоток электрических машин ИДВИ-03

Цена 35 000 руб. с НДС.

Приложение П4. Акт внедрения результатов научно-исследовательских работ



Приложение П5. Акт использования результатов диссертационной работы



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ ТАДЖИКИСТАНА

735162, Душанбе, обл. Душанбе, район, ул. П. Нурсова 73 тел.: +992913546407; E-Mail: det@det.tj



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы «Разработка электротехнического комплекса диагностики аварийных режимов короткого замыкания генераторов гидроэлектростанций малой и средней мощности», выполненной Гуловым Диловаром Юсуфовичем

Комиссия в составе: председателя – к.п.н. Зувайдуллозода Ф.З., членов комиссии: к.т.н. Аминова Д.С., к.т.н. Носирова И.С., зав. каф. «Электрические станции», к.т.н. Косимова Б.И. свидетельствует о том, что для использования в учебном процессе кафедры «Электрические станции» приняты:

- метод диагностики межвитковых замыканий в фазе, межфазовых витковых замыканий, замыканий витков фазы на корпус с использованием информационной обмотки;
- цифровая электромагнитная модель вентильного генератора с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов;
- цифровая тепловая модель вентильного генератора с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов.